

湖南省湘江流域土地利用时空演变及多情景模拟研究

桂庆鸿

湖南师范大学地理科学学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年1月12日; 录用日期: 2026年2月14日; 发布日期: 2026年2月27日

摘要

为明晰湘江流域土地利用变化特点, 量化不同发展路径对区域土地利用结构的影响, 本文基于湘江流域2000年、2005年、2010年、2015年、2020年和2023年六期土地利用数据, 综合运用重心迁移模型、土地利用转移矩阵和PLUS模型等方法, 系统分析流域土地利用时空演变特征, 构建自然发展、城镇发展与生态保护三种情景, 模拟预测2035年土地利用格局。结果表明: (1) 2000~2023年, 湘江流域耕地减少1748.47 km², 建设用地增加1666.08 km², 林地保持相对稳定, 草地面积持续下降; 空间上, 耕地重心北移、林地重心西南移、建设用地重心先东北后南移, 反映出开发重心由下游向中上游转移; 土地利用转移矩阵显示耕地主要转为建设用地。(2) 至2035年, 三种情景下均呈现出建设用地持续扩张、耕地持续流失的态势, 其中城镇发展情景下建设用地扩张强度最大, 生态保护情景对生态用地保护效果最优, 能有效缓解生态空间压缩。本研究丰富了土地利用变化模拟在流域尺度的应用范式, 为湘江流域国土空间优化与高质量发展提供了科学依据。

关键词

湘江流域, 土地利用, PLUS模型, 情景模拟

Study on the Spatiotemporal Evolution and Multi-Scenario Simulation of Land Use in the Xiang River Basin, Hunan Province

Qinghong Gui

School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: January 12, 2026; accepted: February 14, 2026; published: February 27, 2026

Abstract

To clarify the characteristics of land use changes in the Xiang River Basin and quantify the impact of different development paths on regional land use structure, this study is based on six periods of land use data from the Xiang River Basin in 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, and 2023. By integrating methods such as the gravity center migration model, land use transfer matrix, and PLUS model, the temporal and spatial evolution characteristics of land use in the basin were systematically analyzed. Three scenarios—natural development, urban development, and ecological protection—were established to simulate and predict the land use pattern in 2035. The results show: (1) From 2000 to 2023, cropland in the Xiang River Basin decreased by 1748.47 km², construction land increased by 1666.08 km², forest land remained relatively stable, and grassland area continued to decline. Spatially, the center of cropland moved north, the center of forest land shifted southwest, and the center of construction land first moved northeast and then south, reflecting that the focus of development has shifted from downstream to mid-upper reaches. The land use transfer matrix indicates that cropland has mainly been converted into construction land. (2) By 2035, under all three scenarios, construction land continues to expand, and cropland continues to decrease, with urban development showing the highest intensity of construction land expansion, while ecological protection best preserves ecological land and effectively alleviates the compression of ecological space. This study enriches the application paradigm of land use change simulation at the watershed scale and provides a scientific basis for optimizing territorial space and promoting high-quality development in the Xiang River Basin.

Keywords

Xiang River Basin, Land Use, PLUS Model, Scenario Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土地利用是人类为满足生产和生活需要,对土地进行的经营活动,其时空演变受自然条件与社会经济条件共同驱动,深刻影响着区域空间结构与资源配置效率,对土地利用学的研究是贯穿土地科学发展的一条主线[1]。随着全球城市化与工业化进程持续推进,土地利用时空演变与情景模拟已成为地理学、城市规划学等领域的研究热点。土地利用变化模拟是指通过构建数学模型,结合地理信息技术,综合自然环境、社会经济、政策指引等多维度驱动因素,对未来土地利用格局进行设定情景下的预测。上世纪七十年代, Tobler 等把元胞自动机模型(Cellular Automaton, CA)应用于地理学研究,并对美国底特律的城市空间扩张进行预测[2]。经 P. H. Verburg 等发展完善的 CLUE-S(The Conversion of Land Use and Its Effects at Small Regional Extent)模型[3]在对土地需求、转换驱动力和转换系数综合分析的基础上,进行土地利用空间分配,拓展了土地利用变化模拟方法并得到了广泛应用[4]。

国内学界在土地利用变化模拟模型优化领域取得了较多成果,通过多尺度耦合机制创新与智能算法融合,构建起具有自主知识产权的高精度动态模拟技术体系。刘小平等[5]提出的未来土地利用模拟(Future Land Use Simulation, FLUS)模型能有效处理不同土地利用类型相互转化的复杂性和不确定性问题,用以模拟自然变化和人类活动共同作用下土地利用变化情况。Liang 等[6]开发的斑块生成土地利用变化模拟(Patch-Generating Land Use Simulation, PLUS)模型突破了传统 CA 模型仅依赖邻域规则的局限,引入随机森林算法挖掘土地利用扩张驱动因子贡献度,解决驱动机制解释性不足的问题,进一步提升了模型精度,

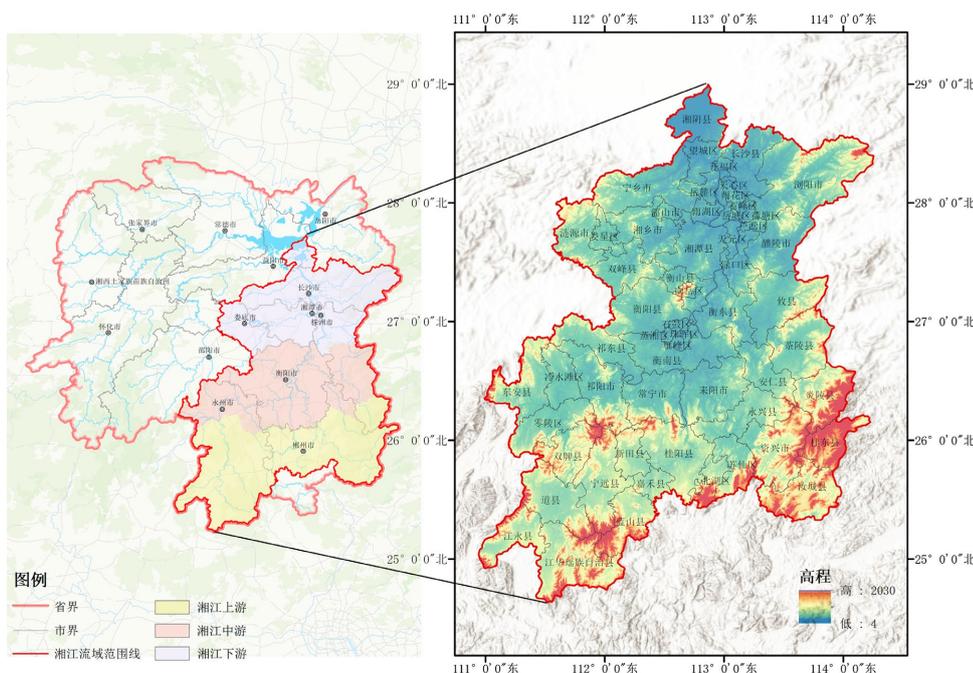
现已广泛应用于国土资源管理[7]、城市规划[8]、生态保护[9]及灾害评估预测[10]等众多领域。此外，人工神经网络模型[11](ANN)、马尔科夫模型[12](Markov)、系统动力学模型[13](System Dynamics, SD)等，在全球各个区域土地利用变化模拟的相关研究中也得到了普遍利用。

流域作为承载人口集聚、经济发展与生态保护多重功能的地理单元，其土地利用变化过程及未来情景模拟研究的重要性日益凸显，当前针对流域尺度开展长时序演变特征解析，并耦合未来多情景预测的研究相对较少。同时，2035年作为我国基本实现社会主义现代化的目标时点，亦是国土空间规划实施成效评估的关键时点，现有研究较少针对该时间节点展开模拟预测。湘江流域作为湖南省社会经济发展的核心地带，其土地利用结构演变直接关系区域高质量发展，本研究以湖南省湘江流域为研究区，分析其土地利用时空演变特征，构建多情景模拟框架，预测2035年不同情景下的土地利用格局，量化不同发展路径对土地利用结构的影响，为流域国土空间优化及可持续发展提供有利支撑。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

湘江是长江的一级支流，是湖南省境内最大的河流，其发源于永州市蓝山县，干流自南向北至湘阴县汇入洞庭湖，其主要支流包括潇水、舂陵水、耒水、洙水、浏阳河、涟水、蒸水等。湖南省湘江流域范围(图 1)介于北纬 24°38'~29°27'、东经 110°20'~114°15'之间，根据湖南省自然资源厅发布的审图号为湘S(2023)106 号的湖南省地图，流域总面积约 8.7 万平方公里，涉及长沙、湘潭、株洲等 8 个市共 59 个县(市、区)。湘江流域上游、中游、下游区域的划分依据 Du 等人的研究成果[14]及陈灿荣发布于中国知网的 GRID 2008 数据库确定。湘江流域整体地势南高北低，上游以山地和丘陵为主，中游以丘陵和平坝为主，下游沿河分布有一定规模的冲积平原。近年来，伴随经济快速发展与城市化进程加速，流域土地利用结构发生剧烈变化[15]，深刻反映出工业化、城镇化进程中人类活动与资源环境之间的强烈互动。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. The Xiang River Basin in Hunan Province

图 1. 湖南省湘江流域范围

2.2. 数据源与预处理

本文主要使用的数据包括地理空间数据、气象数据、行政区划数据、交通设施数据及社会经济数据等多种类型，具体数据内容及来源见表 1，部分数据缺失值使用线性插值法进行补充。需要特别说明的是，湘江流域道路矢量数据基于 Davis 等人发布的中国 1993~2020 年地表交通数据库[16]，并结合湖南省交通运输厅官方网站公开信息与 OpenStreetMap 数据补充 2023 年路网与出入口信息。铁路站点矢量数据通过高德地图确定，站点的动态变化信息则依据国家铁路局 12306 官网发布的全国铁路列车时刻表确认。为方便研究的可视化与量化分析，本文借助 Arcgis10.8 软件重采样、按掩膜提取、投影栅格等工具将数据地理坐标系统一到 GCS_WGS_1984，将投影坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

Table 1. Data types and sources
表 1. 数据类型及来源

数据类型	数据名称	数据来源
地理空间数据	土地利用数据	中国 30 米分辨率年度土地覆盖数据集[17] (Annual China Land Cover Dataset, CLCD)
	高程数据	地理空间数据云平台
	土壤类型	世界土壤数据库
气象数据	归一化植被指数	美国航空航天局 MOD13A3 数据集
	逐日降水数据	国家青藏高原科学数据中心
	逐日气温数据	中国气象科学数据共享服务网
行政区划数据	湖南省行政区划矢量数据	国家地理信息公共服务平台
	政府驻地 POI 数据	高德地图开放平台
交通设施数据	道路矢量数据	中国 1993~2020 年地表交通数据库[16]
	铁路站点矢量	高德地图开放平台
	高速路口矢量	高德地图开放平台
社会经济数据	人口密度栅格数据	中国科学院资源环境数据中心
	夜间灯光数据	2000~2023 年“NPP-VIIRS”夜间灯光数据[18]

3. 研究方法

3.1. 重心迁移模型

重心迁移模型[19]可以用于衡量各类用地的空间变动情况，不同时间尺度上几何重心迁移变化的轨迹能清晰表征土地利用变化的方位。重心坐标的计算公式为：

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{it} \times X_{it})}{\sum_{i=1}^n A_{it}}; Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{it} \times Y_{it})}{\sum_{i=1}^n A_{it}} \quad (1)$$

式中， X_t 和 Y_t 表示第 t 年湘江流域建设用地重心坐标， X_{it} 和 Y_{it} 表示 i 区域第 t 年地理重心的坐标， A_{it} 表示 i 区域第 t 年的建设用地面积。

3.2. 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是基于马尔科夫模型构建的用于分析区域土地利用变化的重要工具，土地利用转移矩阵以矩阵形式定量分析不同时期土地利用类型之间的转换关系，从而揭示土地利用类型在数量和转换方向上的动态演变特征。该方法能够有效反映特定时段内各土地利用类型的转入来源、转出去向及净变化量，是识别区域土地利用变化的有效手段。

3.3. PLUS 模型

PLUS 模型是由武汉大学 Liang [6] 等基于 C++ 语言开发的土地利用变化模拟模型，该模型提出了一种基于土地扩张分析策略(Land Expansion Analysis Strategy, LEAS)的规则挖掘框架和基于多类型随机斑块种子的 CA 模型[6] (CA based on Multiple Random Seeds, CARS)，相较于其他模型，PLUS 模型可以获得精度更高、准确性更优的土地利用空间分布预测结果，能够挖掘土地扩张和景观变化的驱动因素，调查潜在的土地利用转换规则。

4. 结果和分析

4.1. 土地利用时空演变特征

4.1.1. 数量结构变化

利用 ArcGIS 10.8 软件中的重分类工具，对各地类面积进行统计，得到各土地利用类型面积及其占比情况(表 2)。由表 2 可知，2000 年至 2023 年间，湘江流域土地利用结构变化显著。林地和耕地始终为湘江流域的主要土地利用类型，其面积占比分别保持在 67.24%和 24.75%以上。其中，林地面积总体较为稳定，占比始终在 67.44%上下浮动，耕地面积则呈持续下降趋势，其面积从 2000 年的 23271.27 km² 降至 2023 年的 21522.80 km²，23 年间净减少 1748.47 km²。草地在初期为湘江流域第三大土地利用类型，但因面积持续下降，其占比于 2015 年被建设用地超越。研究期内，湘江流域城镇化进程推进迅速，建设用地面积显著增加，由 2000 年的 1417.11 km² 增加至 2023 年的 3083.19 km²，累计增长 1666.08 km²，其面积占比也从 1.63%提高至 3.55%。

Table 2. Area and proportion of different land use types in the Xiang River Basin, 2000~2023

表 2. 湘江流域 2000~2023 年不同土地利用类型面积及比例

年份		耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2000 年	面积/km ²	23271.27	58473.25	2358.01	1381.57	55.18	1417.11
	占比/%	26.76	67.24	2.71	1.60	0.06	1.63
2005 年	面积/km ²	22960.65	58535.16	2357.98	1408.29	46.50	1647.82
	占比/%	26.40	67.32	2.71	1.62	0.05	1.90
2010 年	面积/km ²	22333.98	58774.89	2197.46	1462.54	82.76	2104.77
	占比/%	25.68	67.59	2.53	1.68	0.10	2.42
2015 年	面积/km ²	21987.24	58710.05	2173.70	1499.72	82.67	2503.01
	占比/%	25.29	67.51	2.50	1.72	0.1	2.88

续表

2020年	面积/km ²	21793.52	58657.12	2133.89	1396.31	79.31	2896.24
	占比/%	25.06	67.46	2.45	1.61	0.09	3.33
2023年	面积/km ²	21522.80	58701.38	2117.73	1438.84	92.46	3083.19
	占比/%	24.75	67.51	2.44	1.65	0.10	3.55

4.1.2. 空间结构变化

基于重心迁移模型,对湘江流域 2000~2023 年各土地利用类型的重心迁移轨迹、距离及方向进行可视化分析,以揭示研究期内湘江流域土地利用空间结构的变化特征。表 3 统计了重心迁移距离和迁移角度,图 2 则反映了湘江流域 2000~2023 年各土地利用类型重心迁移轨迹。综合分析可知,在研究期内,湘江流域不同土地利用类型的重心迁移存在显著差异。具体而言,耕地重心整体呈现逐渐向北迁移的趋势,迁移距离相对较小,但波动幅度较大,其迁移距离从 2000~2005 年的 0.50 km 逐步增加至 2010~2015 年的 1.02 km,随后在 2015~2020 年下降至 0.16 km,而 2020~2023 年又回升至 1.21 km。林地重心空间位置较为稳定,各时段迁移距离均未超过 0.85 km,且在迁移方向上表现为持续向西南方向缓慢迁移。草地重心在 2005~2010 年曾发生过一次较大距离的西北向迁移,其余时段迁移距离均小于 1 km,空间位置较为稳定。相较于其他地类,水域与未利用地的重心迁移方向较为复杂,缺乏一致性趋向。建设用地重心在 2000~2020 年间表现持续向东北方向迁移,且迁移距离呈逐渐缩小趋势,而在 2020~2023 年则转为向南迁移,该变化特征进一步印证了湘江流域建设用地的高速扩张区域逐渐由下游地区向中上游各县(市、区)转移的空间演变趋势。

Table 3. Migration distance and direction of the centroid of different land use types in the Xiang River Basin from 2000 to 2023

表 3. 2000~2023 年湘江流域不同土地利用类型重心迁移距离及迁移方向

	时间段	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
迁移距离/km	2000~2005 年	0.50	0.23	0.06	1.49	6.78	7.52
	2005~2010 年	0.54	0.73	4.47	1.23	2.34	6.19
	2010~2015 年	1.02	0.83	0.56	1.86	0.16	5.58
	2015~2020 年	0.16	0.22	0.24	3.06	7.74	1.59
	2020~2023 年	1.21	0.46	0.49	3.04	12.45	0.13
迁移方向/°	2000~2005 年	147.09	282.59	58.01	248.61	252.55	69.82
	2005~2010 年	87.38	259.56	146.28	247.71	77.71	64.32
	2010~2015 年	31.39	232.57	59.95	86.19	84.41	69.64
	2015~2020 年	25.95	227.73	178.77	282.44	104.63	63.22
	2020~2023 年	100.82	272.05	94.99	260.13	276.37	284.45

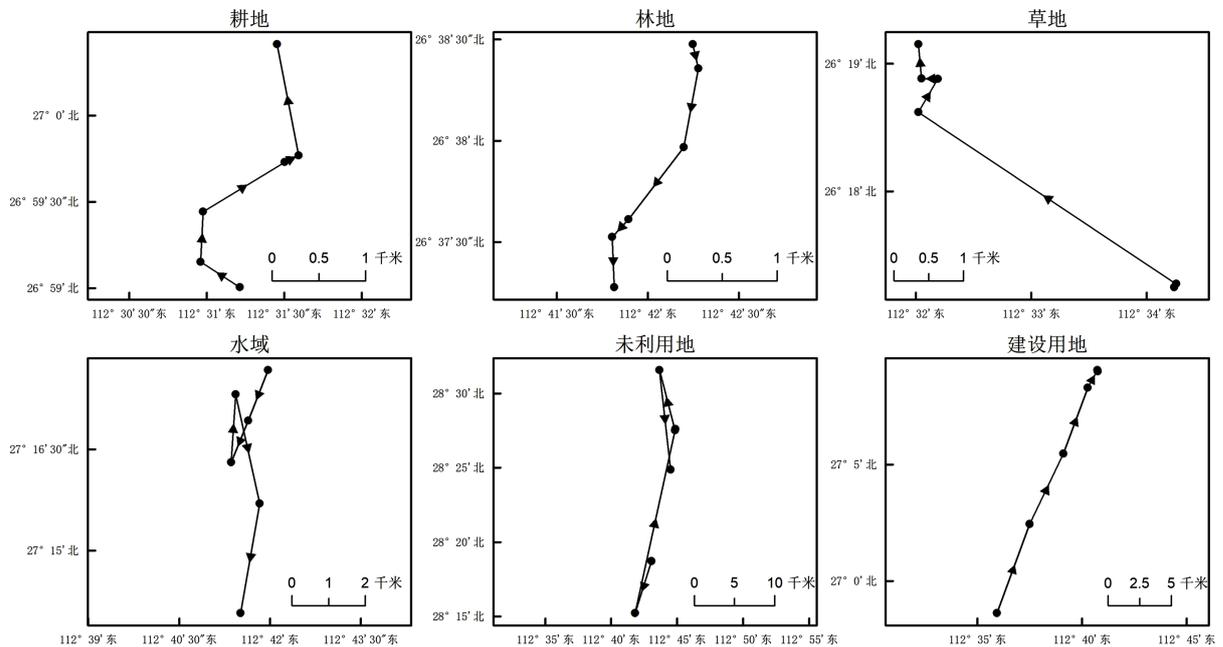


Figure 2. Migration map of the centroid of land use types in the Xiang River Basin from 2000 to 2023
图 2. 2000~2023 年湘江流域土地利用类型重心迁移图

4.1.3. 土地利用转移特征

综合表 4 和图 3 可知, 2000~2023 年, 耕地是最主要的转出地类, 共计 2819.99 km² 的耕地转向林地, 占耕地转出总量的 69.01%, 另有 1019.29 km² 的耕地转向建设用地, 占比为 24.94%, 向其他土地利用类型转移的规模则相对较小。在转入方面, 耕地的主要转入来源为林地, 面积为 2174.74 km², 而其他地类对耕地的转入贡献均未超过 95 km², 这一转出大于转入的态势导致研究期内耕地面积持续减少。林地是湘江流域的主要土地利用类型, 其总面积相对稳定, 除耕地转入外, 林地的另一重要来源为草地, 转入面积约 425.83 km²。建设用地是各地类的主要转移方向, 其扩张主要来源于耕地和林地。其中, 耕地转为建设用地的面积约 1019.29 km², 占建设用地转入面积的 59.56%, 其次为林地, 占比约 37.09%。

Table 4. 2000~2023 land use transfer matrix in the Xiang River Basin (unit: km²)
表 4. 2000~2023 年湘江流域土地利用转移矩阵(单位: km²)

用地类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
耕地	19184.88	2819.96	63.43	146.10	37.62	1019.29
林地	2174.74	55430.59	197.18	29.99	6.03	634.71
草地	54.19	425.83	1854.24	2.67	2.59	18.50
水域	96.10	20.11	1.69	1218.38	7.04	38.25
未利用地	7.56	4.10	1.07	3.04	38.92	0.49
建设用地	5.33	0.80	0.11	38.66	0.27	1371.95

综上所述, 2000~2023 年湘江流域土地利用变化以耕地转出和建设用地转入为主要特征, 反映出明显的城市化驱动下的土地利用变化过程。造成这一现象的主要原因包括城市人口增长带来的建设用地需

求上升，以及耕地在地形条件和区位临近性方面相较于其他土地利用类型更具转移优势。近年来，随着耕地保护制度的强化与建设用地节约集约利用理念的落实，耕地流失速度有所减缓。

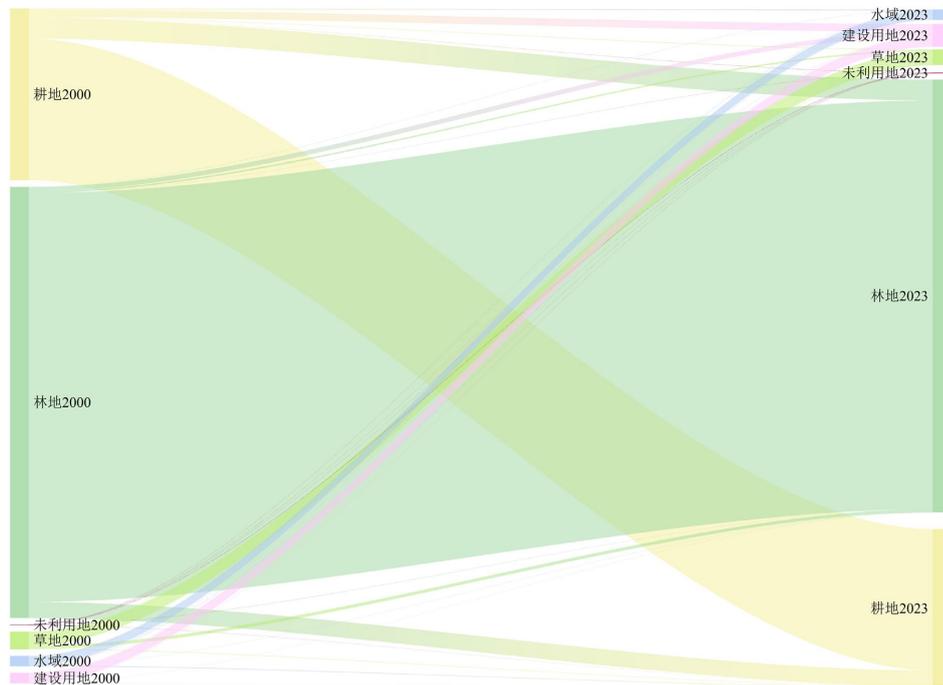


Figure 3. Sankey diagram of land use type changes in the Xiang River Basin from 2000 to 2023
图 3. 2000~2023 年湘江流域土地利用类型转移桑基

4.2. PLUS 模型参数设置及精度验证

4.2.1. 驱动因子指标体系构建及指标数据处理

参考相关文献[20] [21]，结合湘江流域实际，构建湘江流域土地利用变化驱动因子指标体系(表 5)。自然环境因子包括高程、坡度、坡向、年平均气温、年平均降水量、距河流距离、归一化植被指数及土壤类型 8 个指标，社会经济因子包含人口密度、夜间灯光指数两个指标，区位交通因子包括距政府驻地距离、距国省干道距离、距铁路站点距离及距高速路口距离 4 个指标。各驱动因子栅格数据像元大小统一为 30 m × 30 m，投影坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

Table 5. Indicator system of driving factors for land use change in the Xiang River Basin

表 5. 湘江流域土地利用变化驱动因子指标体系

数据类型	驱动因子	单位
自然环境数据	高程	米
	坡度	度
	坡向	度
	年平均气温	摄氏度
	年平均降水量	毫米
	距河流距离	千米

续表

社会经济数据	归一化植被指数	
	土壤类型	
	人口密度	人/平方千米
区位交通数据	夜间灯光指数	
	距政府驻地距离	千米
	距国省干道距离	千米
	距铁路站点距离	千米
	距高速路口距离	千米

4.2.2. 土地利用发展概率分析

将湘江流域 2000 年和 2020 年两期土地利用数据输入 PLUS 模型 Extract Land Expansion 模块, 逐像元比较土地利用栅格, 识别土地类型发生变更的像元位置, 进而生成土地利用扩张空间, 并将土地利用扩张空间分布及驱动因子数据集输入 PLUS 模型 LEAS 模块进行分析。模型采样率设置为 0.01, 随机森林模型中回归树数量设置为 20, 特征变量数设置为 14, 并行计算线程数设置为 10, 最终得到各地类发展概率图集及对应的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。RMSE 结果显示, 耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地的均方根误差分别为 0.1558、0.0556、0.0501、0.0168、0.0892 及 0.1068, RMSE 值均小于 0.2, 说明模型模拟的效果较好。

4.2.3. 邻域权重

邻域权重是衡量土地利用类型空间稳定性及抗转换能力的参数, 其取值范围为 0 到 1, 邻域权重值越大, 表明该土地利用类型越不容易向其他土地利用类型转换。本研究基于湘江流域 2000 年和 2020 年两期土地利用数据, 计算各土地利用类型面积变化量, 再利用极差标准化法计算邻域权重。初步计算得到各土地利用类型的邻域权重值, 发现水域的权重值为 0。但实际情况中任何土地利用类型的实际转换概率均不可能为 0, 若直接使用该权重值可能导致模型失真。因此, 研究在初步计算结果的基础上对邻域权重值进行了多轮调试, 通过调整不同土地利用类型的权重参数, 对比模拟精度与可靠性, 最终筛选出拟合效果最优的参数组合作为模型输入。经上述过程确定的最终邻域权重值如表 6 所示。

Table 6. Neighborhood weight values of land use types in the Xiang River Basin

表 6. 湘江流域土地利用类型邻域权重值

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
邻域权重值	0.981	0.116	0.143	0.05	0.106	1

4.2.4. 2023 年土地利用变化模拟结果及模型精度验证

以 2000 年与 2020 年湘江流域土地利用数据为基期数据, 以 2023 年实际土地利用类型斑块数量为需求目标, 输入土地发展概率图集、邻域权重等参数, 设定斑块生成阈值与扩张系数。斑块生成阈值是指生成新斑块的衰减阈值, 阈值越高代表转换策略越保守, 本研究设置为 0.5。扩张系数值代表模型产生新的斑块的能力, 本研究取 0.1。最终通过运行 PLUS 模型得到 2023 年土地利用模拟结果。

为验证模拟精度, 本研究采用 Kappa 系数法对模拟结果与实际土地利用状况的空间一致性进行量化。

Kappa 系数取值范围为 0~1, Kappa 系数值越接近 1, 则表明模拟结果与实际土地利用格局越接近, 模型模拟精度越高。经计算, 湘江流域 2023 年土地利用模拟的总体分类精度为 0.943, 即模拟正确的像元占总像元的 94.3%, Kappa 系数为 0.882, Kappa 系数高于 0.75, 表明模拟结果与实际土地利用格局在空间分布上具有高度一致性。

4.3. 2035 年多情景土地利用模拟

4.3.1. 多情景土地利用模拟情景设置

土地利用变化受多重因素交织影响, 其变化过程具有高度复杂性。本研究立足流域土地利用实际, 参考湖南省人民政府编制的《湖南省国土空间总体规划(2021~2035 年)》, 针对性设置自然发展、城镇发展、生态保护三种情景, 以系统探究不同导向下的未来土地利用空间格局变化趋势。

自然发展情景假设各土地利用类型间的转移概率、转换规模及空间演变趋势与历史阶段保持一致。城镇发展情景在保持其他土地利用类型间转移概率不变的前提下, 将建设用地向耕地、林地、草地、水域及未利用地的转出概率统一下调 20%, 同时将耕地、林地、草地转换为建设用地的概率同步上调 30%。生态保护情景将林地、草地向建设用地的转化概率统一下调 20%, 耕地向建设用地转化概率下调 30%, 水域向建设用地转化概率大幅下调 40%, 水域向耕地的转化概率提高 30%, 未利用地向建设用地的转化概率上调 40%, 模拟生态保护优先导向下的土地利用格局演变。基于此假设, 本研究借助 PLUS 软件内置的马尔可夫链模块(Markov Chain), 统计各时期土地利用类型间的像元转移数量与比例, 模拟各土地利用类型的数量变化趋势, 最终得到 2035 年不同情景下各土地利用类型的像元数量需求(表 7)。

Table 7. Forecast of land use demand in the Xiang River Basin under multiple scenarios in 2035

表 7. 2035 年多情景湘江流域土地利用需求预测表

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2023 年实际	23,914,219	65,223,755	2,353,032	1,598,713	102,731	3,425,763
2035 年自然发展情景	23,007,248	65,159,308	2,295,679	1,789,911	129,424	4,236,643
2035 年城镇发展情景	22,862,644	65,066,715	2,291,803	1,781,900	128,993	4,486,158
2035 年生态保护情景	23,151,174	65,232,402	2,298,750	1,805,112	129,858	4,000,902

4.3.2. 多情景土地利用模拟结果分析

基于 2023 年湘江流域土地利用数据, 针对自然发展、城镇发展、生态保护三种情景分别调整模型参数, 运用 PLUS 软件模拟生成 2035 年不同情景下的土地利用空间分布格局, 统计不同情景下土地利用类型面积, 形成面积统计表(表 8)。由表 8 可知, 2035 年湘江流域土地利用仍以林地、耕地和建设用地为主。耕地在所有情景中均呈减少态势, 水域与建设用地均增加。城镇发展情景下, 耕地减少与建设用地增加幅度显著高于其他情景。生态保护情景则通过抑制生态用地向建设用地转变, 耕地减少的面积显著低于其他情景, 林地与草地的面积与 2023 年基本持平, 体现了生态优先政策的调控效果。

与 2023 年相比, 自然发展情景下建设用地面积增加较为明显, 增加 729.79 km², 耕地面积缩减幅度最大, 达 816.28 km², 林地和草地的面积亦分别缩减 58.01 km² 和 51.62 km²。结合图 4 可知, 自然发展情景下建设用地延续蔓延扩张态势, 建设用地扩张主要占用邻近城区的耕地。对湘江流域 2023 年和 2035 年的土地利用类型面积进行分区统计, 结果显示自然情景下耕地面积减少较多的县(市、区)集中于湘江下游, 依次为湘阴县、望城区和浏阳市。建设用地增加最多的县(市、区)同样位于湘江下游, 包括浏阳市、

长沙县和望城区。这一结果表明，自然发展情景下湘江流域土地利用变化具有显著的空间集聚性，湘江下游地区是地类转换的核心区域。

Table 8. Area of different land use types in the Xiang River basin under various scenarios in 2035 (unit: km²)
表 8. 2035 年不同情景下湘江流域各土地利用类型面积(单位: km²)

情景	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
自然发展情景	20706.52	58643.38	2066.11	1610.92	116.48	3812.98
城镇发展情景	20576.38	58560.04	2062.62	1603.71	116.09	4037.54
生态保护情景	20836.06	58709.16	2139.52	1578.36	92.48	3600.81

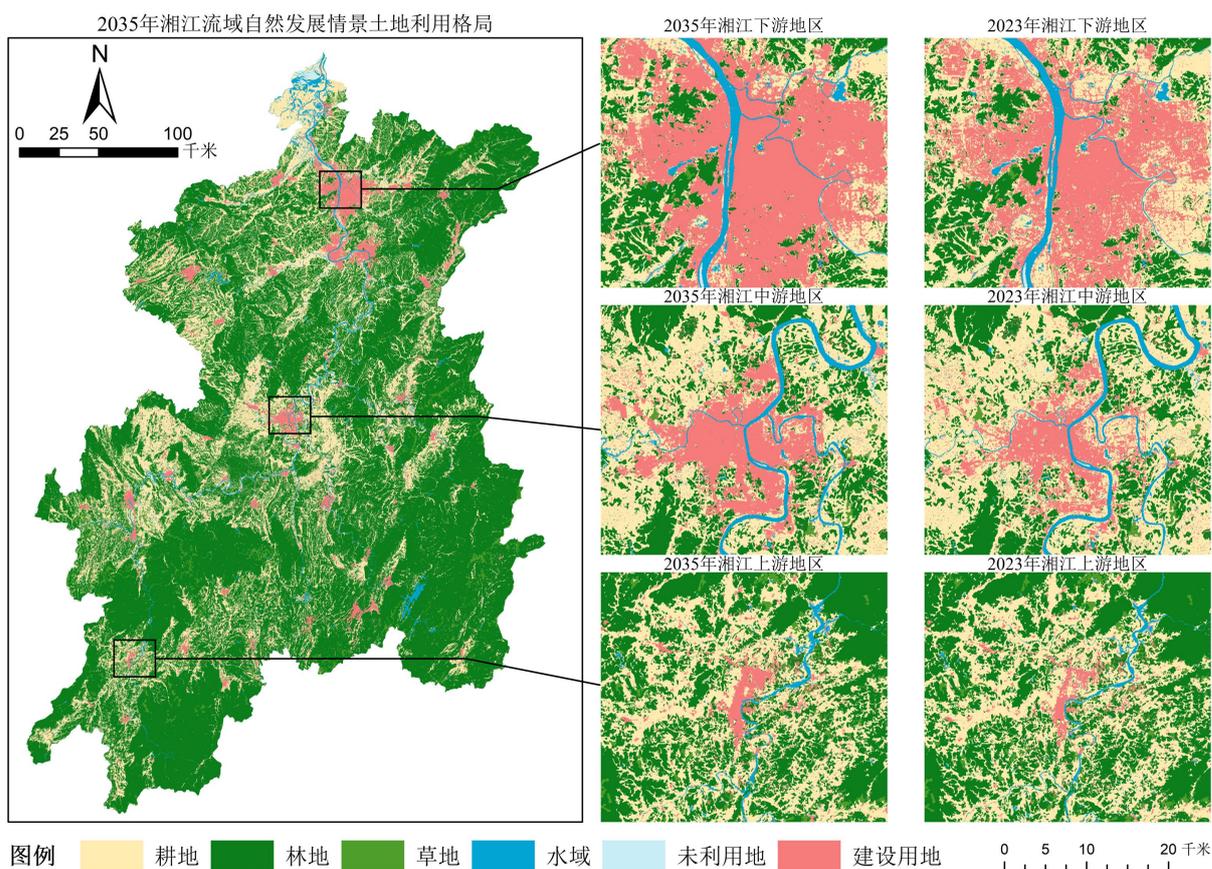


Figure 4. Simulation of land use spatial pattern in the Xiang River Basin under the natural development scenario in 2035 compared with actual situation in 2023

图 4. 2035 年自然发展情景湘江流域土地利用空间格局模拟与 2023 年实际对比图

城镇发展情景下，湘江流域土地利用变化以建设用地扩张为主要特征，与自然发展情景相比，其建设用地扩张速度更快且净增面积更大，建设用地净增加 954.35 km²。土地利用类型分区统计结果表明城镇发展情景下建设用地扩张热点区域与自然发展情景高度一致，集中分布于湘江下游的浏阳市、长沙县、望城区和醴陵市，分别增长了 403.82 km²、333.07 km²、257.50 km² 和 248.38 km²。同时，建设用地扩张较少的区域主要位于湘江中上游，包括南岳区、桂东县和江华县等。耕地缩减的规模相较于自然发展情景更大，总量为 946.42 km²，且缩减区域高度集中于湘阴县，约占全流域耕地减少量的 10%。湘阴县地

处湘江下游南岸，毗邻长沙市，作为城镇扩张前沿地带，大量耕地转为建设用地，反映出快速城市化对优质耕地的挤压效应。结合图 5 可知，城镇发展情景下，建设用地沿建成区向外蔓延扩张。

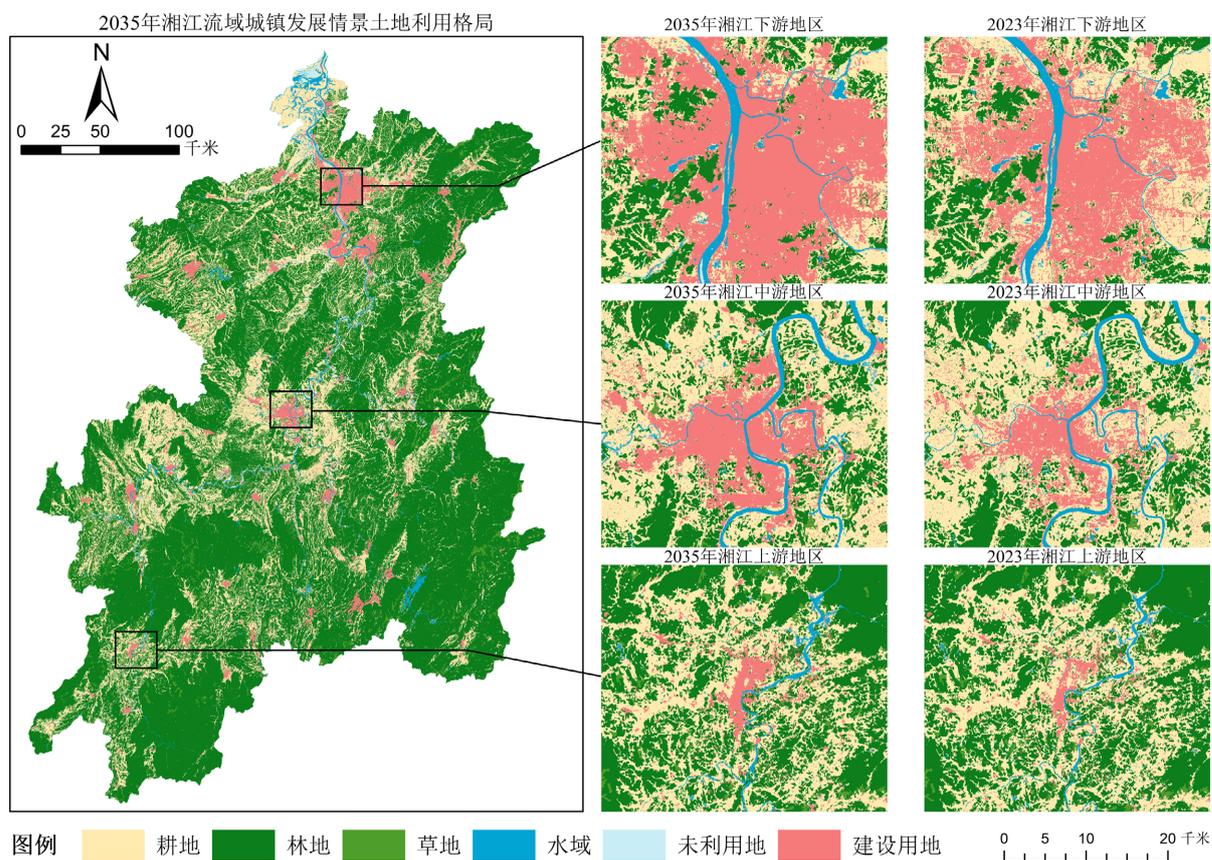


Figure 5. Simulation of land use spatial patterns in the Xiang River Basin under urban development scenarios in 2035 compared with actual 2023

图 5. 2035 年城镇发展情景湘江流域土地利用空间格局模拟与 2023 年实际对比图

生态保护情景以优先保护生态用地为导向，与其他两种情景相比，土地利用变化呈现出生态保护加强与开发强度趋稳的协同特征。结合分区统计结果及图 6 可知，耕地下降幅度显著缓和，耕地面积净减少量为 686.74 km^2 ，其中湘阴县减少最多，为 51.27 km^2 ，但降幅已明显小于自然发展情景和城镇发展情景下的流失量。林地与草地的变化尤为突出，两者面积分别较 2023 年增加 7.78 km^2 和 21.79 km^2 ，扭转了其他情景下面积持续下降的趋势，流域生态屏障得到了有效巩固。建设用地虽仍保持增长态势，净增 517.62 km^2 ，但涨幅较其他情景显著收窄，表明通过抑制生态用地向建设用地的不合理转换、引导存量用地集约利用，扩张冲动得到有效约束。如图 6 所示，生态保护情景下，湘江流域建设用地虽延续沿建成区周边向外蔓延的空间扩张模式，但其扩张边界已明显受到生态用地的刚性约束，集中连片的林地、草地与水系等生态性用地得到了有效保护，生态安全底线的落实效果明显。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

本文基于湖南省湘江流域多期土地利用数据，综合运用 PLUS 模型、重心迁移模型及转移矩阵等方法，系统分析了湘江流域土地利用变化特征，通过模拟验证模型精度，开展未来多情景土地利用变化预

测，主要结论如下：

(1) 数量结构上，湖南省湘江流域耕地呈持续减少态势，23年间净减少 1748.47 km²，建设用地则显著增加，累计净增长 1666.08 km²，林地面积占比稳定，草地则因持续减少，面积占比逐渐被建设用地超越。空间结构与转移特征上，各土地利用类型重心迁移差异显著。耕地重心整体北移且波动明显，林地重心向研究区西南方向缓慢迁移，建设用地先东北后南移，反映扩张区域由下游向中上游转移；转移特征以耕地转出为主，主要转向建设用地与林地。

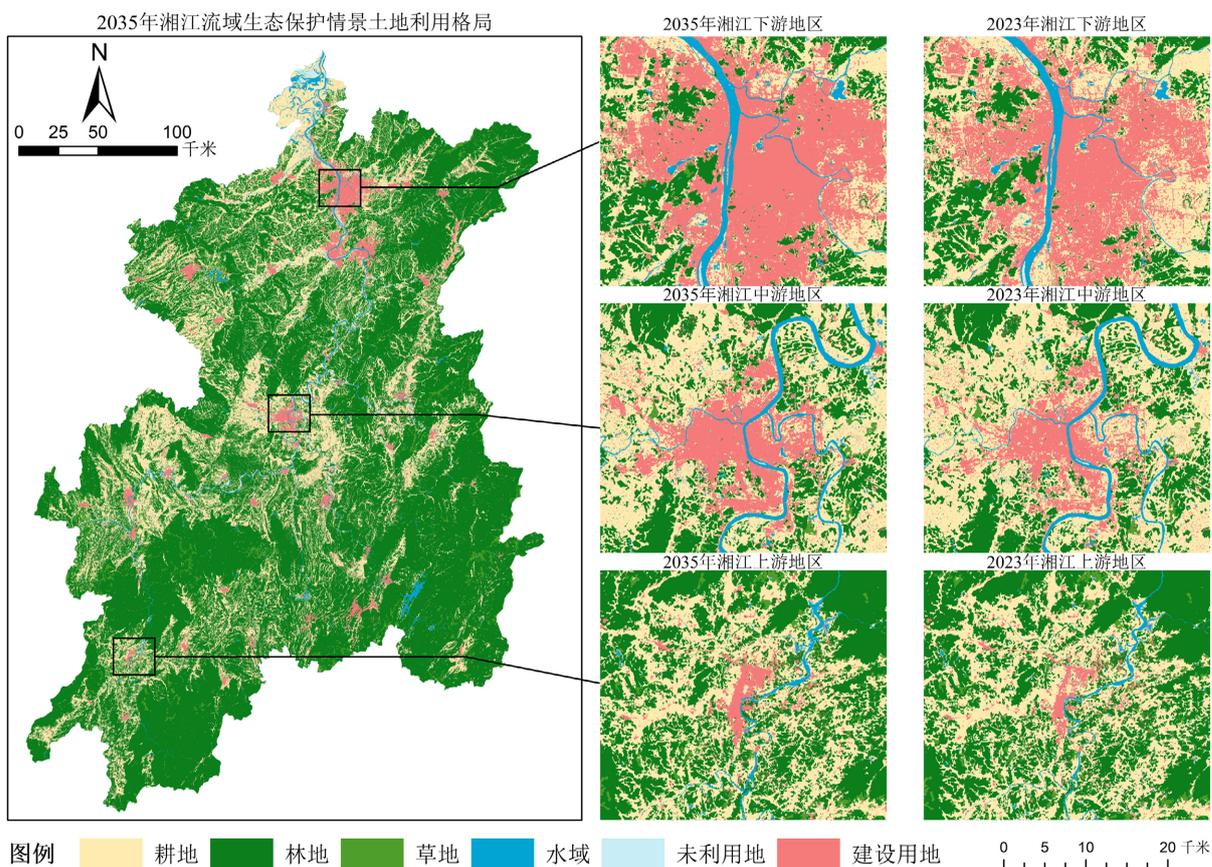


Figure 6. Simulation of land use spatial pattern in the Xiang River Basin under the 2035 ecological protection scenario compared with actual 2023

图 6. 2035 年生态保护情景湘江流域土地利用空间格局模拟与 2023 年实际对比图

(2) 未来不同情景下建设用地均持续扩张，且扩张热点高度重叠，耕地将持续减少。城镇发展情景下建设用地扩张和耕地流失最显著，自然发展情景次之，生态保护情景相对温和。生态保护情景能有效维持林地、草地等生态用地的面积，而其他两种情景因缺乏额外保护措施，导致生态用地持续减少，生态屏障受到不同程度挤压。

5.2. 讨论

本研究发现，湖南省湘江流域近二十三年土地利用变化以耕地持续减少及建设用地快速扩张为主要特征，直观反映了城镇化与工业化进程对区域土地利用空间格局的重塑作用。值得关注的是，建设用地的空间重心呈现出由下游地区向中上游地区转移的趋势，这一现象与湖南省不同阶段的区域发展战略紧密相关。早期建设用地向东北方向延伸，主要受到“长株潭一体化”战略的推动，下游长株潭城市群作

为增长极建设用地集聚扩张，而近年重心向南及中上游迁移，则与“湘南湘西承接产业转移示范区”等发展战略的实施密切相关，产业转移与区域均衡发展政策引导建设活动向生态敏感性更高的中上游地区拓展，也预示着该区域未来将面临开发与生态保护的三重压力。多情景模拟结果进一步表明，若缺乏有效政策干预，流域内耕地流失与生态用地缩减将持续加剧，而强化生态保护措施可有效遏制建设用地无序蔓延，在维持生态用地面积接近基期水平的同时，显著减缓耕地面积下降速率。因此，湘江流域土地利用管理需严格锚定“三区三线”管控要求，在精准划定永久基本农田保护红线的基础上，叠加生态安全屏障区的空间管控边界，构建耕地保护与生态维育的双重约束体系，并实行开发建设负面清单管理制度，严格高耗地、低效益的建设项目落地。此外，应充分运用城乡建设用地增减挂钩、存量低效用地盘活等政策工具，推动土地利用模式从外延扩张向内涵挖潜转型，最终实现耕地保护、生态维育与土地节约集约利用的协同推进。

参考文献

- [1] 林坚, 张叶笑, 周琳, 等. 土地利用学 30 年发展综述——兼论土地利用学的二级学科可能性和中国土地利用研究的原创性[J]. 中国土地科学, 2017, 31(10): 15-22, 97.
- [2] 刘星雨. 湖北省建设用地扩张多情景时空模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [3] 张永民, P. H. Verburg, 赵士洞. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J]. 自然资源学报, 2003(3): 310-318.
- [4] 戴声佩, 张勃. 基于 CLUE-S 模型的黑河中游土地利用情景模拟研究——以张掖市甘州区为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(2): 336-348.
- [5] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(4): 532-542.
- [6] Liang, X., Liu, X., Li, D., Zhao, H. and Chen, G. (2018) Urban Growth Simulation by Incorporating Planning Policies into a Ca-Based Future Land-Use Simulation Model. *International Journal of Geographical Information Science*, **32**, 2294-2316. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1502441>
- [7] 支俊俊, 韩陈勋, 王雪婷, 等. 中国建设用地扩张未来情景模拟及其对景观格局演化的影响[J]. 地理研究, 2024, 43(4): 843-860.
- [8] Zhong, Y., Zhang, X., Yang, Y. and Xue, M. (2023) Optimization and Simulation of Mountain City Land Use Based on MOP-PLUS Model: A Case Study of Caijia Cluster, Chongqing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **12**, Article 451. <https://doi.org/10.3390/ijgi12110451>
- [9] 梁秋燕, 宋明洁, 张豆, 等. 基于生态安全格局的昆明市 2030 年和 2050 年土地利用模拟[J]. 生态环境学报, 2025, 34(9): 1463-1472.
- [10] Zhao, H., Gu, T., Tang, J., Gong, Z. and Zhao, P. (2023) Urban Flood Risk Differentiation under Land Use Scenario Simulation. *iScience*, **26**, Article 106479. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106479>
- [11] 陶奕宏, 王海军, 张彬, 等. 基于智能体和人工神经网络的元胞自动机建模及城市扩展模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(1): 79-85.
- [12] 何艳虎, 吴璐言, 林泽宇. 低碳导向下的东江流域土地利用优化与模拟[J]. 热带地理, 2024, 44(11): 2104-2114.
- [13] 熊鹰, 陈云, 李静芝, 等. 基于土地集约利用的长株潭城市群建设用地供需仿真模拟[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 562-577.
- [14] Du, J., Cheng, L. and Zhang, Q. (2019) Spatiotemporal Variability and Trends in the Hydrology of the Xiang River Basin, China: Extreme Precipitation and Streamflow. *Arabian Journal of Geosciences*, **12**, Article No. 566. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4731-3>
- [15] Du, J., Cheng, L., Zhang, Q., Yang, Y. and Xu, W. (2019) Different Flooding Behaviors Due to Varied Urbanization Levels within River Basin: A Case Study from the Xiang River Basin, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, **10**, 89-102. <https://doi.org/10.1007/s13753-018-0195-4>
- [16] Davis, S.J., Qian, M. and Zeng, W. (2025) A Comprehensive GIS Database for China's Surface Transport Network with Implications for Transport and Socioeconomics Research. Stanford Institute for Economic Policy Research (SIEPR).
- [17] Yang, J. and Huang, X. (2024) The 30 m Annual Land Cover Datasets and Its Dynamics in China from 1985 to 2023. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>

- [18] Chen, Z., Yu, B., Yang, C., Zhou, Y., Yao, S., Qian, X., *et al.* (2021) An Extended Time Series (2000-2018) of Global NPP-VIIRS-Like Nighttime Light Data from a Cross-Sensor Calibration. *Earth System Science Data*, **13**, 889-906. <https://doi.org/10.5194/essd-13-889-2021>
- [19] 张丽芳, 方创琳, 高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [20] 姚侠妹, 盛雨恬, 祁慧敏, 等. 模拟多情景下淮河生态经济带土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 300-311.
- [21] 杨子韬, 田莉. 基于 PLUS 模拟未来土地利用变化的可持续发展评估——以江西省为例[J]. 地理科学, 2024, 44(10): 1826-1836.