湖北省土地利用配置与减碳增效优化*

——基于 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型分析

赵钧一 杜昌会 武 静

武汉大学城市设计学院 武汉 430072

摘要：【目的】结合生态文明、乡村振兴和城乡融合等可持续发展目标，寻求经济发展与生态保护平衡的土地利用结构，以推动经济社会的土地效能优化。【方法】以湖北省为研究区域，分析 2000—2020 年期间土地利用的时空变化特征，运用灰色预测模型预测 2030 和 2060 年自然演变情境下的土地利用；计算湖北省 2000—2020 年的经济效益系数，并通过灰色预测得到 2030 与 2060 年的经济效益系数；结合多目标规划模型，平衡土地生态与经济效益，耦合 GeoSOS-FLUS 模型模拟土地利用布局，并采用标准差椭圆与重心迁移模型进行分析。【结果】经济优先情景下主要表现为耕地和草地向城镇建设用地的转化，建设用地面积达到历史最高；生态效益优先情境下林地和草地面积增加，耕地和建设用地受到限制。通过多目标规划模型平衡经济效益和生态效益，结果表现为耕地向建设用地和林地的转化，土地结构趋于稳定。【结论】湖北省有可能在未来实现生态与经济效益的和谐共生，经济和生态效益两者兼具情景在丰富生态过程和格局结构上具有一定的优越性，可为湖北省国土空间资源配置、“三生”空间优化等决策提供一定的参考和借鉴。

关键词：土地利用配置；MOP 模型；GeoSOS-FLUS 模型；灰色预测

DOI：10.12169/zgcsly.2024.12.27.0004

Optimization of Land Use Configuration and Emission Reduction Enhancement in Hubei Province Based on MOP and GeoSOS-FLUS Models

Zhao Junyi Du Changhui Wu Jing

(School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: 【Objective】 To find a balanced land use structure that aligns economic development with ecological protection for boosting the land efficiency in economic and social development, focusing on sustainable development goals such as ecological civilization, rural revitalization, and urban-rural integration. 【Method】 This paper takes Hubei Province as the study area to analyze the spatiotemporal changes in land use from 2000 to 2020 and forecast land use changes under natural evolution scenarios for 2030 and 2060 using the grey prediction model. The economic efficiency coefficients of Hubei Province from 2000 to 2020 are calculated, and the the economic efficiency coefficients for 2030 and 2060 are forecast based on grey prediction model. The MOP multi-objective planning model is employed to balance ecological and economic benefits, while the GeoSOS-FLUS model is used to optimize land use layout. The

收稿日期：2024-12-27

* 基金项目：湖北省自然科学基金计划项目（2025AFC008）；国家自然科学基金面上项目（42471124）；国家自然科学基金面上项目（42471275）

第一作者：赵钧一（1991-），男，博士后，研究方向为蓝绿空间、碳中和。E-mail：j. zhao@ whu. edu. cn

杜昌会（2003-），女，本科生，研究方向为经济与碳汇。E-mail：hui. duang@ whu. edu. cn

通信作者：武静（1981-），女，博士，教授，研究方向为蓝绿空间、碳中和。E-mail：jing. wu@ whu. edu. cn

study also applies standard deviation ellipses and centroid migration models for analysis.【Result】Under the economic priority scenario, it is characterized with the conversion of arable land and grassland to urban construction land, with the area of construction land reaching an all-time high. In contrast, under the ecological priority scenario, forest land and grassland increase in area, while arable land and construction land have a restricted area. By using the multi-objective planning model, the balance between economic and ecological benefits is achieved, primarily reflected in the conversion of cultivated land to construction land and forest land.【Conclusion】Hubei Province has the potential to achieve a harmonious coexistence of ecological and economic benefits in the future. The O4 scenario, which balances both aspects, has certain advantages in enriching ecological processes and optimizing spatial patterns. This can provide certain references and inspirations for decision-making in land resource configuration and optimization of production, living, and ecological spaces in Hubei Province.

Keywords: land use configuration; MOP model; GeoSOS-FLUS model; grey prediction

快速工业化的背景下，二氧化碳、甲烷等温室气体的排放带来全球变暖、海平面上升，生态平衡破坏等一系列问题，威胁着全球生态安全。碳排放主要由能源消耗产生[1]，与经济发展息息相关。在过去 20 年，中国的建设活动显著影响碳排放格局，经济发展与降低碳排的冲突愈发明显。如何基于有限的土地资源，寻求“减碳增效”的可持续发展模式，已成为迫在眉睫的问题。因此，科学预测未来土地利用变化，优化土地利用布局，能为决策者提供建议，对实现经济与碳排协同发展具有重要意义。

近年来，土地碳排及相关问题备受学者们的关注，研究成果集中在土地碳排放机制、碳排放效应和低碳目标下的用地优化等方面[2-5]。随着信息技术的发展，土地利用优化研究得到较大提升。以往研究多将低碳作为单一目标，集中于线性规划分析[6-7]。近年来，通过多目标综合决策实现土地效益最大化成为土地利用规划领域的研究热点。相关学者围绕土地利用结构和布局优化进行了大量研究[8-11]。但面对新时期的发展需求、乡村振兴、城乡融合等发展导向与政策约束，城乡土地利用愈加复杂，亟待构建新型土地利用规划编制范式。

综上，为实现土地生态与经济效益的平衡，本文综合政策约束，结合多目标规划模型和 GeoSOS-FLUS 模型对湖北省未来土地空间布局进行多情景模拟预测；进一步探索土地资源在数量和空间上的合理分配，为“双碳”目标和可持续发展提供决策支持。

1 研究区概况

湖北省（29° 01′ 53″—33° 6′ 47″ N，108° 21′ 42″—116°07′50″E）位于中国中部，长江中游，总面积约 18.59 万 km^2。自中部崛起战略实施以来，湖北省经济迅速发展，但城市化进程导致资源消耗加剧，土地不合理配置破坏了生态环境。因此，优化土地利用结构，协调经济与生态目标，对实现湖北省可持续发展至关重要。以湖北为研究对象也可为中部地区可持续发展提供参考。

2 研究方法

2.1 数据来源

使用湖北省 2000—2020 年的 3 类数据集（表 1）。1）气候环境数据：年均降水量、年均气温和 DEM 数据以及从 DEM 数据中提取的坡度坡向数据。2）社会经济数据：人口密度、GDP、距离铁路、距离国道、距离省道。3）其他数据：统计年鉴、LUCC 和行政区域。

2.2 研究框架

先通过 2000—2020 年的数据计算 2030 和 2060 年的相关性系数。然后采用 MOP 模型进行土地利用优化，以经济效益最大、生态效益最大和两者兼具 3 个思路，结合 GeoSOS-FLUS 模型对可能的方案进行空间模拟。

2.3 多情景模拟

现代城市的发展需要同时满足经济和生态的要求[12]。不同土地类型限定了不同的社会活动，带来经济效益的改变，故将土地利用效益最大化视为目标函数，可通过数学方法计算土地利用结构最优解。

表 1　数据信息与来源

数据集	子数据	空间分辨率	来源
气候环境数据	年均降水量	30 m	地理国情监测云平台 https://www.dsac.cn/
	年均气温	30 m	
	DEM	30 m	地理空间数据云平台 https://www.gscloud.cn/
	坡度	30 m	
	坡向	30 m	
社会经济数据	人口密度	30 m	全球人口数据评估 https://www.worldpop.org/
	GDP	30 m	地理国情监测云平台 https://www.dsac.cn/
	距离铁路	30 m	OpenStreetMap https://www.openstreetmap.org/
	距离国道	30 m	
	距离省道	30 m	
其他数据	统计年鉴	面板数据	湖北省政府网站
	LUCC	10 m	基于陆地卫星 Landsat 遥感影像数据作为主信息源，通过人工目视解译
	行政区域	向量	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn

2.3.1　灰色预测模型

预测未来土地利用变化可评价土地利用优化方案的效果[13]。灰色预测模型是一种能通过简单数据预测未来数据的模型，能弥补数据部分缺失带来的误差，减少外部因素对数据的影响[14]。本文用灰色预测模型对湖北省土地利用的动态变化进行预估，在缺乏长期数据的情况下，通过历史数据的积累识别并预测变化趋势。

2.3.2　多目标规划模型

多目标优化的目的是寻找一个或多个折中解，在主客观条件下，使一个或多个目标达到最值[15]。研究将耕地、林地、草地、城镇建设用地、农村居民点、其他建设用地、未利用土地和水域 8 类作为决策变量，依托湖北省自然本底，综合考虑政府规划，构建 4 种情景：自然演变（O1）、经济效益优先（O2）、生态效益优先（O3）和经济生态效益两者兼具（O4）[8, 12]，不同土地利用类型的经济效益系数和生态效益系数如表 2。

1）自然演变（O1）。假设土地利用变化无任何人为干预和政策改变。基于 2000—2020 年的土地利用数据，采用灰色预测模型进行趋势分析。

2）经济效益优先（O2）。政策目标侧重于最大化土地经济效益，利用 2000—2020 年数据计算各地类经济效益系数[16]，未利用地的经济效益设为 0，通过灰色预测模型得出 2030 和 2060 年的系数。

3）生态效益优先（O3）。以生态效益最大化为目标，采用中国生态系统服务价值当量因子估算不同地类的生态效益系数[17]。

4）两者兼具（O4）。平衡经济与生态效益，最大化土地综合价值，构建综合经济和生态效益目标函数。

表 2　湖北省不同用地类型的经济效益系数与生态效益系数

万元/km^2

项目	经济效益系数		生态效益系数	
	2030 年	2060 年	2030 年	2060 年
耕地	1 299	18 919	61	61
林地	85	2 309	193	193
草地	5 695	55 651	89	89
水域	2 588	41 207	407	407
城镇建设用地	128 763	1 771 480	−211	−211
农村居民点	18 618	193 990	−211	−211
其他建设用地	220 353	312 223	12	12
未利用地	0	0	4	4

5）约束条件。为保证各情景土地利用仍符合自然发展规律和相关规划预期，与湖北省规划政策衔接，参照《湖北省土地利用总体规划 2006—2020》《湖北省自然资源保护与开发“十四五”规划》《湖北省国土空间修复规划》等，构建 2030 年和 2060 年的约束条件如下：

$$s.t.2030=\begin{cases}46\,313\leqslant x_1\leqslant 73\,676\\ 86\,067\leqslant x_2\leqslant 101\,509\\ 6\,118\leqslant x_3\leqslant 7\,368\\ 11\,636\leqslant x_4\leqslant 13\,963\\ 5\,594\leqslant x_5+x_6\\ 8\,450\leqslant x_5+x_6+x_7\leqslant 18\,886\\ 320\leqslant x_8\leqslant 381\\ x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6+x_7+x_8=185\,900\\ x_1、x_2、x_3、x_4、x_5、x_6、x_7、x_8>0\end{cases}\tag{1}$$

$$s.t.2060=\begin{cases}46\,168\leqslant x_1\leqslant 100\,468\\ 86\,067\leqslant x_2\leqslant 110\,737\\ 6\,307\leqslant x_3\leqslant 7\,719\\ 11\,436\leqslant x_4\leqslant 15\,126\\ 5\,594\leqslant x_5+x_6\\ 8\,450\leqslant x_5+x_6+x_7\leqslant 18\,886\\ 262\leqslant x_8\leqslant 381\\ x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6+x_7+x_8=185\,900\\ x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,x_7,x_8>0\end{cases} \tag{2}$$

式（1）~（2）中，x_1耕地、x_2林地、x_3草地、x_4水域、x_5城镇建设用地、x_6农村居民点、x_7其他建设用地、x_8未利用地。

此外，由于灰色预测在基准情景下的预测精度较高，其他情景应以此为基准并满足上述约束条件，保证各 LUCC 在基准情景的 20% 范围内变化[18]。

2.4 GeoSOS-FLUS 模型

采用 GeoSOS-FLUS 模型，模拟湖北省 2030 和 2060 年不同情景下的用地分布[19]。在模拟过程中，自然和社会驱动因素是影响用地分布的重要因素。GeoSOS-FLUS 模型采用 3 类驱动因素：自然驱动因素、空间可达性驱动因素、社会驱动因素。用 2015 年土地利用数据和马尔可夫链获得 2020 年预测结果。将 2020 年预测结果与 2020 年实际数据比较进行准确性验证，随后进行土地利用模拟（表 3）。

表 3 参数设置

参数	值	说明
最大迭代次数	300	模型达到最大迭代次数时会提前停止
领域	3	细胞自动机使用 3×3 的摩尔邻域
加速因子	0.1	表示了土地利用变化的转化速率
线程数	10	增加线程数可以加速模型的操作

3 结果与分析

3.1 土地利用变化历史特征

2000—2020 年，湖北省土地利用发生显著变化。根据表 4 和图 1：2015—2020 年，土地利用变化最为活跃，主要表现为林地与耕地相互转换。2005—2010 年，地类变化的重点是增加建设用地，耕地大幅减少，这与“中部崛起”战略相关，湖北省加快了基础设施建设。农村居民点逐年递增，大量转为城镇建设用地，这与乡村振兴政策和大量农村人口进入城市有关。其他建设用地面积增加明显，可能与 2008 年“四万亿”经济刺激计划相关，湖北省获得大量资金支持，用于工业园开发和基础设施建设。

表 4 2000—2020 年湖北省各类用地面积 km^2

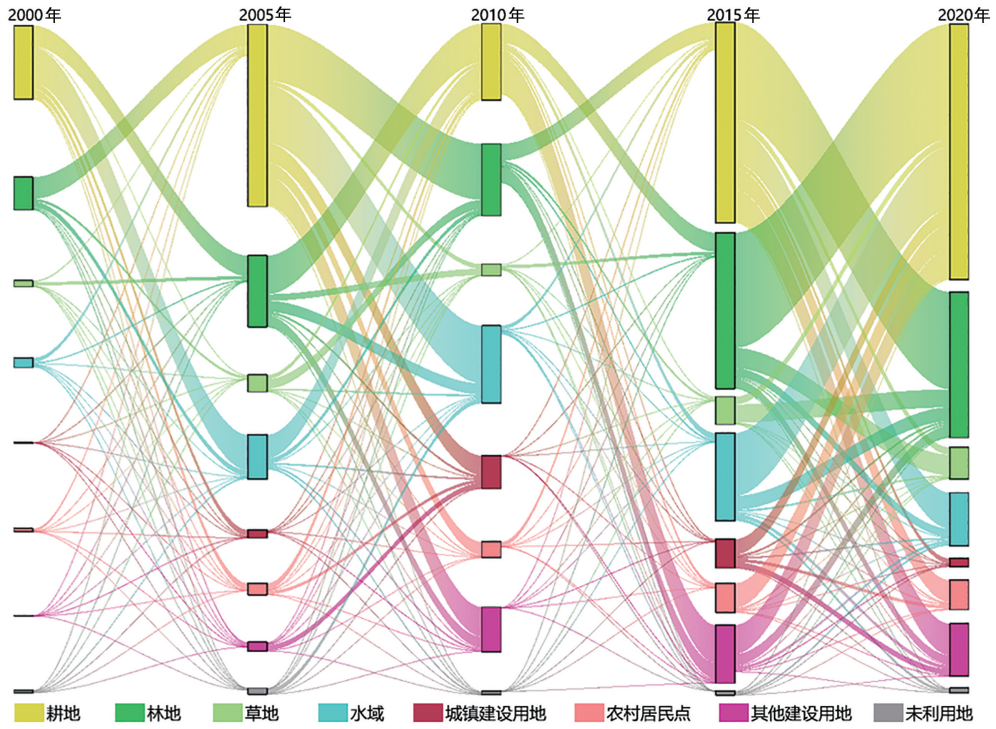
地类	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	69 271.56	68 860.61	66 760.81	65 897.47	66 978.59
林地	92 891.48	92 758.06	92 766.32	92 477.08	92 281.49
草地	7 104.62	7 075.51	6 972.02	6 934.31	7 017.44
水域	10 760.92	11 455.61	12 308.59	12 329.99	11 635.55
城镇建设用地	1 158.58	1 311.25	1 910.26	1 950.61	1 535.82
农村居民点	3 573.40	3 659.39	3 745.45	3 737.65	3 744.79
其他建设用地	326.95	415.24	1 126.11	2 263.77	2 372.44
未利用地	434.99	426.17	373.86	370.47	380.94

空间分布上（图 2）：湖北省的耕地主要集中在荆州、襄阳和荆门等地，占全省土地总面积的 1/3；林地占 50%以上，主要分布在十堰、恩施和宜昌等地；草地集中在咸宁、随州和黄冈；城镇建设用地占全省土地总面积的 1/10，呈放射状扩展。随着城镇化的加速，耕地总体呈下降趋势，尤其在武汉及周边城市；建设用地呈点状扩展，武汉都市圈的城镇建设用地向南、东、北方向蔓延。

3.2 不同情景下土地利用数量配置预测

基于湖北省 2000—2020 年的土地利用变化趋势，预测 2030 和 2060 年不同情景下的土地利用变化（表 5）。

1）O1 情景。耕地与林地面积持续下降，2030 年后下降速度趋缓；草地面积波动，总体趋于稳定；水域增加，速度逐渐放缓，可能与长江大保护战略和湿地保护政策有关；建设用地处于扩张状态，城镇建设用地和农村居民点的扩张速



注：节点长度表示变化面积，左侧表示流入面积，右侧表示流出面积，节点粗细反映变化规模

图 1　2000—2020 年湖北省土地数量变化

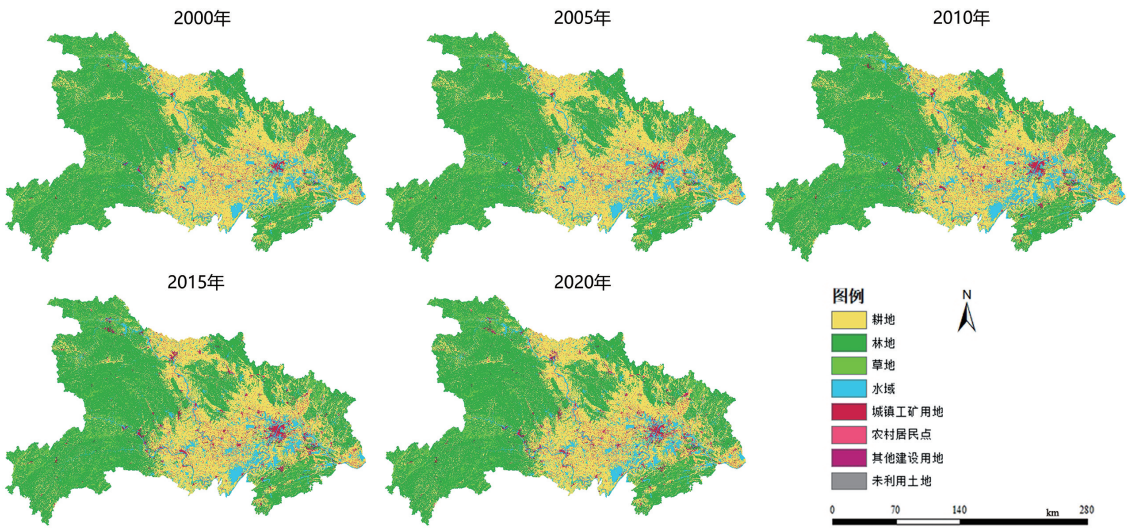


图 2　2000—2020 年湖北省土地利用布局

度下降，其他建设用地的扩张速度上升。该情景下土地利用变化速度较缓，可能由于土地流转的驱动力较小，依赖自然条件和气候变化，多为自然演替的过程，土地利用流转的市场机制受到较大的限制。

2）O2 情景。耕地面积下降，下降程度低于 O1 情景；林地有所增长，但增长幅度小于 O3 和 O4 情景；草地大幅下降，在 2020—2030 年最为突出，之后略有恢复；农村居民点面积减少，城镇建设用地和其他建设用地大幅增加，其原因是为了发展经济，大量农业用地转化为工业、商业、基础设施建设等用地。

3）O3 情景。耕地剧烈减少，转化为林地和草地；林地增加，尤其在边缘区域，如十堰和神农架；水域面积稳步增加；城镇建设用地扩张受限，未利用地开发减缓，面积高于其他情景。该

情景加大了对生态保护区，如水源、湿地、森林等的保护，农业用地特别是易受侵蚀的区域转变为生态保护用地，这种较强的作用力可能与政府出台更严格的环境保护政策和土地用途管制政策相关。

4）O4 情景。耕地适度减少，转为建设用地；林地和草地稳定增加，体现经济发展与生态保护的平衡；城镇建设用地与其他建设用地适度扩张，尤其在武汉都市圈。该情景下，土地流转注重可持续性，城市建设与生态保护并行。政府可能采取综合性土地利用政策，运用科技手段实现经济与生态的双赢。

总体而言，O1 情景下土地利用变化缓慢，呈现自然恢复趋势；O2 情景下，城镇建设用地快速扩张，耕地和草地大幅减少；O3 情景下，林地和草地增加，耕地和城镇用地受到限制；O4 情景在经济发展与生态保护之间找到平衡。研究结果与各情景的特点吻合，且延续了当前湖北省土地利用变化的趋势，耕地、未利用地面积减少，林地、其他建设用地和城镇用地面积增加。

表 5 不同情景下湖北省土地利用数量配置预测 km^2

地类	2030 年				2060 年			
	自然演变（O1）	经济效益优先（O2）	生态效益优先（O3）	两者兼具（O4）	自然演变（O1）	经济效益优先（O2）	生态效益优先（O3）	两者兼具（O4）
耕地	65 542	64 605	59 027	60 865	61 225	59 071	55 180	57 024
林地	91 761	92 763	98 509	96 072	91 360	94 137	98 958	96 446
草地	6 888	6 139	6 996	7 089	6 907	6 342	7 161	7 121
水域	12 133	11 476	12 543	11 830	12 475	11 533	13 428	12 270
城镇建设用地	2 143	3 117	1 723	2 918	2 401	4 354	2 461	3 411
农村居民点	3 944	3 205	3 875	3 416	3 997	2 861	3 923	3 551
其他建设用地	3 248	4 272	2 854	3 353	7 362	7 340	4 464	5 783
未利用地	341	323	373	355	273	262	325	293

3.3 不同情景下土地利用空间配置预测

通过 GeoSOS-FLUS 模型，结合湖北省 2020 年土地利用数据和驱动因素，对 2030 和 2060 年的土地利用类型进行空间模拟（图 3）。

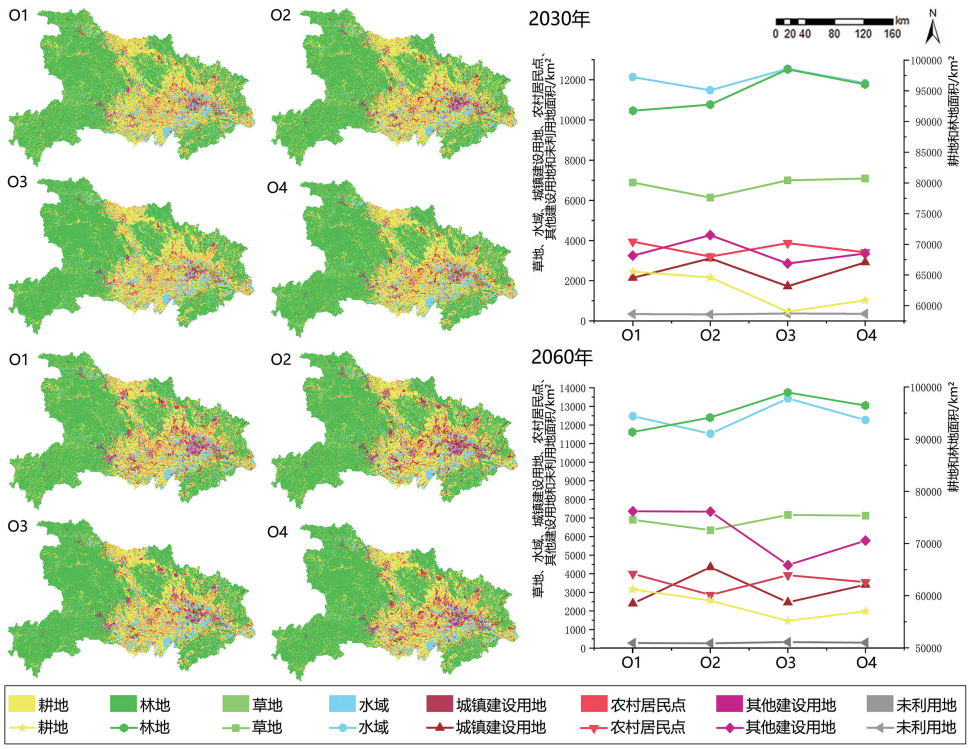


图 3 不同情景下湖北省 2030 与 2060 年土地空间格局

1）O1 情景。耕地逐步减少，集中在江汉平原和长江中游；林地面积稳定，西部山区和北部丘陵区自然恢复；建设用地扩展缓慢，集中在武汉都市圈。一些农业用地逐渐转为林地、草地等自然用地。农业用地的减少可能影响农产品的供应，进而影响地方经济，特别是对农业依赖较大的地区。

2）O2 情景。耕地大幅减少，转为建设用地，集中在武汉城市圈和长江沿线；林地略有减少，尤其在黄石和咸宁的丘陵区；草地大幅减少，主要是西北部。该情景下，建设用地持续增加导致具有较高固碳能力的草地和林地受到侵害，碳储量下降。同时，工业化的推进可能导致碳排放增加，影响湖北省甚至全国可持续发展目标的达成。

3）O3 情景。耕地大量转为林地和草地，特别在边缘区域；林地大幅增加，尤其神农架、恩施等地；水域得到保护，洪湖和梁子湖水域面积增加；城镇用地扩展受控，发展较为紧凑。这可能是由于政府采取严格的土地管制措施，减少城市用地的扩张，保护森林、湿地等重要生态系统。

4）O4 情景。耕地适度减少，主要在城市扩展区；林地有所扩展，尤其鄂东丘陵区；草地主要在高海拔地区；城镇建设用地适度扩展，集中在武汉都市圈。该情景下的土地优化方案有助于实现长期的可持续发展目标，即推动经济增长，也维护了生态系统的稳定。

3.4　两者兼具情境下的土地利用变化

与 O1、O2、O3 情景相比，O4 情景在碳排放与综合效益方面表现最佳，城市趋于集约发展，与 Wang 等[20]研究契合。此外，GeoSOS-FLUS 模型适用于不同尺度和类型的生态区域，能模拟未来土地利用变化，这已被广泛的研究验证[21]。

为进一步说明 O4 情景下土地利用变化，计算 2030 与 2060 年 O4 情景下 8 种地类的标准差椭圆和重心移动轨迹。结果（图 4）显示：从 2030 到 2060 年，湖北省耕地主要分布在中部，重心向东移动，可能与鄂东地区农业保护政策相关。林地集中在西部和北部山区，重心稳定略向西集中。草地分布扩展，重心向西北移动，反映退耕还草政策的效果。水域分布略有扩大，标准差椭圆呈东西拉伸，重心位于中南部并保持稳定。城镇建设用地分布呈东西扩展，重心在武汉都市圈并向东南移动，显示武汉都市圈的快速发展，Zhang 等[22]也持相同的观点。农村居民点范围稍微缩小，重心较稳定。其他建设用地重心向东南移动，预示鄂东工业带良好的发展潜力。未利用地标准差椭圆较小，重心向西北偏移。

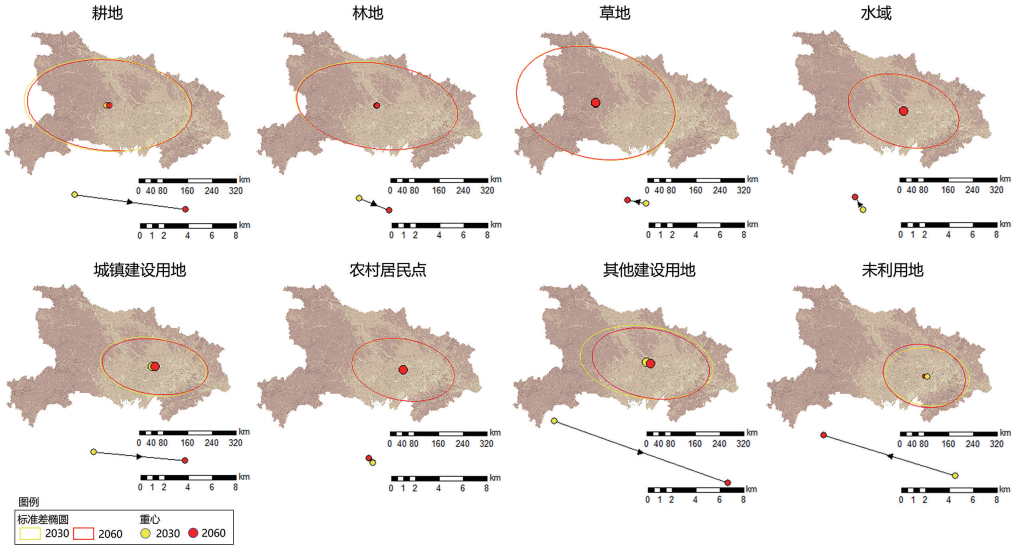


图 4　O4 情景下 2030—2060 年湖北省不同地类标准差椭圆和重心移动

4　讨论

4.1　土地利用与管理策略

1）优化土地利用结构，提高固碳能力。O2 情景下碳排放最低、碳储量最高，但经济效益较差；O3 情景经济效益最高，但碳储量最低；O4 情景平衡经济与生态效益，表现最佳。湖北省需继续推进生态保护政策，优化耕地、林地与草地

的转换。具体措施包括恢复湿地，退耕还草，实施生态修复工程[23]，将更多土地转换为高碳储的生态用地；发展农林复合系统，在农业生产中实现固碳。

2）适度开垦，保障经济发展。2000—2020 年，湖北省土地利用扩张趋缓，反映政府对生态保护的重视。在保障粮食安全的前提下，适度开垦，确保耕地和森林均衡增长，防止过度开发的同时不能以牺牲经济发展为代价[24]。具体包括通过推广现代农业技术来减少土地开垦需求，提高土地单产效益；鼓励农村土地流转，推动土地规模化经营等措施。

3）降低社会系统碳排放。湖北省碳排放在 2005 年后明显增加，若不干预，碳排放将持续上升，削弱生态系统对碳中和的贡献。因此，湖北省需引进先进技术，提升能源效率，推动清洁能源的开发以降低碳排。同时，政策制定者应量身定制经济补偿政策，如碳排放交易制度[25]，以限制人类活动的碳排强度并指导生态系统的保护。

4.2 局限性与展望

首先，研究采用生态系统服务价值当量因子来估算不同土地利用类型的生态效益系数，由于生态系统服务的复杂性和多样性，选择的因子可能带有较强的主观性。同时，生态系统的服务价值是动态变化的，若估算的时间跨度过长，可能导致计算不准确。其次，研究采用了固定增量和稳定转化规则等理想化假设，而现实的土地利用变化更为复杂，具有随机性。GeoSOS-FLUS 模型的参数大多基于专家经验或历史数据，带有主观性[26]。尽管已考虑社会因素，但政策干预和市场波动等对土地的影响难以精确量化。未来研究可引入气候变化和经济预测模块，提高碳系数的准确性。最后，尽管灰色预测模型能对短期趋势进行较准确的预测，但随着预测时长增加，模型误差也会增大。尤其当系统发生突变或外部环境显著变化时，难以维持准确的预测。同样，虽然 GeoSOS-FLUS 模型精度高，但其最合适于 5～10 年的模拟。本文较长的时间可能忽略细节变化，较低的空间分辨率可能掩盖局部热点问题[27]。未来可尝试在模型中加入多尺度分析，结合宏观与微观需求，提升精度。

5 结论

1）湖北省 2000—2020 年土地利用变化特征。湖北省土地利用以耕地和林地为主。2000—2020 年，建设用地显著增加，耕地、林地及草地面积减少，尤其耕地最为明显。随着中部崛起战略的实施，经济发展提速，城市化进程加快，基础设施建设推动了土地利用转变。

2）湖北省土地利用结构优化。O4 两者兼具情景下，经济效益得到保障，生态效益也有所巩固，更满足可持续发展的需求。

3）湖北省土地利用布局优化。O4 两者兼具情景下，2060 年，农村居民点进一步减少，人口趋向集中。通过合理的布局优化，湖北省有可能保持现有的建设用地，为未来发展留下充足的土地储备，同时保障林地的稳定性，实现经济与生态效益的平衡。

参考文献

[1]蔡博峰,朱松丽,于胜民,等.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J].环境工程,2019,37(8):1-11.

[2]张勇,张乐勤,汪应宏,等.安徽省池州市土地利用碳排放演变及其影响因素[J].中国农业大学学报,2014,19(2):216-223.

[3]唐娇华,李智琦,潘勇军.广州市土地利用变化与碳储量模拟:基于 PLUS-InVEST 模型分析[J].中国城市林业,2024,22(4):61-68.

[4]张苗,吴萌.土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析:基于结构方程模型的实证检验[J].中国土地科学,2022,36(3):96-103.

[5]游和远,吴次芳.土地利用的碳排放效率及其低碳优化:基于能源消耗的视角[J].自然资源学报,2010,25(11):1875-1886.

[6]耿红,王泽民.基于灰色线性规划的土地利用结构优化研究[J].武汉测绘科技大学学报,2000,25(2):167-171,182.

[7]刘海猛,石培基,王录仓,等.低碳目标导向的兰州市土地利用结构优化研究[J].中国土地科学,2012,26(6):55-61.

[8]曹帅,金晓斌,杨绪红,等.耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J].自然资源学报,2019,34(6):1171-1185.

[9]郑荣宝,董玉祥,陈梅英.基于 GECM 与 CA+ANN 模型的土地资源优化配置与模拟[J].自然资源学报,2012,27(3):497-509.

[10]许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J].生态学报,2016,36(17):5401-5410.

[11]林沛锋,郑荣宝,洪晓,等.基于 FLUS 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究:以广州市花都区为例[J].国土与自然资源研究,2019(2):7-13.

[12]梁扬.基于耦合 MOP-FLUS 模型的县域土地利用结构与布局优化研究:以江西省芦溪县为例[D].南昌:江西财经大学,2023.

[13]彭柄午.湖北省土地利用转型时空演变特征、驱动机制及趋势预测研究[D].武汉:中南财经政法大学,2023.

[14]夏思盈,李静芝,郑玉佳."双碳"目标下的湘西州土地利用碳排放变化及预测研究[J/OL].自然资源遥感,2025:1-17.(2025-03-24).https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GTYG202503200001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[15]赵寿露,李石华,许新惠,等.耦合 MOP-FLUS 模型的滇中城市群"三生"空间格局优化[J].水土保持研究,2022,29(4):322-328.

[16]LIU M X,DONG X B,WANG X C,et al.Evaluating the future terrestrial ecosystem contributions to carbon neutrality in Qinghai-Tibet Plateau[J].Journal of Cleaner Production,2022,374:133914.

[17]谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.

[18]YANG Y L,WANG H,LI X B,et al.How will ecosystem carbon sequestration contribute to the reduction of regional carbon emissions in the future? analysis based on the MOP-PLUS model framework[J].Ecological Indicators,2023,156:111156.

[19]姜展鹏,包安明,李艳红.基于 GeoSOS-FLUS 模型的乌鲁木齐主城区扩张情景模拟分析[J].遥感技术与应用,2023,38(2):332-340.

[20]WANG Y,FENG Y N,ZUO J,et al.From "Traditional" to "Low carbon" urban land use:Evaluation and obstacle analysis[J].Sustainable Cities and Society,2019,51:101722.

[21]ZHANG D,WANG X R,QU L P,et al.Land use/cover predictions incorporating ecological security for the Yangtze River Delta region,China[J].Ecological Indicators,2020,119:106841.

[22]ZHANG Y,LIU Y F,WANG Y H,et al.Urban expansion simulation towards low-carbon development:a case study of Wuhan,China[J].Sustainable Cities and Society,2020,63:102455.

[23]姚龙杰,岳邦瑞,潘卫涛,等.县域碳储量时空演变与多情景模拟:基于 FLUS 和 InVEST 模型[J].中国城市林业,2023,21(5):152-158.

[24]LI L,HUANG X J,YANG H.Optimizing land use patterns to improve the contribution of land use planning to carbon neutrality target[J].Land Use Policy,2023,135:106959.

[25]ZHU D,NIU Q,WANG Y H,et al.The influence of psychological cognition and policy environment on the basin residents' behavior of ecological compensation under the background of carbon neutrality:a case study in upper Yellow River Basin,China[J].Ecological Indicators,2023,148:110031.

[26]俞钦平.总量控制下的桂林市建设用地指标分配策略研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2022.

[27]杨鹏辉,田佳,张楠,等.1990—2022 年黄河流域植被时空变化特征及未来趋势预测[J].生态学报,2024,44(19):8542-8553.