DOI:10.19789/j.1004-9398.2025.04.003
文献引用:尹懿行,高培超,张疏雨,等.耦合GeoSOS模型和蚁群算法的泰安市土地利用演化模拟及空间优化[J].首都师范大学学报(自然科学版),2025,46(4):22-31. YIN Y X, GAO P C, ZHANG S Y, et al. Simulation of land use evolution and spatial optimization in Tai'an City coupled with the GeoSOS model and ant colony algorithm[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2025,46(4):22-31.

耦合GeoSOS模型和蚁群算法的泰安市土地利用演化模拟及空间优化*

尹懿行[1,2],高培超[1],张疏雨[2],李慧贤[2],董永清[3],宋长青[1**]

(1.北京师范大学地理科学学部,北京 100875;2.北京师大国土空间规划与设计研究院,北京 100875;3.北京图上城信息技术有限公司,北京 100029)

摘要:国土空间规划在协调生态保护与经济发展中发挥着至关重要的作用,其关键在于准确模拟土地利用变化并优化空间布局。本研究以泰安市为例,耦合GeoSOS模型与蚁群算法,通过设置建设用地规模惯性扩张、限制扩张以及建设用地规模与农业生态空间形态双重限制3种情景,模拟了2035年土地利用变化及其空间优化格局。采用景观分割度、分裂指数和有效网格大小等指标,定量评估了各情景下土地利用模式的破碎化程度与空间优化效果。结果表明,双重限制情景下建设用地扩展规模得到合理控制,空间形态更加紧凑,用地集约度与生态保护效率显著提升。研究成果为泰安市的国土空间格局优化提供了科学依据,同时为类似城市制定生态友好型和集约高效的国土空间规划策略提供了技术支持。

关键词:GeoSOS;土地利用变化模拟;空间优化;耦合模拟
中图分类号:K901.2 **文献标志码**:A

Simulation of land use evolution and spatial optimization in Tai'an City coupled with the GeoSOS model and ant colony algorithm*

YIN Yixing[1,2], GAO Peichao[1], ZHANG Shuyu[2], LI Huixian[2], DONG Yongqing[3], SONG Changqing[1**]

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Planning and Design Institute, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. Beijing Tushangcheng Information Technology Co., Ltd., Beijing 100029)

Abstract: Territorial spatial planning plays a pivotal role in balancing ecological conservation and economic development, with its core lying in accurately simulating land-use changes and optimizing spatial layouts. This study, using Tai'an City as a case, coupled the GeoSOS model with the ant colony optimization (ACO) algorithm to simulate land-use changes and spatial optimization patterns for 2035 under three scenarios: inertial expansion of construction land, restriction of construction land, and dual

收稿日期:2024-05-31
*国家自然科学基金重点项目(42230106)
**通信作者:songcq@bnu.edu.cn

restrictions on construction land scale and spatial morphology. Indicators such as landscape division index, splitting index, and effective mesh size were employed to quantitatively evaluate the fragmentation and spatial optimization performance of land-use patterns under each scenario. The results demonstrate that the dual restriction scenario effectively controls the expansion scale of construction land, resulting in more compact spatial patterns, improved land-use and ecological conservation efficiency. The findings provide a scientific basis for optimizing the territorial spatial structure of Tai'an City and offer technical support for similar cities in developing eco-friendly and resource-efficient territorial spatial planning strategies.

Keywords:GeoSOS;land use change simulation;spatial optimization;coupled simulation

CLC:K901.2 **DC**:A

0 引 言

随着科技社会的快速发展,我国城市规模也在日益扩大[1]。我国国土空间规划与可持续发展之间不平衡、不充分的矛盾在国土空间开发和保护的进程中也格外突出[2]。国土空间规划的核心是通过优化有限土地资源的空间布局,协调城市发展与生态保护,实现生态文明建设和高质量发展的双重目标。土地利用优化配置作为重要技术手段,不仅是解决土地供需矛盾的关键,也对社会经济与生态保护的协调发展至关重要。

随着空间模拟与智能优化技术的快速发展,土地利用演化模拟及优化的理论与方法体系不断革新。一方面,可持续发展、生态文明建设与空间均衡发展等理论逐步深化,为土地利用优化提供了多尺度、多目标规划的新视角和指导[3-4];另一方面,技术进步显著推动了方法体系的发展,元胞自动机模型以简洁的局部规则有效模拟了土地利用的动态变化,成为空间优化的重要工具[5]。多智能体系统的引入进一步丰富了模拟维度,考虑了人文因素与决策行为的复杂影响。此外,遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等仿生智能技术在解决高维、非线性及多解集优化问题上表现优异[6-8]。这些技术在实践中取得了显著成效,并对优化国土空间格局产生重要影响[7-10]。

尽管土地利用优化模型在空间模拟和智能优化技术方面取得进展,但仍存在不足。首先,对自然与人文过程耦合驱动机制的理解不够系统,模型难以全面捕捉其复杂交互;其次,多模型嵌套的综合优化方法在动态环境和多目标优化中的适应性和效率仍显不足;最后,过于依赖固定参数设置,缺乏领域知识的深度整合,使模型在复杂实际场景中的表现受限。

泰安市是山东省的重要城市,其土地利用演化模拟及空间优化具有代表性和示范性。本文结合泰安市实际,综合考虑自然与人文因素,通过GeoSOS模型与蚁群算法的耦合方法,以及情景模拟与智能优化,提升了土地利用变化的模拟精度和空间优化能力。研究结果提高了泰安市土地利用效率与生态环境质量,并为类似城市的可持续规划提供科学依据。

1 研究区概况

泰安市是中国东部重要的文化、经济和交通枢纽,2020年人口约540万,GDP约4 600亿元,主要产业包括机械制造、电子信息、纺织服装和食品加工。交通基础设施完善,京沪高速铁路和京台高速公路贯穿全市,提升了经济便捷性和物流效率。市政府注重耕地和生态用地保护,严格控制建设用地规模,优化土地利用结构,近年来通过土地整治和生态修复提升了土地利用效率和生态环境质量。

本文研究对象为泰安市的泰山区和岱岳区,位于泰山南麓,地理坐标为116°50′~117°29′E,35°52′~36°28′N。总面积1 477.86 km²,地势由东北向西南倾斜,地形多样,涵盖山地丘陵、平原和洼地。研究区为泰安市的核心区域,土地利用压力大,数据完整且精度高,适合进行精细的空间模拟和优化研究。研究区涵盖了城市建设用地和生态用地等多种类型,有助于确保模拟结果的可靠性和精确性,为泰安市未来的国土空间优化提供科学依据。

2 数据制备

2.1 数据来源与处理

本研究所用数据主要包括土地利用数据、地形数据、交通数据、夜间灯光数据和兴趣点(point of interest,POI)数据等,来源于国家地理信息资源目录、中国科学院、美国国家海洋和大气管理局等机构。为了保证GeoSOS模型的正常运行,所有数据需保证坐标参考(WGS_1984_UTM_Zone_50N)、四至范围(116°20′~117°59′E,35°38′~36°28′N)、空间分辨率(100 m)等信息一致。

土地利用数据采用GlobeLand30数据集,是全球首套30 m分辨率地表覆盖数据集,分类精度高[11]。本文选用2000、2010和2020年3个时相的数据,涵盖耕地、林地和草地等10类土地利用类型,并将其重采样至100 m分辨率,以市辖区范围为边界进行剪裁[11]。地形数据采用GDEMV3 30 m数据集,通过重采样、焦点统计和坡度工具处理数字高程模型(digital elevation model,DEM),提取地形起伏度和坡度并归一化[12]。交通数据来源于国家地理信息资源目录1∶100万基础地理数据集,提取公路和铁路干线距离并归一化。夜间灯光数据使用DMSP-OLS夜间灯光数据集,并进行直方图均衡化和归一化处理[13]。POI数据来自高德、百度和天地图,通过去重合并生成核密度数据,并提取POI欧式距离后归一化[14]。

2.2 影响因子选择及其依据

土地利用变化的驱动力是多方面的,因此制备影响因子时需全面考虑并尽量减少关联性[15]。本文从地形、交通、人类活动和发展惯性4个维度,选取了9个影响因子。地形因素(如DEM、地形起伏度和坡度)直接影响土地的可利用性和开发难度,平坦地区更易开发为建设用地,而坡度较大的地区则可能更多地保留为自然景观。交通网络对土地利用变化有显著影响(如距公路干线距离和距铁路干线距离),交通便捷的区域通常更易吸引商业和住宅开发,加速城市化进程。人类活动强度(如POI核密度、POI欧式距离和夜间灯光)是土地利用变化的重要指标,高密度的POI和强烈的夜间灯光通常意味着该区域有人口集中和经济活动频繁,土地利用变化更为显著。发展惯性表示过去土地利用变化趋势的因子,通过分析发展惯性,可以更好地预测未来土地利用变化的趋势,确保模型预测的合理性和准确性。综上所述,从地形、交通、人类活动和发展惯性4个维度选取的影响因子,不仅覆盖了影响土地利用变化的主要驱动力,而且因子之间关联性较弱,能有效避免多重共线性问题,提高模型的精度和有效性。这为后续的土地利用变化模拟与优化提供了坚实的基础。将9个影响因子的数据分别进行标准化,结果如图1所示(边界审图号为GS(2024)0650)。本文在影响因子选择中,有意剔除一些与泰安市的地形以及人类活动特征较强关联,且对土地利用变化的影响较小的因子,如气温、降水、人口密度和人均GDP等。

3 研究方法

3.1 基于蚁群算法的空间格局优化

土地利用空间格局优化常用的生物群智能算法包括粒子群、蚁群、人工蜂群和人工鱼群优化算法,其中蚁群算法应用最广。由Dorigo等[16]在1996年提出。该算法通过模拟智能个体的协作行为[17]。结合自适应与群体反馈机制,在土地利用优化中表现出正反馈性、并行性和可扩展性[18-19]。蚁群算法以快速收敛和高效求解适用于大范围土地优化问题,显著提高了求解效率,在复杂情境中具有重要作用[20]。

根据用地用海分类指南[21],建设空间包括城镇住宅、公共管理、工矿仓储和交通运输等用地类型;生态空间涵盖林地、草地、湿地和水域;农业空间包括耕地、园地和牧草地。本文将GlobeLand30数据中的人造地表划为建设空间,林地、草地、湿地和水体划为生态空间,耕地划为农业空间,并使用蚁群算法优化建设用地空间格局。

蚁群算法需引入效用函数(U_{goal})依据其值确定是否划定为建设用地。U_{goal}由建设用地适宜性和图斑紧凑性2部分组成,以使二者达到最优。其计算公式为[16]

$$U_{goal} = W_e R + W_c I_P,$$

式中:U_{goal}是效用;R是建设用地适宜性;I_P是建设用地空间布局的紧凑性指数;W_e和W_c是总建设用地适宜性和紧凑性的权重,根据经验,文中W_e=0.9,W_c=0.1。

本文为各土地利用类型赋予建设用地适宜系数,负值表示不适宜,正值表示适宜。通过加和栅格中适宜系数与对应布尔值的乘积[16],计算建设用

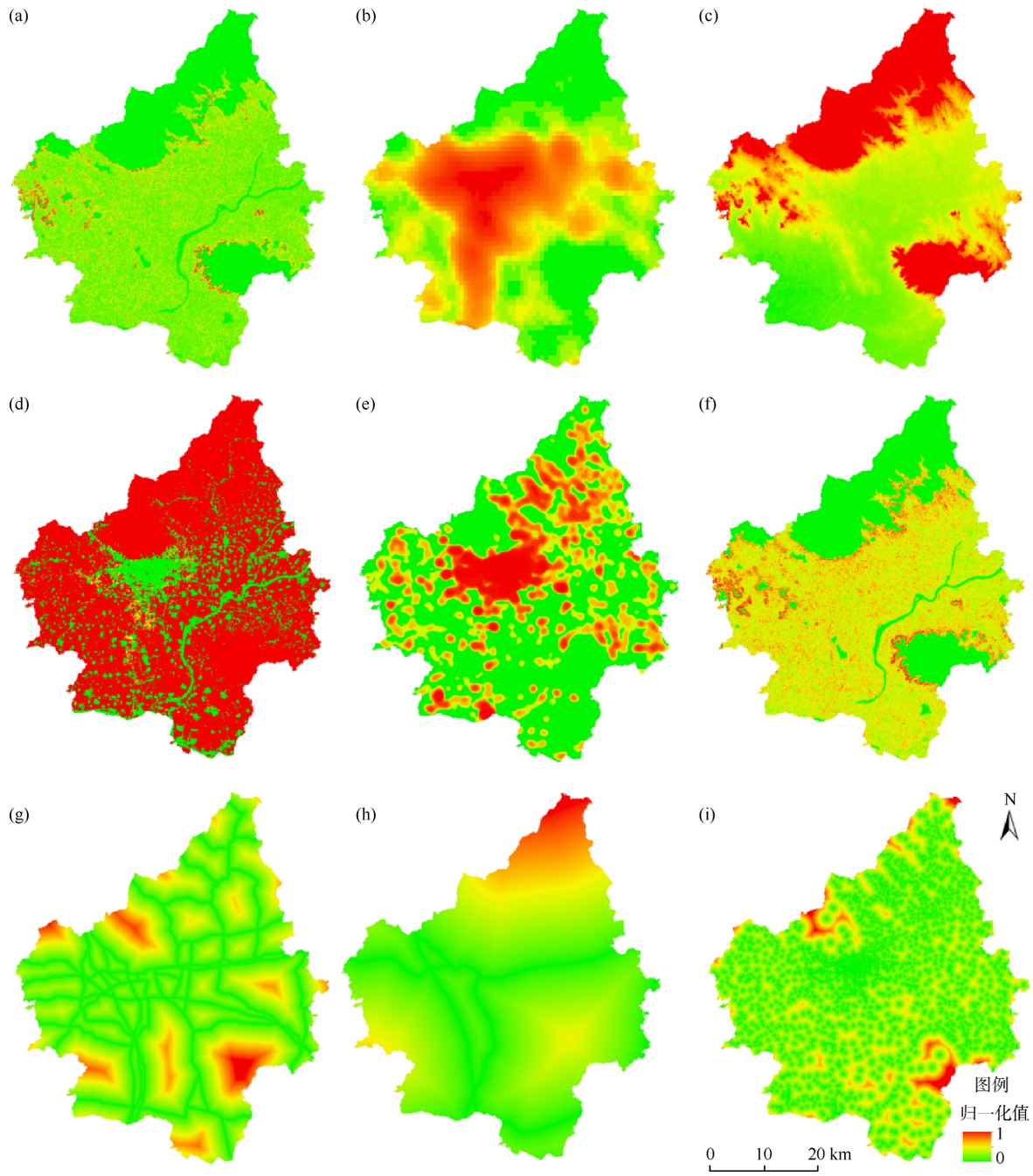


图1　影响因子

(a)坡度;(b)夜间灯光;(c)数字高程模型(DEM);(d)发展惯性;(e)兴趣点(POI)核密度;(f)地形起伏度;(g)公路距离;(h)铁路距离;(i)POI距离

地适宜性,公式为

$$R = \sum_{i=1}^{n} C_i F_i,$$

式中:C_i建设用地适宜系数;F_i建设用地类型布尔值。本文设置水体、林地、草地、耕地、建设用地的系数分-4.0、-2.5、-2.0、-1.5、100.0。公式为[16]

$$R = -4.0W - 2.5F - 2.0G - 1.5T + 100.0U,$$

式中:W表示该栅格是否为水体;F表示该栅格是否为林地;G表示该栅格是否为草地;T表示该栅格是否为耕地;U表示该栅格是否为建设用地。其中均以0表示“否”,1表示“是”。

式(1)中的建设用地空间布局紧凑性指数,旨在避免布局碎片化。该指数根据选定单元格的总面积及周长计算,定义为[16]

$$I_{\mathrm{P}}=\frac{\sqrt{A_{\mathrm{Z}}}}{L},$$

式中:A_Z为建设用地的总面积;L为建设用地的周长。

3.2 基于不同情景的土地利用变化模拟

3.2.1 发展情景设置

本文使用GeoSOS的逻辑回归元胞自动机模型[18]对研究区域土地利用演化进行模拟,设定了建设用地规模惯性扩张、限制扩张及建设用地规模与农业生态空间形态双重限制(规模-空间双重限制)限制3种发展情景。

(1)建设用地规模惯性扩张情景。泰安市在2010—2020年间经历了显著的城市扩张,建设用地迅速增加。惯性扩张情景假设城市建设用地在较少政策干预下,按照历史增长率继续扩展,反映城市化进程的延续。该情景假设2020—2035年建设用地扩张速率与2010—2020年相同,转移矩阵设置为:耕地、林地、草地可转为城市用地;水体不可转为城市用地;建设用地保持不变。

(2)建设用地规模限制扩张情景。随着泰安市经济发展和环境保护意识提升,政府加强了建设用地控制,实施多项政策限制城市无序扩张。建设用地规模限制情景假设政府严格控制建设用地规模,反映当前政府在城市扩张控制方面的政策措施。建设用地规模限制情景考虑国土空间规划对新增建设用地的控制,采用约束性数量为指标。具体而言,2035年城镇建设用地扩展量限定为2020年的1.3倍。

(3)建设-空间双重限制情景。近年来,泰安市在城市规划中注重土地利用集约化和空间布局优化。建设用地规模-空间双重限制情景假设严格控制建设用地规模并优化布局,旨在提高土地利用效率、减少生态破坏,反映泰安市在城市更新和空间优化方面的政策导向。

2035年建设用地规模遵循国土空间规划控制要求,在优先保护耕地、永久基本农田和生态保护红线的前提下,限制城镇开发边界为2020年现状建设用地的1.3倍。基于这一限定,本研究在建设用地空间形态限制下进行土地利用变化模拟。具体操作中,使用蚁群算法优化2000、2010、2020年的建设用地空间形态,并将优化图层与对应年份的土地利用图层融合,设置转移矩阵:优化图层为非建设用地的部分不可转为城市用地,为建设用地的部分可转为城市用地;水体不可转为城市用地;建设用地保持不变。

3.2.2 模型置信度评估方法

本文采用Kappa(κ)系数法对模型的置信度进行评估,通过对比观测地图和模拟地图中每个栅格的匹配情况,量化不同条件下的土地利用类型一致性。κ系数法分为标准、随机、位置和数量κ系数4种类型,以便全面评估模型的数量和空间位置精度。以下是各κ系数的计算方法及参数说明。

(1)标准系数($\kappa_{\text{标准}}$)。$\kappa_{\text{标准}}$用于评估观测地图和模拟地图在土地利用类型上的一致性,既考虑数量一致性,也考虑空间位置一致性。其计算公式为[22]

$$\kappa_{\text{标准}}=\frac{P_{\mathrm{O}}-\sum_{j=1}^{J}\left(S_j\times R_j\right)}{1-\sum_{j=1}^{J}\left(S_j\times R_j\right)},$$

式中:P_{O}为观测地图和模拟地图中相同土地利用类型栅格的比例,即两地图完全一致的栅格数占总栅格数的比值;S_j为模拟地图中土地利用类型j的栅格比例,即类型j栅格数占模拟地图的比值;R_j为观测地图中土地利用类型j的栅格比例,即类型j栅格数占观测地图的比值;J为土地利用类型的总数,假设每种类型在栅格上的分布是完全随机的。

(2)随机系数($\kappa_{\text{随机}}$)。$\kappa_{\text{随机}}$用于评估在完全随机条件下(即无数量和位置保持能力)地图的相似性。其计算公式为[22]

$$\kappa_{\text{随机}}=\frac{P_{\mathrm{O}}-\frac{1}{J}}{1-\frac{1}{J}},$$

式中:$\frac{1}{J}$表示在完全随机条件下,每种土地利用类型的预期一致性,即各类型在地图上平均分布的概率。

(3)位置系数($\kappa_{\text{位置}}$)。$\kappa_{\text{位置}}$用于评估地图在空间布局上的一致性,衡量两地图在土地利用类型空间位置上的匹配程度。其计算公式为[22]

$$\kappa_{\text{位置}}=\frac{P_{\mathrm{O}}-\sum_{j=1}^{J}\left(S_j\times R_j\right)}{\sum_{j=1}^{J}\min\left(S_j,R_j\right)-\sum_{j=1}^{J}\left(S_j\times R_j\right)},$$

式中:$\sum_{j=1}^{J}\min\left(S_j,R_j\right)$为观测地图和模拟地图中每种土地利用类型栅格数的最小值之和,表示在具有空间位置保持和数量一致性约束的情况下的期望一致性。

(4)数量系数($\kappa_{\text{数量}}$)。$\kappa_{\text{数量}}$用于评估地图在数量

上的一致性,忽略空间位置,仅关注两地图中各土地利用类型栅格数的匹配程度。其计算公式为[22]

$$\kappa_{数量}=\frac{P_o-\sum_{j=1}^{J}\min\left(S_j,R_j\right)}{\sum_{j=1}^{J}R_j-\sum_{j=1}^{J}\min\left(S_j,R_j\right)},$$

通过计算以上4类κ系数,本文从数量、位置及其综合角度对模型的模拟效果进行了多维度评估。κ系数为土地利用变化模拟和空间规划决策提供了可靠的科学依据。

3.3　评估方法

破碎化程度是衡量建设空间形态紧凑性、布局合理性和用地集约性的关键指标。为量化建设空间的破碎化并验证模拟与优化效果,采用Jaeger等[23]提出的景观分割指数、分裂指数和有效网格大小。这些指数有效评估建设空间破碎化及其对景观连通性和空间格局变化的影响[24-27]。

(1)景观分割指数用于评估景观的破碎化程度[23]。其计算公式为

$$D=1-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{a_i}{A}\right)^2,$$

式中:D是景观分割度;n是景观中未分割区域的数量;a_i是第i个未分割区域的面积;A是整个景观的总面积。该指数反映景观中随机选择的2个点不在同一未分割区域的概率。数值越大,景观越破碎。

(2)分裂指数(I_S)用于量化景观分裂程度[23]。其计算公式为

$$I_S=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{a_i}{A}\right)^2},$$

该指数表示将整个区域分割成相等大小的部分,这些部分的数量与景观分割度相等。数值越大,表示景观分裂越严重。

(3)有效网格大小(m)用于评估景观的连通性[23,26]。其计算公式为

$$m=A\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{a_i}{A}\right)^2,$$

该指数表示将整个区域分割成与景观分割度相等大小后,这些部分的平均大小。数值越大,表示景观连通性越好。

4　研究结果

4.1　国土空间格局优化结果

本文利用蚁群智能优化对泰安市建设用地的空间形态进行了优化(图2)。通过模拟蚁群在多目标优化问题中的路径选择,使得城市建设空间形态紧凑、布局合理、用地集约,同时也避免了生态保护和农业空间被不合理侵占与破碎化,实现了综合优化。

(1)优化前后建设用地规模与空间布局变化。在优化前,泰安市的建设用地主要分布在市中心及其周边区域,占地面积约为395.29 km^2;优化后,建设用地的总面积增加到了513.88 km^2,扩展了118.59 km^2。优化后的建设用地分布更加均匀,减少了中心城区的用地压力,增加了郊区的开发强度。

(2)建设空间的优化效果评估。经过计算,研究区域建设用地空间的景观分割度、分裂指数、有效网格大小优化前后的具体数值对比如表1所示。

经数据对比看出,通过蚁群算法优化后,研究区域建设空间的景观分割度、分裂指数由优化前的

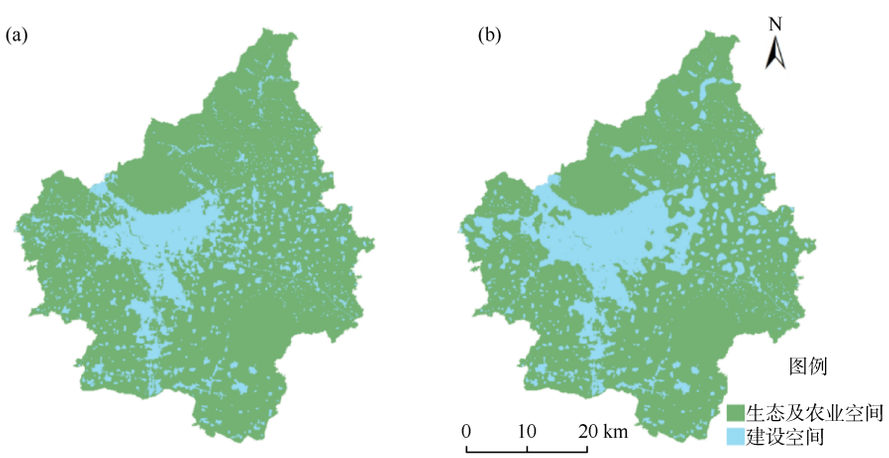


图2　研究区域空间格局优化前后对比

(a)优化前;(b)优化后

表1 优化前后建设空间破碎度对比

建设空间	景观分割度	分裂指数	有效网格大小/10^{-3} km^2
优化前	0.771 3	4.373 4	8.85
优化后	0.598 4	2.489 8	207.89
变化	−0.1730	−1.8836	119.35

0.771 3、4.373 4减小为0.598 4、2.489 8,有效网格大小由优化前8.85×10^3 km^{2}增加到2.08×10^5 km^2。对比分析表明,优化后建设空间形态上更完整、连续性更高、破碎度更小;更有利于集约高效发展。

4.2 土地利用变化模拟模型置信度评估结果

本研究中,在建设用地规模惯性扩张情景与限制扩张情景使用相同数据训练模型,未加入蚁群算法的空间优化数据;规模-空间双重限制情景则融合了蚁群算法的优化数据。因此,规模惯性扩张和限制扩张情景的模型置信度评估结果相同,而双重限制情景的结果有所不同。

建设用地规模惯性扩张和限制扩张情景下的模拟结果一致,$\kappa_{标准}$、$\kappa_{随机}$、$\kappa_{位置}$、$\kappa_{数量}$分别达到0.815、0.880、0.833、0.980,评估显示置信程度较高,表明本模型可以较准确模拟研究区域土地利用变化过程,并对未来土地利用变化进行预测研究。

规模-空间双重限制情景下的模拟结果$\kappa_{标准}$、$\kappa_{随机}$、$\kappa_{位置}$、$\kappa_{数量}$分别达到0.835、0.889、0.852、0.976,评估结果显示,模型具有较高的置信水平。在加入空间限制后,模型更准确地模拟了研究区域土地利用的变化趋势,尤其是在建设用地的增长图斑方面,集中于合理的位置,提升了模型对未来土地利用变化的预测能力。

4.3 评估结果

利用GeoSOS模型模拟了在建设用地规模惯性扩张和限制扩张情景下,耦合GeoSOS模型和蚁群算法模拟在建设用地规模-空间双重限制情景下,泰安市2035年土地利用变化,展示了建设用地扩展的规模、空间分布及其对生态和农业空间的占用影响(图3)。

(1)建设用地规模惯性扩张情景。图3(a)展示了建设用地扩展的总体格局,图3(d)反映了扩展对生态和农业空间的具体占用情况。结果表明,在该情景下,建设用地扩展量显著,生态与农业空间的占用过多,不符合“底线优先”和“集约适度”的城镇发展原则。

在建设用地规模惯性扩张情景下,侵占的生态与农业空间面积为136.89 km^2,这明显高于其他情景,结果见表2。同时,该情景下的景观分割度为0.675 4,分裂指数为3.081 0,有效网格大小为1.95×10^5 km^2。这表明该情景下建设空间的破碎度较高,不利于土地集约利用和生态保护,结果见表3。

(2)建设用地规模限制扩张情景。图3(b)显示扩展总体格局,图3(e)反映对生态和农业空间的具体占用。结果表明,该情景下建设用地扩展量虽较少,但多发生于农业和生态空间,增加了国土空间格局的破碎度,不符合“底线优先”的发展要求。

在建设用地规模限制扩张情景下,侵占的生态与农业空间面积为70.55 km^2,相比于惯性扩张情景有所减少,结果见表2。但该情景下的景观分割度为0.675 7,分裂指数为3.083 7,有效网格大小为1.64×10^5 km^2。表明建设用地扩展虽得到了一定控制,但其破碎度依然较高,建设用地形态较为分散,结果见表3。

(3)规模-空间双重限制情景。图3(c)显示国土空间格局,图3(f)反映扩展对生态和农业空间的占用情况。结果表明,该情景合理控制了建设用地扩展规模,新建用地布局保持生态和农业空间的完整性与连续性,空间破碎度较低;建设空间更加集约高效,生态与农业空间实现集中连片保护。

在建设用地规模-空间双重限制情景下(表2),侵占的生态与农业空间面积仅为53.21 km^2,为3个情景中最少的。该情景下的景观分割度为0.585 1,分裂指数为2.410 4,有效网格大小为2.10×10^5 km^2。这表明该情景下建设用地空间形态最为紧凑,破碎度最低,有利于土地集约利用和生态保护。

从模拟预测结果中可以看出,若放任惯性发展,会出现建设用地规模过大,侵占生态与农业空

表2 建设用地规模在3种情境下侵占生态与农业空间面积及建设空间破碎度对比

建设用地规模3种情境	建设用地面积/km^2	建设用地扩展面积/km^2	侵占的生态与农业空间面积/km^2	景观分割度	分裂指数	有效网格大小/10^5km^2
惯性扩张	607.60	213.21	136.89	0.675 4	3.081 0	1.95
限制扩张	513.88	118.59	70.55	0.675 7	3.083 7	1.64
规模-空间双重限制	513.88	118.59	53.21	0.585 1	2.410 4	2.10

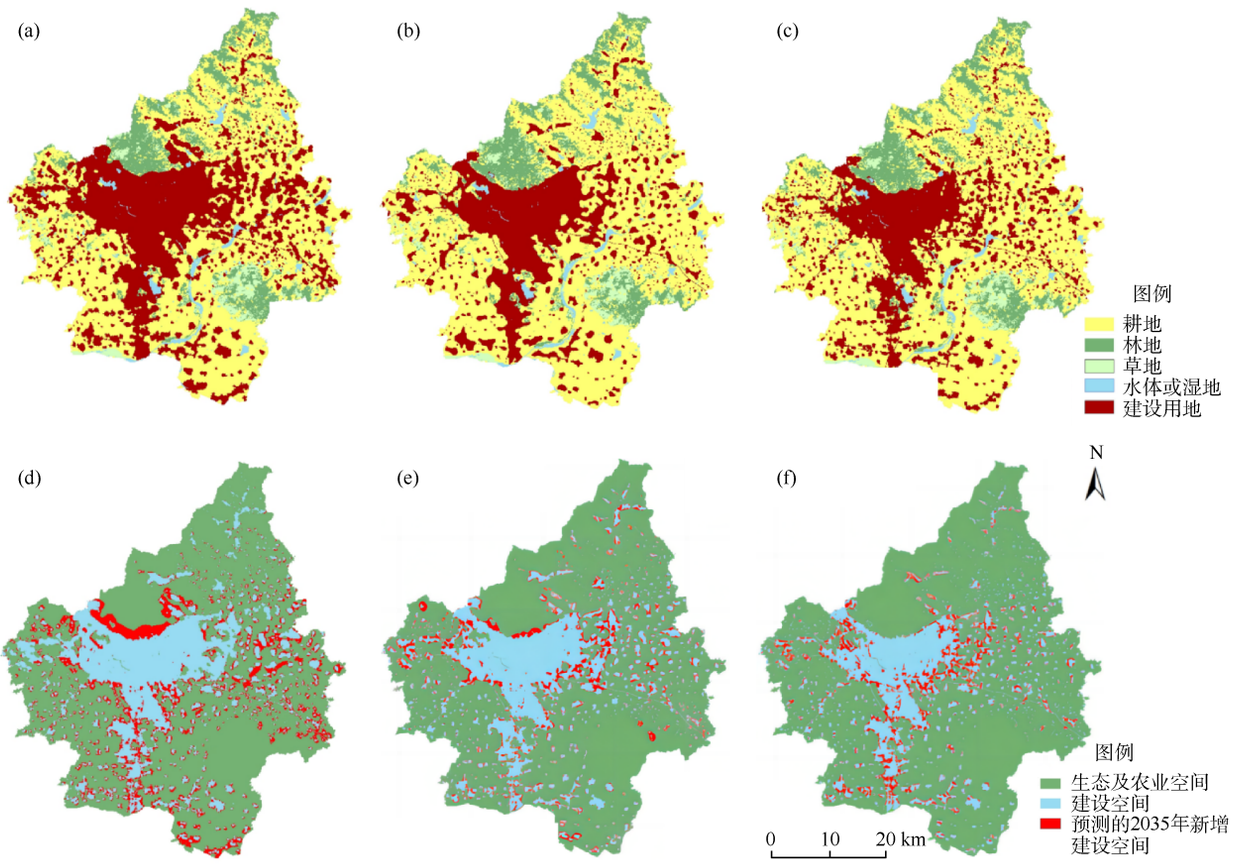


图3　在3种不同情景下城市扩张的模拟结果及生态与农业空间的占用情况

(a)~(f)分别为建设用地惯性扩张、限制扩张及规模-空间双重限制情景的模拟结果和生态与农业空间的占用情况

间,国土空间格局不集约,生态遭到破坏,良田遭到侵占。若只限制建设用地规模不优化空间格局,会出现空间格局不紧凑,土地利用不够集约,不利于管理,生态空间与耕地遭到侵占等现象。在同时考虑规模-空间双重限制下,对模拟与优化进行耦合可以得到建设规模适宜、建设用地空间形态紧凑、布局合理、用地集约,农业与生态空间保护良好的最优方案。方案保护了泰安市北侧山地丘陵生态特色产业带耕地,实现连片化耕作;保持泰沂山脉生态廊道的完整性;严格保护泰山文化遗产带的生态环境。同时,集中连片的建设用地向东部新城、南部高新区和西部岱岳经济开发区拓展。

5　讨　论

本研究通过综合纳入地形、交通、人类活动和发展惯性等多维度影响因子,保证土地利用变化模拟的高精度。这种策略使模型能够更全面地捕捉土地利用变化的复杂驱动机制,并在不同发展情景下表现出良好的适应性,验证了刘耀林等[6]提出的多因子耦合有助于提升模型表现的观点。

在技术层面上,本文通过将GeoSOS模型与蚁群算法进行深度耦合,展现了在土地利用优化模拟中的卓越表现。蚁群算法以其基于信息素的自组织机制,成功实现了快速收敛至全局最优解。Liu等[19]在理论上验证了蚁群算法的有效性,本文通过实际应用,进一步证明了这一耦合模型在处理复杂、多样化土地利用场景时的高效性,尤其是在多目标优化情景下的应用价值。同时,GeoSOS模型在处理复杂空间动态变化时表现出色,与蚁群算法的耦合进一步增强了其稳定性与适应性,支持了陶伟等[28]的研究结果。

此外,本文通过多情景模拟,揭示了不同发展策略下自然与人文因素的相互作用及其对土地利用模式的影响。研究结果表明,结合多维度约束条件的优化策略,能够在土地利用优化中实现更高的效率和合理性,尤其是在生态保护与经济发展需求之间达成更好的平衡。与莫致良等[29]的研究相呼应,本文进一步拓展了其的适用性和实际价值。

综上所述,本文通过创新性地将蚁群算法与GeoSOS模型耦合,不仅在理论上验证了其在土地利用优化中的有效性,也为实际应用提供了更加精确的决策工具。这项研究为未来的城市规划和生态保护实践奠定了坚实的基础,具有广泛的理论意义和应用价值[6]。

6 结论与展望

6.1 结论

本研究通过耦合应用GeoSOS模型和蚁群算法,对泰安市2035年的土地利用状况进行了模拟与优化。通过景观分割度、分裂指数、有效网格大小定量计算、比较分析以及对城镇化区域发展、生态环境保护和农业资源利用定性分析,得出以下结论:

(1)本研究成功耦合了GeoSOS模型与蚁群算法,证明了该耦合模型在处理土地利用变化模拟和空间优化问题中的有效性。通过模拟不同情景下的土地利用变化,本研究展示了模型在预测和优化土地利用格局方面的高精度和实用性。

(2)研究结果强调了在土地利用变化模拟中考虑多维度影响因子的必要性。地形、交通、人类活动和发展惯性等因素的综合考量,为构建高置信度的土地利用模型提供了坚实的基础,并有助于深入理解土地利用变化的复杂性。

(3)通过多情景模拟,本研究揭示了自然与人文因素在不同发展策略下的相互作用及其对土地利用模式的影响。特别是在建设用地规模-空间双重限制情景下,优化策略显著提升了土地利用的集约度和生态保护的有效性。

6.2 展望

本研究提出的优化策略不仅有效控制了建设用地的总量,还提高了建设用地集约利用程度,同时显著提升了景观连通性和生态功能。这为泰安市乃至类似城市的土地利用规划和管理提供了科学依据和决策支持。

基于研究结果,建议泰安市在未来的土地利用规划中,应严格控制建设用地规模扩张,优化土地利用结构,在建设用地规模-空间的双重约束下保持生态和农业空间的完整性和连续性,以实现生态环境保护与经济发展的协调统一。

本研究为土地利用演化模拟与空间优化领域提供了新的视角和方法,但也指出了模型参数设置、初始条件选择以及外部因素影响等方面的局限性。未来的研究应进一步改进模型参数和优化方法,考虑更多的外部因素和不确定性,以提高模拟结果的可靠性和普适性。

参 考 文 献

[1] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2000

[2] 国土资源部.中国国土资源报告[M].北京:地质出版社,2001.

[3] 罗鼎,月卿,邵晓梅,等.土地利用空间优化配置研究进展与展望[J].地理科学进展,2009,28(5):791-797.

[4] 丛光浩.城市空间结构优化与土地利用规划的协同机制研究[J].住宅与房地产,2024(18):80-82.

[5] COUCLELIS H. Cellular worlds: a framework for modeling Micro-Macro dynamics [J]. Environment and Planning A,1985,17(5):585-596.

[6] 刘耀林,仝照民,刘岁,等.土地利用优化配置建模研究进展与展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1598-1614.

[7] 王帝文,李飞雪,陈东.基于Pareto最优和多目标粒子群的土地利用优化配置研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(9):2019-2029.

[8] HANDAYANTO R T,KIM S M,TRIPATHI N K,et al. Land use growth simulation and optimization in the urban area [EB/OL]. [2024-2-14]. https://ieeexplore.ieee.org/stamp.jsp?tp=&arnumber=8280532&tag=1.

[9] LI Y H H. Bringing conservation priorities into urban growth simulation: an integrated model and applied case study of Hangzhou, China [J]. Resources, Conservation and Recycling,2019,140:324-337.

[10] ZHENG W W, KE X L, XIAO B Y, et al. Optimising land use allocation to balance ecosystem services and economic benefits: a case study in Wuhan, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248: 109306.

[11] 陈军,陈利军,李然,等.基于GlobeLand30的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析[J].测绘学报,2015,44(11):1181-1188.

[12] 张坤,肖燕,何振芳,等.基于SRTM DEM的祁连山自然保护区地形特征研究[J].干旱区地理,2020,43(6):1559-1566.

[13] 吴健生,马洪坤,彭建.基于"功能节点-关键廊道"的城市生态安全格局构建:以深圳市为例[J].地理科学进展,2018,37(12):1663-1671.

[14] LAN T, YU M, XU Z, et al. Temporal and spatial

variatian characteristics of catering facilities based on POI data: a case study within 5th ring road in Beijing [J]. Procedia Computer Science,2018,131:1260-1268.

[15] LIU X Q, QIAO J G, ZHANG Y H, et al. Self-modifying CA model using dual ensemble Kalman filter for simulating urban land-use changes [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29 (9/10):1612-1631.

[16] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,Part B (Cybernetics),1996,26(1):29-41.

[17] 何晋强,黎夏,刘小平,等.蚁群智能及其在大区域基础设施选址中的应用[J].遥感学报,2009,13(2):246-256.

[18] LIU X Q, LI X. Discovery of transition rules for geographical cellular automata by using ant colony optimization [J]. Science in China Series D: Earth Sciences,2007(10):1578-1588.

[19] LIU X P, LI X, YEH A G O, et al. A multi-type ant colony optimization (MACO) method for optimal land use allocation in large areas [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2012, 26 (7/8): 1325-1343.

[20] WANG W L, JIAO L M, JIA Q Q, et al. Land use optimization modelling with ecological priority perspective for large-scale spatial planning [J]. Sustainable Cities and Society,2021,65:102575.

[21] 自然资源部.国土空间调查,规划,用途管制用地用海分类指南(试行)[EB/OL].(2024-11-10)[2024-11-30]. https://zrzy. nmg. gov. cn/hdpt/fcqsxbl/ghxk/202404/P0202404104130057 20204.doc.

[22] HAGENZANKER A, ENGELEN G, HURKENS J. Map comparison kit 3: user manual [R]. Maastricht: Research Institute for Knowledge Systems, 2006.

[23] JAEGER J A G, BERTILLER R, SCHWICK C, et al. Implementing landscape fragmentation as an indicator in the Swiss monitoring system of sustainable development (Monet).[J]. Journal of Environmental Management, 2008,88(4):737-751.

[24] JAEGER J A G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation [J]. Landscape Ecology, 2000, 15(2): 115-130.

[25] GIRVETZ E H, THOME J H, BERRY A M, et al. Integration of landscape fragmentation analysis into regional planning: a statewide multi-scale case study from California, USA [J]. Landscape and Urban Planning,2008,86(3/4):205-218.

[26] MOSER B, JAEGER J A G, TAPPEINER U, et al. Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem [J]. Landscape Ecology,2007,22(3):447-459.

[27] RODNEY V D R,JAEGER J A G,VAN DER REE R,et al. Effects of roads and traffic on wildlife populations and landscape function: road ecology is moving toward larger scales [J]. Ecology and Society,2011,16(1):1-9.

[28] 陶伟,刘译泽,孙清,等.基于GeoSOS模型的金华市土地利用变化动态模拟[J].浙江师范大学学报(自然科学版),2024,47(3):249-256.

[29] 莫致良,杜震洪,张丰,等.基于可扩展多目标蚁群算法的土地利用优化配置[J].浙江大学学报(理学版),2017,44(6):649-659+674.

(责任编辑:李拓宇)