基于土地利用变化的城市生境质量时空分异格局及影响因素*

李志杰[1,2] 黄贵超[2] 马訾懿[1] 周国艳[1]

1 苏州大学金螳螂建筑学院 江苏苏州 215000
2 博雅达勘测规划设计集团有限公司 江苏苏州 215000

摘要：生境质量作为区域生物多样性能力的重要表征，对于维护区域生态格局稳定、推动经济与生态协调发展具有重要意义。以江苏苏州市为例，基于 2000、2010、2020 年的土地利用数据模拟 2030 年土地利用类型，采用 INVEST 与 CA-Markov 模型分析预测苏州市土地利用变化，通过标准差椭圆、重心分析、随机森林模型等空间分析方法，揭示其生境质量时空分异特征及其影响因素。结果表明：1）2000—2030 年苏州市土地利用类型变化表现为耕地面积、建设用地面积、未利用地面积显著增加，水域、林地面积呈现逐渐缩减的态势。2）生境质量空间格局整体呈现中间高、四周低的斑块化布局，较高及高等级生境质量主要集中于区域内的水域、山地，低等级生境质量主要集中于区域内的城镇建设用地；随着时间变化，生境质量呈现逐渐下降的趋势，且生境质量重心呈现“东北—西南”的“C”型迁移轨迹。3）生境质量时空分异特征是由空间格局、社会经济、土地利用、地表覆盖、自然环境等多种因素共同作用的结果，其中土地利用与地表覆盖的影响最大。因此，推动土地利用结构优化调整、聚焦生境质量最突出的山地与湖泊地带是未来的规划重点。

关键词：土地利用变化；生境质量；CA-Markov 模型；INVEST 模型；时空分异
DOI：10.12169/zgcsly.2022.07.30.0001

Spatial and Temporal Variation Patterns of Urban Habitat Quality and Its Influencing Factors Based on Land Use Change

Li Zhijie[1,2] Huang Guichao[2] Ma Ziyi[1] Zhou Guoyan[1]

(1. School of Architecture, Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China;
2. Boyada Survey Planning Design Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: Habitat quality, as an important characterization of regional biodiversity capacity, is of great significance for maintaining the stability of the regional ecological pattern and promoting the coordinated economic and ecological development. The study takes the land use data in 2000, 2010, and 2020 in Suzhou City, Jiangsu Province to simulate the land uses in 2030, and analyze and predict the land use change using the INVEST and CA-Markov models. Spatial analysis methods such as standard deviation ellipse, center of gravity analysis, and random forest model are used to reveal the characteristics of spatial and temporal differentiation of habitat quality in Suzhou and analyze its influencing factors. The results show that: 1) The changes in land use in Suzhou from 2000 to 2030 present the significant increase in the area of cultivated land, construction land and un-utilized land, and the gradual shrinkage in the area of water bodies and forest land; 2) The spatial pattern of habitat quality generally presents a patchy layout,

收稿日期：2022-07-30
* 基金项目：江苏省研究生科研创新与实践计划项目（SJCX21-1347）
第一作者：李志杰（1996-），男，硕士生，研究方向为风景园林。E-mail：3460492572@qq.com
通信作者：周国艳（1963-），女，博士，教授，研究方向为城乡规划。E-mail：754323772@qq.com

high in the center and low in the surrounding areas. The water bodies and mountains in the region have the habitat quality of relatively high and high grade, while the urban construction land has a low-grade habitat quality. With the change of time, the habitat quality showed a downward trend, and the center of gravity of the habitat quality showed a "C" type migration trajectory of "northeast-southwest"; and 3) The spatial and temporal differentiation characteristics of habitat quality result from the combined action of various factors including spatial pattern, socioeconomy, land use, land cover, and natural environment. Among them, land use and land cover have the greatest impact. In the sense, the future planning should place an importance on the optimization and adjustment of land use structure and the mountainous areas and water bodies with the best habitat quality.

Keywords: land use change; habitat quality; CA-Markov model; INVEST model; spatial and temporal variation

生境质量是指生态系统维护物种生存发展的重要能力[1-2]，是区域生物多样性的重要表征。快速城镇化引起的城市建设用地加速扩张，使得耕地、水域、林地侵占现象日益加剧，导致城市土地利用结构失衡[3]，区域景观破碎化日趋严重，生境质量逐渐下降[4]。因此，基于土地利用变化的视角，揭示城市生境质量时空分异格局及其内在影响因素，对于维护城市生物多样性、保障生态系统稳定、助力城市可持续发展具有重要的现实意义。

早期生境质量评价主要依靠田野调查获取数据，并以特定区域某一时间环境下生境条件对物种影响的静态分析为主，研究重点依托物种以及土地利用类型构建评价指标体系，如河岸植被指数（Qualitat del Bosc de Ribera，QBR）[5]、河岸质量指数（Riverbank quality index，RQI）[6]、河流生境指数（River habitat index，IHF）[7]等。这些方法结果准确，但研究成本过大、研究尺度较小、时效性较差。随着信息技术的发展，大量计算机信息模型为生境质量评价提供了众多途径，研究逐渐可视化、信息化、动态化，并更加适用于多尺度及长时间序列[8]。INVEST 模型因其具有数据获取便捷、尺度应用广泛、投入成本低、评估精度高、体系构建较为完善等特点而成为当前应用最广的生态评估模型。

当前土地利用变化预测模型主要包括元胞自动机模型（Cellular Automata，CA）[9]、土地利用变化模拟模型（FLUS）[10-11]、系统动力学模型（System Dynamics Model，SD）[12]、马尔科夫模型（Markov）[13]等，其中 CA-Markov 模型综合了空间形态与时间推演能力而应用最广。本文以苏州市为例，基于 2000、2010、2020 年的土地利用数据，通过 CA-Markov 模型以及 INVSET 模型，总结苏州市土地利用变化特征，模拟分析 2030 年苏州市土地利用现状并分析评价其生境质量，借助空间自相关、标准差椭圆与重心分析，揭示苏州市生境质量时空分异格局，并运用随机森林模型揭示其内在影响因素及形成机制，以期为苏州市生境质量保护提供参考，推动生态环境保护与可持续发展。

1 研究区概况

江苏省苏州市（119° 55′—121° 20′ E，30°47′—32°02′N）位于我国东部地区，属亚热带季风海洋性气候，四季分明，气候温和，雨量充沛，是著名的江南水乡。全市总面积 8 657.32 km^2，建成区面积为 481.33 km^2，河流、湖泊、滩涂面积占全市土地面积的 34.6%，著名的有太湖、阳澄湖、长江、京杭运河等。苏州市下辖姑苏区、虎丘区、吴中区、相城区、吴江区 5 个区及苏州工业园区，代管张家港、常熟、太仓、昆山 4 个县级市。

2 研究方法

2.1 数据来源

土地利用数据来源于中科院资源环境科学中心[14]，分辨率为 30 m，时段为 2000、2010、2020 年，用地类型为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 大类；高程 DEM 数据来源于地理空间数据云平台，采用 ArcGIS 提取高程信息；

道路数据来源于 BIGMAP；城市中心数据来源于《苏州市国土空间规划 2021—2035 年》；苏州市 GDP 等社会经济数据来源于《苏州市统计年鉴 2022》。最后将上述数据按研究区范围进行裁剪，统一坐标系为 GCS_ WGS_ 1984。

2.2　INVEST 模型

INVEST 模型是综合运用土地利用胁迫因子及威胁源，依据胁迫因子的距离及权重计算生境质量。公式如下：

$$Q_{xj} = H_j\left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right) \tag{1}$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\frac{W_r}{\sum_{r=1}^{R} W_r} r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \tag{2}$$

式（1）（2）中：Q_{xj}代表生境地块 j 中栅格 x 的生境质量；H_j代表生境地块 j 中的生境适宜度；D_{xj}代表生境地块 j 中 x 的生境退化度；k 代表半饱和系数，通常为D_{xj}的一半；Z 为归一化常量，一般取值为 2.5；R、W_r分别代表威胁源个数与威胁源 r 的权重；Y_r代表威胁源的栅格数；r_y是栅格 y 的胁迫值对栅格 x 的胁迫水平；i_{rxy}为栅格单元 y 中的胁迫因子 r（r_y）对生境栅格单元 x 的胁迫作用。具体公式如下：

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{r\max}} \tag{3}$$

$$i_{rxy} = \exp\left[-\frac{2.99}{d_{r\max}} d_{xy}\right] \tag{4}$$

式（3）（4）中：d_{xy}为栅格单元 x 与栅格单元 y 之间的直线距离；$d_{r\max}$为胁迫因子 r 的欧式距离；β_x为威胁源对于栅格 x 的可达性；S_{jr}为土地利用覆盖类型 j 对于胁迫因子 r 的敏感性，取值范围为 [0，1]，该值越接近 1 表示越敏感。设定耕地、城镇建设用地、未利用地、铁路、高速公路作为威胁源[15]，设定最大影响距离、生境适宜度及相对敏感度[16]。依据 ArcGIS 自然断点法将生境质量定义为低（一级）、较低（二级）、中等（三级）、较高（四级）和高（五级）5 个等级。

2.3　CA-Markov 模型

马尔柯夫模型是基于概率论提出的动态随机模型，当前已广泛应用于土地利用格局演变研究中[17]。其具体计算过程为：

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \tag{5}$$

式（5）中：$S_{(t)}$，$S_{(t+1)}$分别为 t，t+1 时刻的土地利用类型；P_{ij}为转移概率矩阵，可通过以下公式进行表达，即

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式（6）中，$0 \leqslant P_{ij} < 1$，且 $\sum_{j=1}^{n} P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \cdots, n)$，$n$ 为土地利用类型。

元胞自动机模型是通过系统内部元胞相互作用来推动系统变化的网格动力学模型，计算公式如下：

$$S_{(t+1)} = f\left[S_{(t)}, N\right] \tag{7}$$

式（7）中：S 表示元胞离散的集合状态；t、t+1 表示不同时间；f 表示元胞之间的固定转换规则，N 表示元胞邻域。

本研究土地利用预测过程综合考虑不同类型驱动因子[18-20]。在精度检验时，以 2020 年为基准数据，经模拟计算，2030 年的 Kappa 系数为 0.70，结果可信。基于此，进一步开展 2030 年生境质量模拟计算[21]。

2.4　标准差椭圆与重心迁移

通过苏州市生境质量标准差椭圆主轴长度、短轴长度、转角角度揭示时空分异及空间集聚程度[22]。重心分析主要用于分析苏州市生境质量在不同时期重心分布区间的移动方向与移动距离，其公式为：

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i};\quad Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i} \tag{8}$$

式（8）中：X、Y 表示苏州生境质量在某一时间区间内的分布重心的经度值、纬度值；X_i、Y_i表示苏州生境质量在某一时间区间内的分布经度值、纬度值；M_i表示生境质量在某一时间区间内的量值；i 表示某一时间区间。

2.5　随机森林模型

随机森林是利用多颗树对样本进行训练并预测的一种机器学习算法，通过组合多个弱分类器生成多个模型，计算各个变量在不同模型下的贡献度，取得变量的重要性排序，使得整体模型具有较高的精确度及稳定性[23]，相关计算过程在 Matlab 中完成。

2.6 影响因素选取

从景观格局、社会经济、地表覆盖、自然环境 4 个维度选取相关影响因素[24-25]。景观格局是空间异质性的重要体现，指标选取上包括多样性指数（Shannon's Diversity Index，SHDI）、蔓延度指数（Contagion Index，CONTAG）、聚合度指数（Aggregation Index，AI）、分维度指数（Fractal Dimension，FD）。社会经济活动是衡量区域建设强度的重要表征，指标选取包括人口密度（Population Density，PD）、人均 GDP、夜景灯光强度、土地利用程度综合指数（Land Use Degree Comprehensive Index）。地表覆盖指标包括归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）、归一化水体指数（Normalized Difference Water Index，NDWI）。自然环境指标包括高程（Elevation，EV）、坡度（Slope，SP）。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化及模拟预测

表 1 显示，苏州市土地利用类型以耕地、水域、建设用地为主。2000—2010 年，苏州市土地利用类型转移以耕地为主，净转出 4 357.05 km^2，主要转向水域 274.64 km^2、建设用地 1 151.63 km^2，这主要由是城市建设用地扩张以及退耕还湖所致。转出面积次之的是建设用地与水域，其中建设用地净转出 36.71 km^2 到耕地，水域净转出 70.24 km^2 到建设用地，这说明在快速城镇化背景下，苏州市盲目开垦扩张耕地，开发建设用地现象仍然存在。面积增长显著的为水域以及建设用地，其中水域净增加 293.10 km^2，体现了苏州市于 2000—2010 年退耕还湖显著的工作成效；建设用地增加的面积主要源于耕地；草地以及非建设面积的整体变化较小。

2010—2020 年，土地利用类型转移以水域为主，净转出 3 263.26 km^2，主要转向耕地 286.38 km^2、建设用地 90.91 km^2，其原因是城市的迅速扩张对于耕地以及城市建设用地的需求增大，进而侵占城市水系及湖泊。转出面积次之的是耕地以及建设用地，其中耕地净转出 2 984.65 km^2，主要转出 485.46 km^2 到建设用地，转出 279.63 km^2 到水域；建设用地净转出 2 197.01 km^2，主要转出 453.28 km^2 到耕地，转出 86.20 km^2 到水域，这表明城市发展对于耕地侵占的现象进一步恶化。

结合 CA-Markov 模型对苏州市 2030 年土地利用类型进行预测分析。由分析结果（表 2）可以看出：苏州市 2020—2030 年主要土地利用类型演变与 2000—2020 年演变趋势基本一致；在土地利用类型变化中，建设用地与草地变化最大；2030 年耕地、草地、水域面积持续减少，林地、建设用地面积持续增加，其中，耕地、建设用地面积变化率逐渐下降，草地面积变化率下降显著。以上说明未来土地利用结构优化与调整还将面临较大的压力。

表 1 苏州市 2000—2020 年土地利用转移矩阵 km^2

时期	地类	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计
2000—2010 年	草地	19.33	0.76	1.60	0.02	0.63	0.57	22.90
	耕地	0.29	2 918.93	1 151.63	7.40	274.64	4.16	4 357.05
	建设用地	0.02	36.71	964.55	1.78	15.73	0.04	1 018.83
	林地	0.02	3.40	8.49	172.60	1.80	0.01	186.31
	水域	0.57	25.95	70.24	0.54	2 971.72	0.02	3 069.04
	未利用地	0.01	0.01	0.81	0.31	0.30	3.34	4.76
	总计	20.23	2 985.75	2 197.31	182.65	3 264.81	8.14	8 658.89
2010—2020 年	草地	0.73	6.91	3.25	3.14	6.21	0.00	20.23
	耕地	20.09	2 167.08	485.46	32.00	279.63	0.39	2 984.65
	建设用地	17.97	453.28	1 622.90	16.67	86.20	0.00	2 197.01
	林地	33.05	15.03	10.88	113.95	9.72	0.00	182.63
	水域	30.50	286.38	90.91	2.22	2 852.95	0.32	3 263.26
	未利用地	1.54	0.41	4.58	0.65	0.97	0.00	8.14
	总计	103.87	2 929.08	2 217.98	168.62	3 235.67	0.70	8 655.93

表 2　苏州市 2000—2030 年土地利用类型变化特征

地类	2030 年预测面积/km²	2000—2010 年	2010—2020 年		2020—2030 年		
		变化面积/km²	变化率/%	变化面积/km²	变化率/%	变化面积/km²	变化率/%
耕地	3 234.96	−15.21	−31.50	−0.58	−1.80	−0.11	−0.30
林地	188.68	−0.40	−1.90	−0.14	−7.10	0.01	0.10
草地	112.76	−0.30	−11.60	0.92	40.8	−0.01	−1.30
水域	3 506.62	2.17	6.50	−0.34	−0.90	−0.04	−0.10
建设用地	2 477.20	13.07	11.56	0.23	0.90	0.16	0.60
未利用地	7.69	0.38	71.00	−0.08	−91.50	0.00	0.00

3.2　生境质量时空分异特征

3.2.1　空间分异特征

从表 3 可以看出：2000—2020 年低生境质量呈现增加趋势，在 2000—2010 年增加迅速，变化率增加 13.44%，其根本原因就是 2000 年后城市化进程加快导致城市建设面积的增加；中级、较高质量生境变化不显著。高质量生境面积逐年减少，但整体变化相对较缓，占比较小。

在空间布局上（图 1），2000—2020 年苏州市生境质量整体呈现中心低、四周高的斑块化分布。较高以及高质量生境多集中于南部、中部、北部的湖泊以及山地区域，南侧以太湖为主，该类区域林地覆盖度较大，生境质量水平维持较好。低等级生境质量分布广泛，多集中于各区域的城镇居民点以及交通沿线，其景观类型多以农田为主，其中姑苏区、工业园区以及苏州各县级市的城镇建设面积最大，生境质量也最低。

基于 2030 年土地利用模拟数据，通过 INVEST 模型计算 2030 年苏州市生境质量空间分布（图 1、表 3）。2020—2030 年苏州市生境质量的变化趋势较之 2010—2020 年基本一致，呈现整体下降的态势。2020—2030 年，较高等级生境质量降低 96.97%，高等级生境质量增加 0.73%，主要向低等级以及中等级生境质量转变。与 2020 年相比，中等级生境质量增加显著，面积从 2020 年 0.25 km² 增加至 3 497.68 km²，总体变化迅猛；低等级生境质量增加 104.00 km²，变化率为 4.10%，较低等级生境质量减少 19.91 km²，降低 0.62%。2030 年苏州市低等级生境质量多分布在建设用地区域，其中苏州市中部以姑苏区、工业园区、吴中区、相城区、虎丘区为主，东部以昆山市为主，北部以张家港市、常熟市为主。

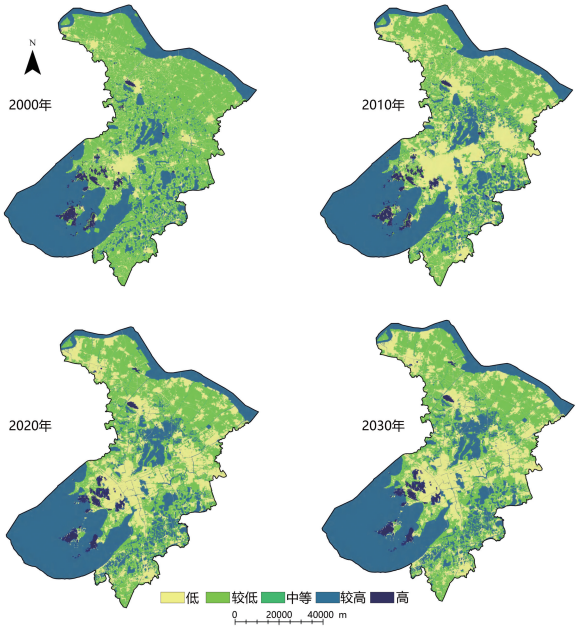


图 1　2000—2030 年苏州市生境质量分布

表 3　苏州市 2000—2020 年生境质量

生境质量等级	2000 年		2010 年		2020 年		2030 年	
	面积/km²	变化率/%	面积/km²	变化率/%	面积/km²	变化率/%	面积/km²	变化率/%
低	1 214.74	12.62	2 508.19	26.06	2 535.66	26.35	104.00	4.10
较低	4 770.85	49.58	3 272.59	34.01	3 195.11	33.20	−19.91	−0.62
中等	1.83	0.01	2.13	0.03	0.25	0.02	3 497.68	139.00
较高	3 427.46	35.62	3 638.23	37.81	3 703.56	38.49	−3 591.42	−96.97
高	206.91	2.15	202.79	2.10	187.17	1.94	1.37	0.73

3.2.2 生境质量时间演变特征

2000、2010、2020、2030 年的标准差椭圆重心点均在苏州市姑苏区内，近 30 年来苏州市生境质量的重心经度变化范围为 120° 58′ 21″ E—120°57′03″E，纬度变化范围在 30° 41′ 18″ N—30°40′38″N（表 4、图 2）。从空间转角看，生境质量空间转角从 2000 年 31°00′27″增加至 2030 年 31°31′39″；从重心分布来看，2000—2030 年重心迁移过程明显，2000—2010 年标准差椭圆重心向西南方向迁移 1.99 km，2010—2020 年向西迁移 0.04 km，2020—2030 年向西北方向迁移 0.54 km，重心迁移轨迹呈现“C”型变化，说明苏州市生境质量在空间分布上波动特征显著，整体逐渐向西南方向太湖流域、灵岩山片区进行转移。

从标准差椭圆空间长度（表 5、图 2）看，各时期椭圆长轴均高于短轴，表明方向性极为明显，呈现东北-西南的方向性。从 3 个时期的标准差椭圆面积看，整体呈现“先增后减”的态势，表明随着时间推移苏州市生境质量区域之间存在不均衡的现象，区域空间集聚性特征逐渐增强（表 4）。

表 4 苏州市 2000—2030 年生境质量重心特征值

年份	经度（E）	纬度（N）	旋转角度	面积/km²	迁移方向	迁移距离/km
2000	120°58′21″	30°41′18″	31°00′27″	5 574.90	—	—
2010	120°57′25″	30°40′36″	31°33′06″	5 639.86	西南	1.99
2020	120°57′23″	30°40′36″	31°31′13″	5 602.78	西	0.04
2030	120°57′03″	30°40′38″	31°31′39″	5 522.45	西北	0.54

表 5 苏州市 2000—2030 年生境质量标准差椭圆参数值

年份	沿短轴距离/km²	沿长轴距离/km²	短轴与长轴之比
2000	322.86	549.66	0.59
2010	322.06	557.45	0.58
2020	320.87	555.85	0.58
2030	315.41	557.35	0.57

3.3 生境质量影响因素

将各影响因素（图 3）通过 ArcGIS 重采样为 1 000×1 000 的网格尺度，经过渔网栅格化得到 9 032 个样本点。以 2020 年生境质量为因变量 Y，各影响因素为自变量 X，构建随机森林模型，具体计算过程在 Matlab 中计算完成。

从图 4 可以看出，生境质量影响因素特征重要性排序为：土地利用指数>NDVI>人口密度>NDWI>夜景灯光强度>高程>坡度>人均 GDP>AI>FD>SHDI>CONTAG。

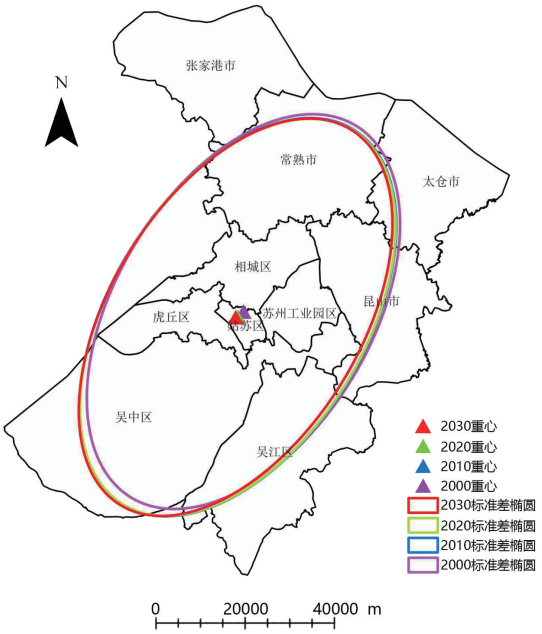


图 2 2000—2030 年苏州市生境质量重心及标准差椭圆分布

土地利用程度强度高值区域多集中于苏州市的建设用地集中区，水域、林地区域为低值区域，建设用地作为区域内重要生境威胁源，直接或间接导致生境质量整体降低。地表覆盖也是影响生境质量变化的诱因，苏州市地表植被覆盖指数高值区域多集中于灵岩山、太湖三山、虞山等区域，呈现斑块不均匀分布，水体覆盖指数高值区域集中于太湖、阳澄湖、北侧长江流域以及吴江区诸多河流，作为区域内部的重要湿地区域，具有良好的生态环境并且长期受生态保护监管，因此具有较高的生境质量，这与苏州市整体生境质量空间格局相对应。

社会经济活动的强弱会直接影响区域土地利用类型，进而作用于区域生境质量空间分布。从图 3 可看出：苏州市人口密度低的区域多集中于山地及水域区域，建设活动影响较小；人口密度高、夜景灯光强度高的区域多集中于中心城区，对建设用地需求增大进而侵占生态用地，导致生境质量的下降。而苏州市人均 GDP 在空间分布上两极分化较为严重，以中心城区与昆山市为两核心，呈现两极分化的态势，因此对于区域生境质量影响相对较弱。

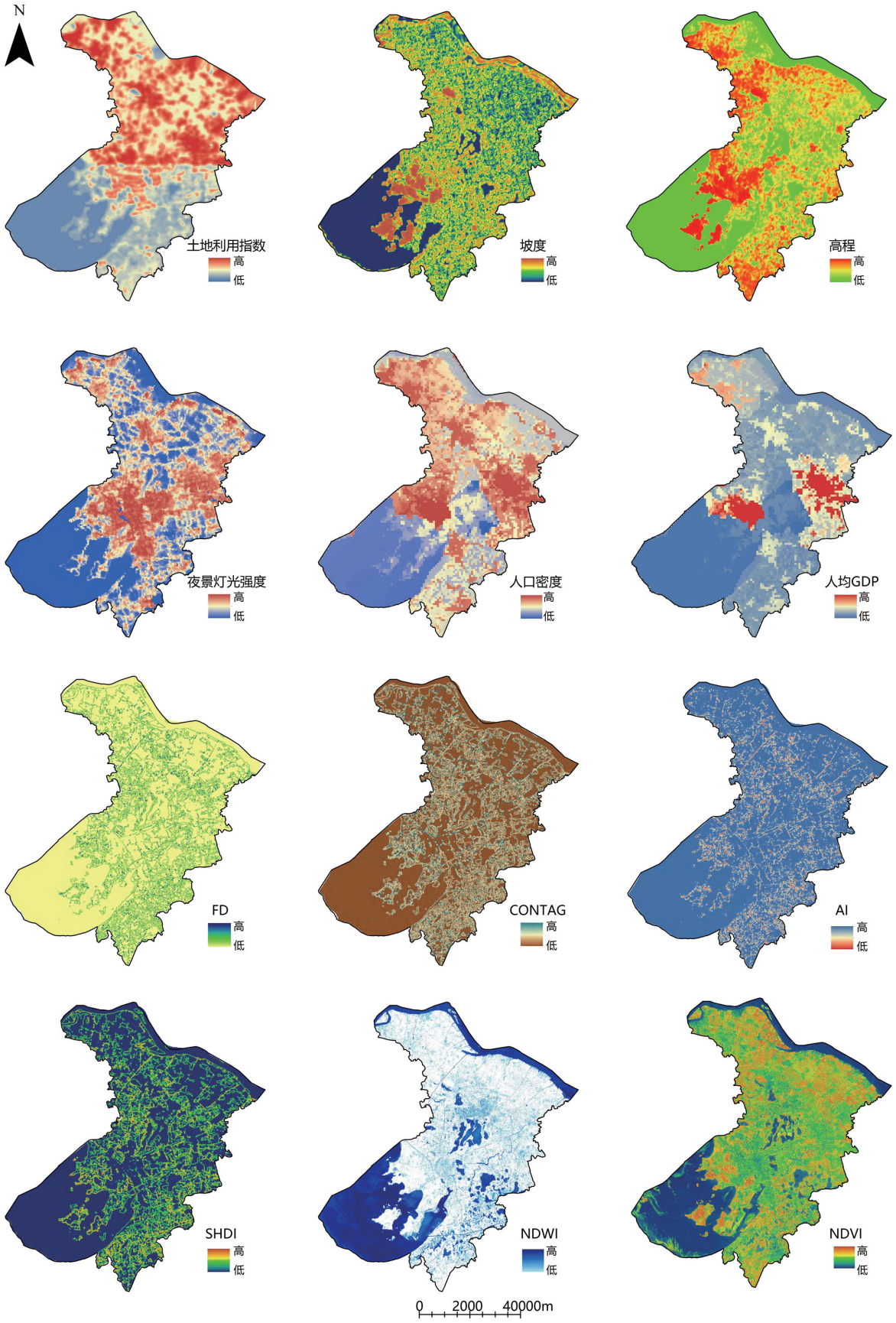


图 3　苏州市生境质量影响因素

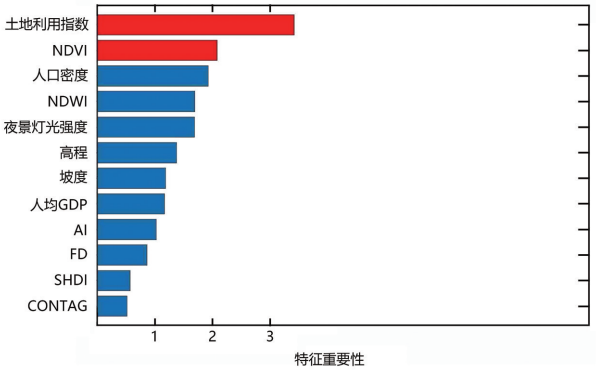


图 4 生境质量影响因素特征重要性排序

高程与坡度衡量人类建设活动的可达性，苏州市整体地貌以平原为主，地势平坦，建设用地开发难度较低。因此区域高程与坡度较高的山地区域生境质量优于平原地区。景观格局指数同样会影响生境质量，从图 3 可知，AI、FD、SHDI、CONTAG 高值区域多集中于山地、草地、林地等破碎化程度较高的区域，低值区域集中于水体、建设用地、耕地等相对稳定的区域。城市建设用地的扩张使山地、林地被侵占，加剧景观破碎化，这与苏州市生境退化度空间分布相对应。

4 结论与建议

4.1 结论

综合分析 2000—2030 年苏州市土地利用类型及生境质量空间分布特征，主要表现为：建设用地及耕地迅速扩张，林地与水域大量减少，各土地类型中以耕地、水域向建设用地转移为主。生境质量空间格局整体呈现中间高、四周低的斑块化布局，较高及高等级生境质量主要集中于区域内的水域、山地，低等级生境质量主要集中于区域内的城镇建设用地。从时间演变特征来看，生境质量重心呈现从东北—西南的“C”型迁移轨迹，且空间集聚性不断增强。生境质量时空分异格局受到多种因素影响，合理的土地利用结构是生境质量维持良好态势的重要保障，因此土地利用是生境质量时空分异的基础性因素。

土地利用格局不仅受到地形地貌等自然因素的影响，还会受到宏观政策的影响，因此未来需着重考虑社会经济政策等因素。此外，由于本研究仅考虑了内部胁迫因子的影响，并未综合考虑外部胁迫因子的影响；同时，研究尺度范围较大，对于小尺度空间研究精确度不够。因此，未来对于生境质量研究因综合考虑自然、社会、宏观政策等多方面的影响因素，完善不同尺度以及不同类型的生境研究。

4.2 建议

为防止苏州市区域生境质量进一步恶化，应采取措施缓解人地矛盾，平衡好经济发展与生态保护之间的矛盾。依据研究结果提出以下建议：

1）防止城市建设用地的无序扩张。苏州市各级国土空间规划编制时，应合理控制城镇建设用地总体规模，并且在城市更新以及旧城改造的过程中，不断对现有建设用地进行二次开发及利用，减少对城市新增建设用地的依赖。

2）优化区域内部林地、草地及水域的整体布局。严格执行区域内生态红线管控以及生态保护政策，在维护现有生态保护红线的基础上不断推进退耕还林、还湖、还草政策。此外，还应严格落实“林长制”以及“湖长制”，健全生态屏障区资源责任系统[26-28]。

参考文献

[1]FELLMAN J B, HOOD E, DRYER W, et al. Stream physical characteristics impact habitat quality for Pacific Salmon in two temperate coastal watersheds [J]. PLoS ONE, 2017, 10(7): e0132652.

[2]HILLARD E M, NIELSEN C K, GRONINGER J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottomland hardwood forest ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2017, 79: 47-53.

[3]金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1242-1252.

[4]王敏, 陈梦璇, 宋昊洋. 生境质量与游憩服务的耦合协调对滨水空间活力的影响[J]. 中国城市林业, 2022, 20(3): 7-13

[5]冯彦, 何大明, 杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选[J]. 地理研究, 2012, 31(3): 389-398.

[6]CARRASCO S, HAUENSTEIN E, PEÑA-CORTÉS F, et al. Riparian vegetation quality evaluation of two coastal watersheds in southern Chile by applying QBR index as base for its territorial management and planning[J]. Gayana Botánica, 2014, 71(1): 1-9.

[7]RAVEN P J, HOLMES N T H, NAURAM. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the U.K.[J]. Hydrobiologia, 2000, 422-423: 359-367.

[8]李旭芳, 翁飞帆, 丁铮. 基于土地利用时空格局演变的新乡市

生态风险分析[J].中国城市林业,2023,21(1):131-136.
[9]褚琳,张欣然,王天巍,等.基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J].应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.
[10]冯文彬,林媚珍,龚建周,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中山市生境质量时空分异特征[J].生态科学,2022,41(3):16-23.
[11]谢凌凌,许进龙,臧俊梅,等.基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测[J].水土保持研究,2022,29(2):249-254.
[12]李可欣,曹永强,范帅邦,等.东北三省“水-能源-碳”系统仿真模拟:基于系统动力学模型[J].生态学报,2023,43(17):6999-7011.
[13]任胤铭,刘小平,许晓聪,等.基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J].生态学报,2023,43(11):4473-4487.
[14]刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
[15]巩杰,马学成,张玲玲,等.基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异[J].水土保持研究,2018,25(3):191-196.
[16]郑宇,张蓬涛,汤峰,等.基于 InVEST 模型的昌黎县土地利用变化对生境质量的影响研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(7):121-128.
[17]岳东霞,杨超,江宝骅,等.基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J].生态学报,2019,39(6):1993-2003.
[18]王友生,余新晓,贺康宁,等.基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J].农业工程学报,2011,27(12):330-336.
[19]喻茜,邵大伟,吴殿鸣.高度城镇化地区非建设用地转用的时空特征[J].中国城市林业,2023,21(1):87-94.
[20]胡碧松,张涵玥.基于 CA-Markov 模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1207-1219.
[21]罗紫薇,胡希军,韦宝婧,等.基于多准则 CA-Markov 模型的城市景观格局演变与预测:以上杭县城区为例[J].经济地理,2020,40(10):58-66.
[22]赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.
[23]黄钦,杨波,徐新创,等.基于多源空间数据和随机森林模型的长沙市茶颜悦色门店选址与预测研究[J].地球信息科学学报,2022,24(4):723-737.
[24]梁晓瑶,袁丽华,宁立新,宋长青,程昌秀,王翔宇.基于 InVEST 模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):864-872.
[25]朱增云,阿里木江·卡斯木.基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(10):3408-3420.
[26]张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].地理学报,2020,75(1):160-178.
[27]刘珉,胡鞍钢.中国式治理现代化的创新实践:以河长制、林长制、田长制为例[J].海南大学学报(人文社会科学版),2023,41(5):53-65.
[28]于航,金磊,谭炳香,等.黄土高原退耕还林生态服务权衡协同分析:以安塞县为例[J].生态学杂志,2023,42(3):544-551.