

基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局与 生境质量时空演变及预测

——以江西省南昌市为例

李亚楠^{1,2}, 多玲花^{1,2}, 张 明²

(1.东华理工大学 地质资源经济与管理研究中心, 南昌 330013; 2.东华理工大学 测绘工程学院, 南昌 330013)

摘 要:为揭示土地利用变化对区域生境质量时空演变的影响,促进土地资源的合理利用和生态规划体系的建立健全,以江西省南昌市为例,基于 1995 年、2005 年和 2015 年的土地利用数据,应用 CA-Markov 和 MCE 模型并结合 InVEST 模型,评价和预测了土地利用演变角度下的生境演化特征。结果表明:(1) 1995—2015 年,草地、耕地及水域是南昌市的主要土地利用类别,占比超过 90%;建设用地急剧扩张,20 a 间涨幅高达 96.44%,耕地和林地是流转为建设用地的重要地类。(2) 研究区整体景观生境质量显著下降,大量高等级生境景观向低等级生境景观转化;城市附近和各个流域的生境退化比较显著;生境稀缺性高的用地类型大多是耕地和林地。(3) 2015—2025 年期间,区内景观格局和生境质量继续保持 1995—2015 年的演变趋势,建设用地等生境适宜度较低的地类高速扩张,进而侵扰林地、水域和草地等生境质量优质地区,致使威胁源规模和影响范畴急剧扩大,景观破碎度水平升高,稳定性降低,这将引起研究区生境质量的持续下降。1995—2025 年研究区生境质量明显退化,城镇化扩张与生态用地缩减是其主要原因。

关键词:CA-Markov 模型; InVEST 模型; 生境质量; 土地利用格局; MCE 模型

中图分类号:F301.2; X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0345-10

Evolution and Prediction of Land Use Pattern and Habitat Quality Based on CA-Markov and InVEST Model

— A Case Study of Nanchang City in Jiangxi Province

LI Yanan^{1,2}, DUO Linghua^{1,2}, ZHANG Ming²

(1.Center of Geological Resource Economics and Management Research, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2.Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to reveal the impact of land use change on the temporal and spatial evolution of regional habitat quality and promote the rational use of land resources and the establishment of ecological planning system, taking Nanchang City of Jiangxi Province as an example, based on land use data from 1995, 2005 and 2015, we applied CA-Markov and MCE models and combined with the InVEST model to evaluate and predict the habitat evolution characteristics under the perspective of land use evolution. The results showed that: (1) during 1995—2015, grassland, farmland and water body were the main land use types in Nanchang, accounting for more than 90%; construction land in the region had expanded significantly, with a growth rate of 96.44% over 20 years, mainly transformed from farmland and woodland; (2) the overall landscape habitat quality in the study area was significantly degraded, and a large number of high-grade habitat landscapes were converted to low-grade habitat landscapes; habitat degradation was more significant near cities and in various watersheds; most of the land types with high habitat scarcity were farmland and woodland; (3) during 2015—2025, the landscape pattern and habitat quality of Nanchang City continued to main-

收稿日期:2021-05-13

修回日期:2021-06-14

资助项目:东华理工大学地质资源经济与管理研究中心资助项目(20GL02);国家自然科学基金(11465002);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200770);东华理工大学研究生创新基金(DHYC-202123);东华理工大学博士科研启动基金(DHBK2019184)

第一作者:李亚楠(1994—),女,河南濮阳人,硕士,研究方向为土地利用变化。E-mail:201911204013@ecut.edu.cn

通信作者:多玲花(1987—),女,河南濮阳人,博士,讲师,主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail:duolinghua555@126.com

tain the change trend during the period 1995—2015; land types with low habitat suitability such as construction land will expand rapidly, and then occupied the areas with high habitat quality such as forest land, water area and grassland, resulting in a dramatic expansion of the scale and impact of threat sources, an increase in the level of landscape fragmentation and a decrease in stability, which will cause a continuous decline in habitat quality in the study area. During the 30 years from 1995 to 2025, the habitat quality in the study area has deteriorated significantly. The main reasons are the expansion of urbanization and the reduction of ecological land.

Keywords: CA-Markov model; InVEST model; habitat quality; land-use pattern; MCE model

随着城镇化的持续推进,土地利用在自然及人为等多方面影响下产生转变^[1],对生态链中的物质循环与能量交替形成潜移默化的作用,进而转变生境质量和生态变化历程,最终影响生态系统的结构与功能^[2-4]。南昌市作为江西省省会城市,是长江经济带的枢纽之一,其发展对于中国中部经济发展战略起着不容小觑的作用。而近年来随着经济迅速发展,南昌市城镇化的进程加快,随之带来的是一系列有关城市扩展的问题,这些问题可能导致土地利用效率低下^[5]、热岛效应^[6]及人居环境恶化等。因此,评价和预测土地利用演变视角下的生境演变特征,对于南昌市改善人居环境质量、优化生态环境、助力经济发展具有现实意义。

初期学界研究生境多侧重于静态分析,一般通过确立生境评价指标系统来评价生境质量,比如 Valero 等^[7]将河岸植被指数(QBR)、河岸质量指数(RQI)和河流生境指数(IHF)作为河流生境生态状况的指标并研究其在生态恢复重建中的应用;近年来多运用动态分析的方法研究生境,主要通过构建模型定量分析,常见的模型有 SolVES 模型^[8]、MIMES 模型^[9]、HSI 模型^[10]和 InVEST 模型^[11],其中由美国斯坦福大学和世界自然基金会等组织开发的 InVEST 模型具有量化精确、结果可视化、运用成本低等特性,故被广泛运用于生态系统服务功能评估研究中^[12]。Nelson 等^[13]运用此模型研究北美俄勒冈州 Willamette 流域不同的土地利用情形,探讨了不同情形下整个景观中生态系统服务的价值和分布方式。Leh 等^[14]探讨了西非二国不同阶段内土地利用变化下的生境质量演变,对这两个国家的生境质量水平进行了整体评估;高庆彦等^[15]探讨了大理州山地土地利用变化对生境质量的影响,结果认为该区生境退化与低缓坡地带城市扩张密不可分。而退耕还林、水果产业和旅游业的发展则促进该区生境质量优化。

然而,目前研究普遍侧重评估研究区历史和现状的生境质量,缺乏对土地利用变化影响下生境质量变化趋势的预测研究。当前预测用地变化的模型多种

多样^[16-19],而 CA-Markov 模型^[20]既具有 CA 模型预测空间形态演变的特性,又具有 Markov 模型时间序列推演的能力,因此被普遍运用于土地利用模拟中。Jenerette 等^[21]在美国凤凰城地区采用 CA-Markov 模型研究城市化和人口增长对该地区景观变化的影响。Nourqolipour 等^[22]在马来西亚瓜拉冷岳地区结合 CA-Markov 和 MCE 模型模拟当地棕榈种植园的空间格局分布。在国内,许小娟等^[23]运用 CA-Markov 模型预测了 3 种情景下江苏沿海用地演变特征,为维护区域生态安全提出了建议。上述研究都表明 CA-Markov 模型对用地发展趋势的现实模拟具有较好的普适性。

综上,上述两种模型均在各自领域均取得了较好的评价结果,但鲜有学者结合 CA-Markov 和 InVEST 模型对未来土地利用变化影响下生境质量进行模拟和预测研究。而预测未来的景观格局和生境质量演变对于理解土地利用格局的复杂动态演化机制,探索生态环境优化发展方针和管理模式有重要理论意义。鉴于此,本文以江西省南昌市为例,基于 1995 年、2005 年和 2015 年的土地利用数据,将 CA-Markov 模型的预测推演特性和 InVEST 模型的生境质量评价优势综合起来,评价和预测土地利用演变视角下的生境演化特征,既可以预测未来土地的空间形态变化,又能实现未来生境质量的长期预测。具体而言,本文的详细研究目标是:(1) 预测将来的土地利用格局并阐释历史、现状和未来的土地利用变化特征;(2) 评价和预测生境质量的时空演变特征;(3) 总结出优化区域土地利用格局和改善生态环境的警示和举措,为区域国土空间规划和生态文明建设提供更为有效和关键的参考信息。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

南昌市(东经 115°27′—116°35′,北纬 28°10′—29°11′)作为江西省省会,全境大部为平原,东南部地形较为平缓,西北部为丘陵地带,平原、水域以及山地

丘陵分别占其 1/3 左右。全市总面积 7 402 km²。水网密布,水域面积占 2 204 km²。研究区属于亚热带季风气候,四季分明,降水丰沛。作为我国中部承东启西、纵贯南北的主要交通要道和南方主要生态屏障,南昌经历了急剧的人口增长和建设用地扩张,因此优化当前生态环境是未来的工作重点。

1.2 研究数据来源和处理

本研究的土地利用数据源来自于通过美国地质调查局平台 (<https://www.usgs.gov/>) 获取的 Landsat TM/ETM+ 影像,分辨率为 30 m,时段分别为 1995 年、2005 年、2015 年,月份为 7—8 月。通过 ENVI 软件对这 3 期遥感影像进行预处理。根据南昌市土地资源利用的实际情况,将区内用地类别划为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。DEM 数据从地理空间数据云平台 (<http://www.gsccloud.cn/>) 获取,并采用 ArcGIS 的 Slope 功能提取获得坡度。各年份的 1 km 分辨率人均 GDP、人口密度数据和其他道路交通数据均通过中国科学院资源与环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 获得。

1.3 研究方法

1.3.1 CA-Markov 模型 马尔柯夫(Markov)预测思想出自数学家马尔柯夫的随机过程研究。当前马尔柯夫预测原理已普遍运用于土地格局演变研究中^[24]。在土地覆盖演变研究中,某时期的用地类别可以与 Markov 过程中的可能状况对照起来,它只与其前一时期的用地类别相关。因此,以下公式可对土地演化状况进行预测^[25]:

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

式中: $S_{(t)}$, $S_{(t+1)}$ 分别为 t , $t+1$ 时刻的土地利用状态; P_{ij} 为土地利用类型转移概率矩阵,可用下列公式表达:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $0 \leq P_{ij} < 1$ 且 $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$; n 为土地利用类型。

元胞自动机模型(Cellular Automata, 简称 CA)是空间的相互影响及时间上的联系均为局部,并且时空关系、形态状况都分散的网格动力学理论^[26]。其公式如下:

$$S_{(t+1)} = f[S_{(t)}, N] \quad (3)$$

式中: S 为元胞有限离散的集合状态; t , $t+1$ 为不同的时刻; N 为元胞的领域; f 为局部空间的元胞转化规则。

Markov 模型具有时间序列推演的能力,而 CA 模型则具备预测复杂系统时空动态演进的优势,故综合两种模型能科学合理地推演景观格局的空间变化^[20]。

本文采用 Kappa 系数^[27]对土地格局演变预测的精度进行检测。其计算公式为:

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (4)$$

式中: P_o 为正确模拟的比例; P_c 为模型随机情况下的正确预测比例; P_p 为理想情况下正确预测的比例。经 IDRISI 软件评估,2015 年的 Kappa 系数为 0.86,印证该模型具有良好的预测效果,预测成果可信。基于此,进一步开展研究区 2025 年土地格局演变预测。

1.3.2 MCE 模型 多准则评价(Multi-criteria evaluation, 简称 MCE)是在不同的运筹法则下从一连串备选的策略里挑选出最优解的分析方法。其核心思想是如何统筹适宜性因子和约束条件两种决策规则^[28]。将 MCE 模型引入 CA-Markov 模型,利用 MCE 综合量化多种自然和社会经济因素,以补充 CA 转换规则的约束条件,改善模拟效果。本研究运用 MCE 模型中的加权线性合并法,其公式如下:

$$S = \sum w_i x_i \prod c_j \quad (5)$$

式中: S 为适宜性指数; w_i 为第 i 个适宜性因子的权重指数; x_i 为第 i 个适宜性因子的得分。通过 IDRISI 软件中的 Fuzzy 功能,将适宜性因子全部归一化至 0~255 数值内,数字越大代表适宜度越大; c_j 为约束条件 j 的数值,其值为 0 或 1,表示不流转或可流转。本文根据研究区的自然地理和社会经济现状,选择高程、坡度、与道路距离、与水域距离、与建设用地距离、GDP 和人口密度作为适宜性因子,参与制作后期的转移适宜性图。因为篇章限制,本文以建设用地为例,设置 2015 年的建设用地适宜性图集。具体如下:

基于研究区实际调查状况,选取模糊隶属度函数中的 S 型递减函数拉伸高程区间为 [20, 60] m,距建设用地距离区间为 [500, 3 000] m,人口密度区间为 [750, 900] 人/km²;选取 J 型递减函数拉伸坡度区间为 [5°, 15°],距道路距离区间为 [200, 1 000] m;选取 S 型递增函数拉伸距水域距离区间为 [100, 1 000] m,人均 GDP 区间为 [3 000, 7 800] 元/km²。

1.3.3 InVEST 模型 InVEST 模型的全称是生态系统服务和权衡的综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs),其重点是运用各种土地覆被类别的胁迫因子敏感度和外界威胁强度,根据胁迫因子的影响距离、空间权重等因素,将生境质量看作一个连续变量,以衡量生物多样性

性。具体计算过程如下^[29]：

$$Q_{xj}=H_j(1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}) \tag{6}$$

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{Y_r}\frac{w_r}{\sum_{r=1}^Rw_r}r_yi_{rxy}\beta_xS_{jr} \tag{7}$$

式中： Q_{xj} 为土地覆被类型 j 中栅格单元 x 的生境质量； H_j 为土地覆被类型 j 的生境适宜度； D_{xj}^z 为土地覆被类型 j 中栅格单元 x 的生境胁迫水平； k 为半饱和系数，通常取 D_{xj}^z 最大值的一半； x 为常数。 R 为胁迫因子数； y 为胁迫因子 r 的所有栅格单元； Y_r 为胁迫因子 r 所占栅格单元总数； r_y 为栅格单元 y 中的胁迫因子 r ； 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，公式如下：

$$i_{rxy}=1-\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \tag{8}$$

$$i_{rxy}=\exp\left[-\frac{2.99}{d_{rmax}}d_{xy}\right] \tag{9}$$

式中： d_{xy} 为栅格单元 x 与栅格单元 y 之间的直线距

离； d_{rmax} 为胁迫因子 r 的最大影响距离； w_r 为胁迫因子 r 的权重； β_x 为栅格单元 x 的合法可达性，1 表示极容易达到； S_{jr} 为土地覆被类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性，取值 0~1，该值越接近 1 表示越敏感。

运行生境质量模型需要的主要参数包括威胁因子影响的距离及其权重、生境对各威胁因子的适宜度和敏感性。结合相关文献^[30-31]，选择对生态景观影响较大的耕地、居民点、其他建设用地、城镇用地、铁路、高速公路定义为生态胁迫因子，并参考前人研讨^[32-33]对各威胁因子的适宜度与敏感性进行赋值，见表 1—2。

表 1 威胁因子属性

威胁因子	最大影响距离/km	权重	空间衰退类型
耕地	1.5	0.6	线性
农村居民点	2.5	0.4	指数
城镇用地	6.0	0.8	指数
其他建设用地	1.0	0.5	指数
高速公路	6.0	0.6	线性
铁路	5.0	0.3	线性

表 2 景观类型及景观类型对威胁的敏感性

土地利用类型	生境适宜度	耕地	农村居民点	城镇用地	其他建设用地	高速公路	铁路
耕地	0.4	0.0	0.35	0.5	0.3	0.50	0.5
林地	1.0	0.8	0.85	1.0	0.8	0.90	0.8
草地	0.6	0.5	0.35	0.6	0.5	0.70	0.7
水域	1.0	0.7	0.75	0.9	0.9	0.75	0.6
建设用地	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.0
未利用地	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.0

2 结果与分析

2.1 研究区土地利用及其转移变化

研究区土地利用类型以耕地、林地及水域为主，共占据研究区全部面积的 90% 左右，其中耕地占比最大，约占 55% (图 1)。1995—2015 年，区内景观格局演变十分显著，其中变动最大的是耕地和建设用地。各地类面积上的变化主要体现在耕地、林地和草

地逐年削减，其中，耕地面积以每年 0.2% 的速度不断缩减，共缩减 2.935 5 万 hm^2 ，耕地占补工作任重道远。林地和草地也出现缩减的情况，缩减速度比较平缓。建设用地逐年扩张，20 a 间涨幅高达 96.44%，增长面积为 2.951 5 万 hm^2 ，说明在城镇化规模不断扩大、人口剧增、经济水平提高的现实环境下，建设用地扩张的需求不断增加。未利用地缩减速度较为平缓。水域面积总体上升 (图 2)。

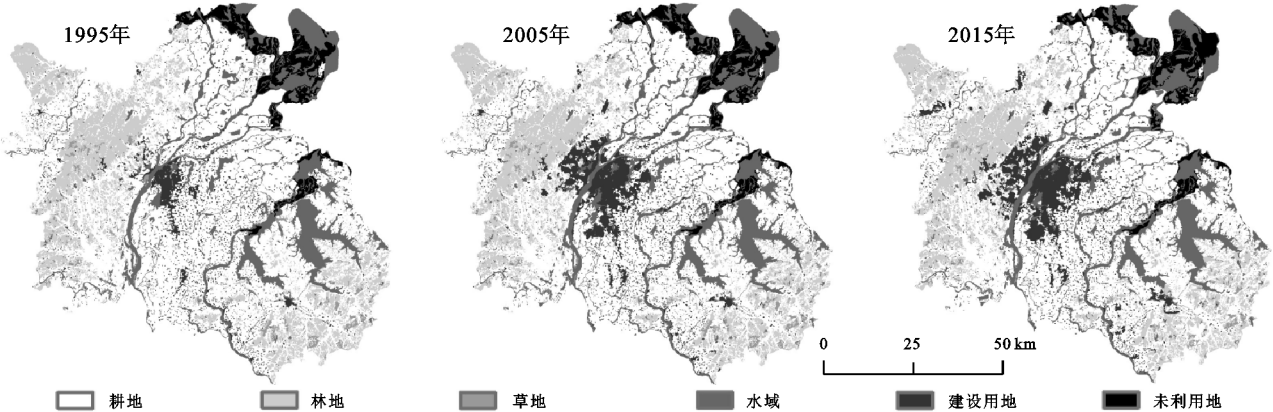


图 1 南昌市 1995 年、2005 年、2015 年景观类型的空间分布

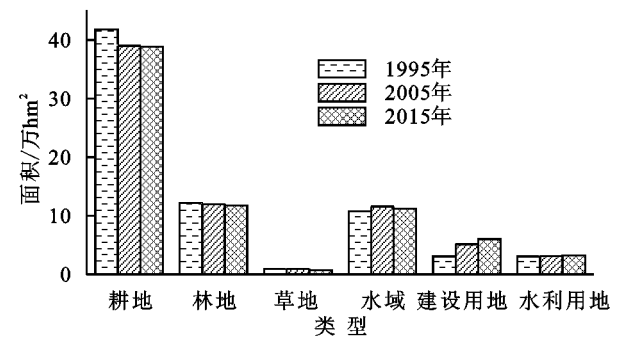


图2 1995年、2005年、2015年各景观类型的面积

由表3可知,1995—2005年,耕地是研究区转出最多的土地利用类型,净转出5.8403万hm²,主要转向水

域(3.2878万hm²)和建设用地(4.7612万hm²),退耕还湖和城市建设用地扩张是耕地转出的主要缘故;转出面积次之的土地利用类型是林地,净转出1.7475万hm²,主要净转向耕地(0.4202万hm²)和建设用地(1.4291万hm²),表明毁林开荒的现象仍然存在。面积明显扩增的地类为水域1.6657万hm²和建设用地5.9513万hm²,水域扩增的面积大多来自于耕地(3.2878万hm²),反映出退耕还湖工作行之有效;同时,转入最多的土地利用类型是建设用地,建设用地的转入中69.9%的面积来自耕地,反映出建设用地的扩张主要是通过侵占耕地实现的。草地和未利用地面积轻微波动。

表3 研究区土地利用转移矩阵

		2005年							hm ²
年份	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	转出	净转出
1995	耕地	305595	1238	916	32878	47612	1166	83811	58403
	林地	4202	99495	334	1423	14291	54	20304	17475
	草地	310	662	7227	444	603	0	2019	656
	水域	14146	778	112	93473	5588	1261	21885	—16657
	建设用地	3551	82	1	2118	43069	2837	8589	—59513
	未利用地	3200	69	0	1679	8	26124	4956	—362
	转入	25408	2829	1363	38542	68102	5318		
		2015年							
年份	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	转出	净转出
2005	耕地	318526	9873	659	11669	46976	43	69220	35344
	林地	15814	93681	642	463	6518	6	23443	8893
	草地	805	1714	4921	93	49	0	2661	781
	水域	9033	2631	98	86935	3368	9548	24678	1822
	建设用地	8169	331	46	4179	47333	32	12756	—44235
	未利用地	54	1	434	6453	81	25352	7025	—2604
	转入	33876	14550	1879	22857	56992	9629		

2005—2015年,转出面积最大的地类依旧是耕地,净转出3.5344万hm²,减幅趋小,大部分转向建设用地(4.6976万hm²),其次转向水域(1.1669万hm²)和林地(0.9873万hm²),其和草地之间的转化基本相互抵消。林地减幅也趋小,共缩减0.8894万hm²,主要转向耕地(1.5815万hm²)和未利用地(0.6519万hm²)。草地面积微弱减小;水域较上一时段发生显著变化,由净转入3.2878万hm²变为净转出0.1823万hm²,鄱阳湖水面萎缩是首要原因,从而使得转出为未利用地的面积增加;建设用地继续扩张,净转入5.6993万hm²,但增速低于上一时段,建设用地的首要来源依旧是耕地,净转入4.6977万hm²。未利用地净转入0.2605万hm²,和水域之间的相互转移显著。

2.2 生境退化度分析

生境退化度的大小表达了该地类在目前监管水准下,受到胁迫因子作用水平的大小,从而反映出其生境退化与生境质量降低的概率大小。生境退化指数的取值范围为0~1,表示了当前土地利用的相对生境退化水平,其中1为高退化,0为低退化。

如图3所示,1995年、2005年及2015年生境退化指数的最大值依次为0.1411,0.1422,0.1473,呈逐年增长态势。在空间格局上,城市周边和各个流域的生境退化度相对较高,表明其生境具有较高潜在退化的可能性,建设用地的扩张吞噬城市周边的耕地,对生态形成了不可逆的毁坏。流域周边的生态状况尤其不堪一击,易遭受外部侵扰,生境退化状况更为严峻。此外,平原与梅岭接壤处的生境退化非常明

显,几乎连成一线。生境退化度相对较低的地区主要位于研究区东北部鄱阳湖区,该地区的主要景观类型是水域和滩涂沼泽,景观类型相对单一,受人类干扰

少,故生境质量退化并不突出。总的来说,南昌市 1995—2015 年城市化发展迅速,导致生境退化的趋势不断加剧。

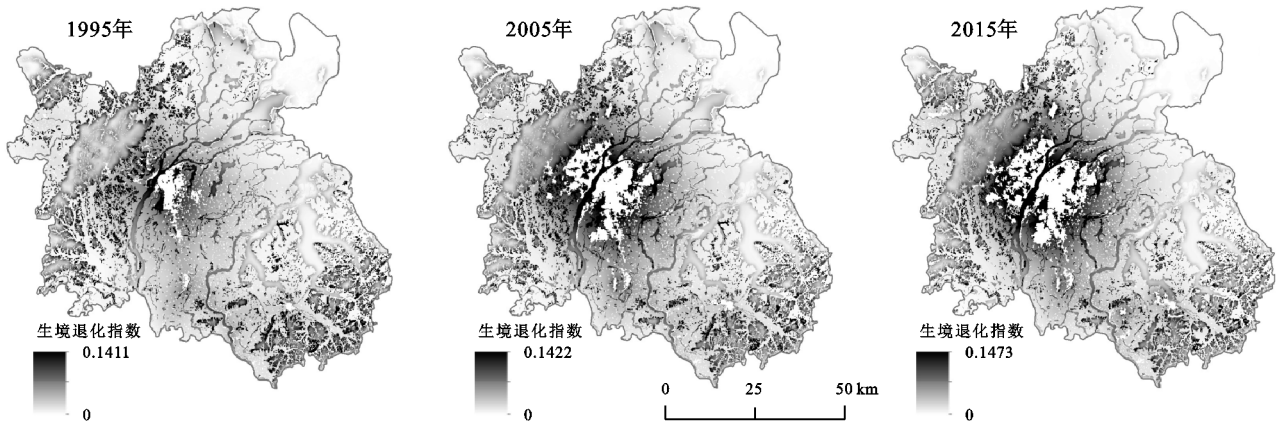


图 3 1995 年、2005 年、2015 年生境退化指数的空间分布格局

2.3 生境稀缺度分析

生境稀缺度可用来表征一个地区生态系统的稳定性水平。生境稀缺性数值越大,表明该地区土地利用格局演变越频繁,生态系统越不稳定,极易受到外界侵扰;生境稀缺性数值越小,体现出该地区生态系统较为稳定,不易受到外界侵扰。

从图 4 中可看出,研究区两个时期生境稀缺性分值的最低值由 -0.688 8 降为 -0.964 4,最高值由 0.066 3 上升至 0.209 4,表明研究区的生境稀缺性数值范围扩大,即生境斑块的破碎化水平差别变大。

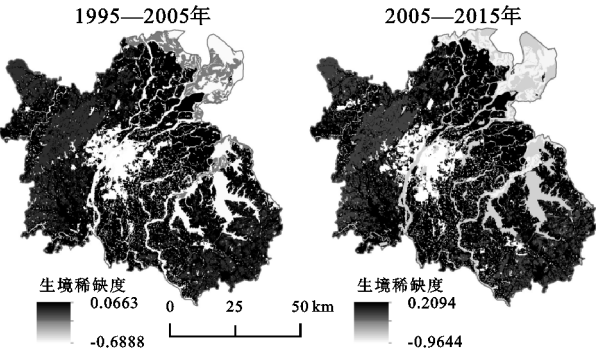


图 4 1995—2005 年、2005—2015 年生境稀缺度的空间分布格局

内生境稀缺性分值最高的土地利用类型主要是耕地,由于建设用地扩张,致使耕地遭受侵占的可能性变大,耕地的景观整体性被打破,稳定性降低;研究区西部和东南部林地景观的生境稀缺度较高,主要是遭到附近人工景观及人类活动的影响,林地的破碎化水平增高,稳定性下降。生境稀缺性较低的土地利用类型主要是建设用地和水域;此外,研究区东北部鄱阳湖的滩涂沼泽等未利用地的生境稀缺性由中等变为较低,该地区生境稀缺性分值的下降反映了近年来鄱阳湖自然保护区生态恢复与建设的成效。为避免生境继续退化,政府和生态管理者对耕地、林地和草地进行统筹规划和生态建设迫在眉睫。

2.4 生境质量分析

生境质量指数是指环境提供给适合物种和种群持续生存和繁衍所需条件和资源能力的大小。生境质量指数的范围是 0~1,其值越大,生境质量越高,生物多样性越高。为深入探究区内土地利用格局演变对生境质量的作用,将运行模型得到的 3 期生境质量结果划分为低(0~0.2)、较低(0.2~0.3)、中等(0.3~0.4)、较高(0.4~0.8)和高(0.8~1)5 个级别,依次计算 3 个时期各级别生境质量面积和其所占百分比(表 4,图 5)。

将图 4 和图 1 景观类型分布图对比分析可知,区

表 4 各等级生境质量的面积和百分比

等级	取值范围	1995 年		2005 年		2015 年	
		面积/万 hm ²	所占比例/%	面积/万 hm ²	所占比例/%	面积/万 hm ²	所占比例/%
低	0~0.2	6.1491	8.56	8.3151	11.57	9.2899	12.93
较低	0.2~0.3	39.5481	55.05	37.4760	52.16	37.1181	51.66
中	0.3~0.4	2.2179	3.09	1.5215	2.12	1.7134	2.38
较高	0.4~0.8	0.9609	1.34	0.9260	1.29	0.7484	1.04
高	0.8~1	22.9699	31.97	23.6073	32.86	22.9761	31.98

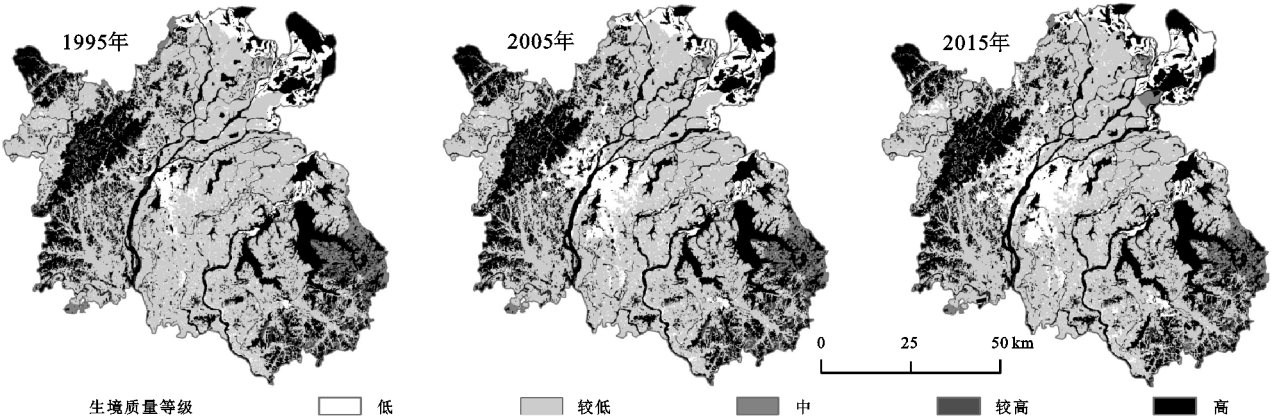


图5 1995年、2005年、2015年生境质量的空间分布格局

结果表明:(1) 从时间变化来看,低等级生境占比在 20 a 内一直增加,而较低等级生境占比在 20 a 内一直下降,但这两种生境后 10 a 的变化幅度均要大于前 10 a;中等级生境占比先大范围减少后微弱增加,整体上表现缩减的局面;较高等级生境占比也出现缩减态势;高等级生境占比经历了一个先增加后减少的轻微波动,总体变化不明显。以上变化是一个较高、中、较低等级生境向低等级生境过渡的过程,生境质量处于退化的过程中,且前 10 a 的退化比后 10 a 更为严重。(2) 从空间格局来看,其空间格局演变存在明显的规律性,生境质量高等区所占面积比重较小,主要分散在南昌市西北部的梅岭、东北部的鄱阳湖以及东南部的军山湖、青岚湖等。著名的梅岭国家森林公园就位于梅岭,该地带以林地为主,层峦叠嶂,人迹罕至,生物多样性丰富,因此其生境质量较高;鄱阳湖、军山湖以及青岚湖具备保护景观生物多样性、补充地下水的作用和优势,在当地政府的保护下,此区域的生境质量也较好。生境质量低等区主要分布于南昌中部赣江两岸的红谷滩区、东湖区、西湖区以及青山湖区,上述地区与南昌市中心紧密相连,是南昌市的经济繁华地带,人类活动频繁,建设用地恣意蔓延,大面积耕地被侵占,致使该地区生境质量差;生境质量较差区连片散布在大部分平原区,该区域的主要土地利用类型是耕地,农村居民点聚集于此,生态环境毁坏严重。

2.5 土地利用格局预测

经 IDRISI 软件评估,2015 年的 Kappa 系数分别为 0.86,印证该模型具有良好的预测效果,预测成果可信。基于此,本研究进一步开展研究区 2025 年土地格局演变预测。

对南昌市 2025 年土地利用格局(图 6)进行分析,得到土地利用类型预测结果。由表 5 可以看出,南昌市 2015—2025 年主要土地类型的演变与

2005—2015 年的演变趋势基本一致,耕地、林地、草地、水域面积持续下降,建设用地和未利用地面积持续增长。其中,耕地变化率较 2005—2015 年时段增长显著,耕地占补工作还将面临较大的压力;建设用地在所有景观类型中变化率最大,2015—2025 年的变化率为 73.54%,增速显著高于 2005—2015 年时段,建设用地扩张形势严峻;未利用地面积略微增加,2015—2025 年时段的变化率为 7.54%。

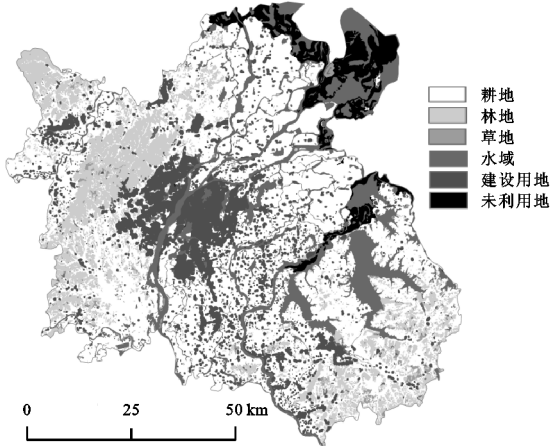


图6 南昌市 2025 年景观类型预测

表5 南昌市 2005—2025 年景观类型变化特征

土地利用类型	2025 年	2005—2015 年		2015—2025 年	
	预测面积/ 万 hm ²	变化面积/ 万 hm ²	变化率/%	变化面积/ 万 hm ²	变化率/%
耕地	35.2463	-0.1660	-0.43	-3.5926	-9.25
林地	10.7074	-0.2675	-2.23	-1.0454	-8.89
草地	0.6679	-0.1667	-17.96	-0.0935	-12.28
水域	11.0957	-0.3747	-3.23	-0.1266	-1.13
建设用地	10.4329	0.8435	16.32	4.4210	73.54
未利用地	3.5032	0.1301	4.16	0.2456	7.54

2.6 生境质量预测

基于 CA-Markov 和 InVEST 模型获得南昌市 2025 年的生境质量等级分布(图 7)和生境质量等级占比(表 6)。由表 6 可以看出,南昌市 2015—2025

年生境质量的演变规律与 2005—2015 年基本一致，但总体生境质量降低幅度增加。至 2025 年，高等级及较高等级生境占比持续减少，分别降低了 1.57%，0.17%，主要向低等级和中等级生境转变。低生境质量等级区域多为建设用地，聚集在南昌中部赣江两岸的红谷滩区、东湖区、西湖区以及青山湖区，该地区生境质量进一步下降；尽管较低等级生境占比较 2015 年有所下降，但不可小觑的是低等级生境占比大幅上升至 19.67%，增加面积为 6.74%，上述现象反映出 2015—2025 年区内生境质量明显恶化，主要是由于 2015—2025 年建设用地和未利用地等生境适宜性较差的土地利用类型急剧扩张，而生境适宜性较好的林地以及草地面积缩减。

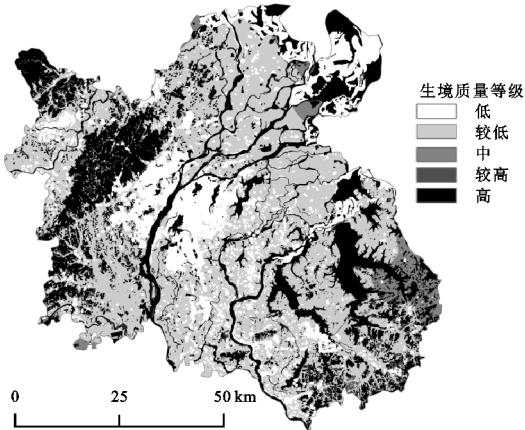


图 7 南昌市 2025 年生境质量分布预测

表 6 2015—2025 年不同等级生境质量面积和百分比的变化

生境质量等级	2015 年		2025 年		2015—2025 年	
	面积/ 万 hm ²	所占 比例/%	面积/ 万 hm ²	所占 比例/%	变化面积/ 万 hm ²	变化率/%
低	9.2899	12.93	14.1289	19.67	4.84	6.74
较低	37.1181	51.66	33.5012	46.63	-3.62	-5.03
中	1.7134	2.38	1.7451	2.43	0.03	0.05
较高	0.7484	1.04	0.6250	0.87	-0.12	-0.17
高	22.9761	31.98	21.8461	30.41	-1.13	-1.57

3 讨论

3.1 生境质量变化原因

随着南昌市城市化进程加快，人地矛盾不断加大、城镇扩张等问题会对区域生态环境带来一定的破坏。谋求社会繁荣和经济发展的同时也要关注维护生态系统稳定，而生境质量是权衡某一区域生态系统是否稳定的关键因素。分析生境质量的未来趋势，可以为政府制定维护生态环境，防止区域生态恶化的土地利用政策提供科学依据。本文运用 CA-Markov 模型以及 InVEST 模型模拟了南昌市内各土地利用

类型的演变特征，评价了南昌市历史、现状及未来的生境质量，剖析了景观格局演变对生境造成的影响。本研究发现，研究区 1995—2025 年期间生境质量显著下降。

在土地利用方面，研究区的演化规律体现为生境适宜度较高的林地、草地和水域的大幅缩减和生境适宜度较高的建设用地的急剧扩张。建设用地作为生境质量威胁源在 1995—2025 年显著扩张，特别是以赣江两岸的东湖区、西湖区、红谷滩区以及青山湖区为代表的中心城区的扩张尤为明显，上述地区继续侵扰生境适宜性较优的林地、水域和草地，进而造成威胁源规模和影响范围持续扩大，致使区内生境质量持续恶化。

在地形方面，南昌市地貌以平原为主，辽阔的水域和低丘为辅，研究区内仅有西北部的梅岭国家森林公园内是丘陵地区，整体地形较为平缓。从地形地貌的角度来看，南昌市建设用地开发利用难度较低，政府若不对其进行管控极易形成混乱扩张的局面，而丘陵地区由于人迹罕至及非自然景观少，故其生境质量较好。

从生境质量的空间分布来看，生境质量指数在 0.8 以上的区域主要出现在西北部的梅岭、东北部的鄱阳湖、贯穿研究区的赣江、抚河等流域以及东南部的军山湖、青岚湖，特别是梅岭国家森林公园，生物多样性丰富。鄱阳湖、军山湖以及青岚湖为南昌市重要的湿地区域，具有得天独厚的优良生态环境，同时上述地区一直是生态保护的重点监管区域，故具有较高的生境质量。

南昌市在追求社会经济发展的同时，如果不改变现有的土地利用模式和结构，工业化和城市化的加快，建设用地的剧增，林地和草地的缩减，生境质量将持续下降。到 2025 年，南昌市低等级生境占比大幅上涨至 19.67%，且低等级生境区域多是建设用地，今后，这些领域需要重点监测和防范，尽量避免生境恶化。

3.2 对策与建议

研究南昌市土地利用演变对生境质量的影响，对优化南昌市景观格局及维护区域生态安全至关重要。随着城市化进程加速，南昌市生境质量显著下降。为防止区域生态恶化，应采取措施平衡好经济发展与生态保护之间的矛盾，维护南昌地区生态安全。

(1) 建设用地的急剧扩张是生境质量下降的首要原因，应通过规划方式科学管控建设用地规模，在符合国土空间规划的规模、布局及城镇开发边界管控要求的

原则上,大力挖掘现有建设用地潜力,严控建设用地供应,防止城市建设用地的“摊大饼”式扩展。

(2) 生境退化与林地、草地的缩减息息相关,因此设立“林长制”,落实划片监管林地、草地等生境适宜度较高的地类,健全生态屏障区资源责任系统;在严守耕地红线的基础上大力开展退耕还林、还草等生态修复工作,改善当前生态环境。

(3) 从生境退化度的角度来说,城市附近和流域周围的生境退化状况不容乐观,在严格管控城市建设用地规模的基础上,也要加强流域保护,推进生产方式、生活方式绿色化,建立健全流域绿色发展机制,实现流域社会经济与生物多样性保护的协调发展,以达到生态平衡及永续发展的目标。

4 结论与展望

(1) 1995—2015 年,研究区耕地、林地和草地表现为逐年缩减态势,其中,耕地缩减速率较大。建设用地增长速度最快,20 a 间增长率高达 96.44%,说明在城镇化规模不断扩大、人口剧增、经济水平提高的现实环境下,建设用地需求量跃升,耕地占补与建设用地扩张之间冲突将会日益显著。

(2) 南昌市 2015—2025 年主要景观类型的演变与 2005—2015 年的演变规律基本一致,耕地、林地、草地、水域面积持续减少,建设用地和未利用地面积不断扩张。耕地变化率较 2005—2015 年时段增长显著,耕地占补工作还将面临较大的压力。建设用地增速显著高于 2005—2015 年,建设用地扩展形势日益严峻。

(3) 1995—2025 年研究区生境质量明显退化,建设用地等生境适宜度较低的地类高速扩张,进而侵扰林地、水域和草地等生境质量优质地区,致使威胁源规模和影响范畴急剧扩大,景观破碎度水平升高,稳定性降低,这将引起研究区生境质量持续下降。

由于土地利用格局演变是一个复杂的历程,不仅受到该区域地理条件的影响,而且受到土地利用政策等人类干预的作用,未来有必要探究政策干预对土地利用格局演变的作用,以提高预测精度。此外,InVEST 模型只考虑了研究区内部各胁迫因子对生境的影响,而处于研究区边沿地带的生境还受到研究区边界以外其他胁迫因子的影响,这可能使评估结果存在一定误差;未来应重视采集研究区边沿地带的威胁因子数据。尽管如此,本研究为改善当前生态环境、推动南昌地区可持续发展提供了科学借鉴。

参考文献:

- [1] Mooney H A, Duraipappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013,110(S1):3665-3672.
- [2] Hunsaker C T, O'Neill R V, Jackson B L, et al. Sampling to characterize landscape pattern[J]. Landscape Ecology, 1994,9(3):207-226.
- [3] Lambin E F, Geist H J, Lepers E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2003,20(28):49205-49241.
- [4] Stephenne N, Lambin E F. Scenarios of land-use change in Sudano-sahelian countries of Africa to better understand driving forces[J]. Geojournal, 2004,61(4):365-379.
- [5] 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.
- [6] Masoudi M, Tan P Y, Fadaei M. The effects of land use on spatial pattern of urban green spaces and their cooling ability[J]. Urban Climate, 2021,35.D0I:10.1016/j.uclim.2020.100743.
- [7] Valero E, Álvarez X, Picos J. An assessment of river habitat quality as an indicator of conservation status: A case study in the Northwest of Spain[J]. Ecological Indicators, 2015,57:131-138.
- [8] 霍思高,黄璐,严力蛟.基于 SolVES 模型的生态系统文化服务价值评估:以浙江省武义县南部生态公园为例[J].生态学报,2018,38(10):3682-3691.
- [9] Boumans R, Roman J, Altman I, et al. The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems[J]. Ecosystem services, 2015,12:30-41.
- [10] 刘玮,辛美丽,周健,等.基于生境适宜性指数模型的俚岛海黍子生境层级分布[J].应用生态学报,2021,32(3):1061-1068.
- [11] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(19):7565-7570.
- [12] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of the total environment, 2016,540:63-70.
- [13] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape

- scales[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009,7(1): 4-11.
- [14] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013,165:6-18.
- [15] 高庆彦,潘玉君,刘化.基于 InVEST 模型的大理州生境质量时空演化研究[J].*生态与农村环境学报*,2021,37(3):402-408.
- [16] Mokarram M, Pourghasemi H R, Hu M, et al. Determining and forecasting drought susceptibility in southwestern Iran using multi-criteria decision-making (MCDM) coupled with CA-Markov model[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,781:DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.146703.
- [17] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J].*农业机械学报*,2021,52(4):159-170,207.
- [18] Tang F, Fu M, Wang L, et al. Land-use change in Changli County, China: Predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality[J]. *Ecological Indicators*, 2020,117:DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106719.
- [19] 胡波洋,张蓬涛,白宁,等.基于 CLUE-S 和 GMOP 模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟[J].*中国农业资源与区划*,2020,41(7):173-182.
- [20] da Cunha E R, Santos C A G, da Silva R M, et al. Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil[J]. *Land Use Policy*, 2021,101:DOI:10.1016/j.landusepol.2020.105141.
- [21] Jenerette G D, Wu J. Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona-Phoenix region, USA [J]. *Landscape Ecology*, 2001,16(7):611-626.
- [22] Nourqolipour R, Shariff A R B M, Balasundram S K, et al. A GIS-based model to analyze the spatial and temporal development of oil palm land use in Kuala Langat district, Malaysia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73(4):1687-1700.
- [23] 许小娟,刘会玉,林振山,等.基于 CA-MARKOV 模型的江苏沿海土地利用变化情景分析[J].*水土保持研究*,2017,24(1):213-218,225.
- [24] 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.
- [25] Guan D J, Li H F, Inohae T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model [J]. *Ecological Modelling*, 2011,222(20/22):3761-3772.
- [26] 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.
- [27] Lin W, Sun Y, Nijhuis S, et al. Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,739:DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139899.
- [28] Wang Z, Ya S, Pu H, et al. Simulation of spatiotemporal variation of land use in mountainous-urban fringes based on improved CA-Markov model[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(16):239-248.
- [29] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J].*生态学报*,2020,40(9):2895-2906.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 陈妍,乔飞,江磊.基于 In VEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].*北京大学学报:自然科学版*,2016,52(3):553-562.
- [33] 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.