

湖南省重点生态功能区生境质量时空变化及其预测

郑云有¹, 刘艳婷¹, 姚鹏², 谢显军², 张光杰¹, 邓楚雄¹

(1.湖南师范大学 地理科学学院, 湖南 长沙 410081; 2.湖南省国土资源规划院, 湖南 长沙 410007)

摘要: [目的] 对湖南省南岳重点生态功能区土地利用变化及生境质量开展研究, 揭示人类活动导致的林地减少与生境质量之间的关系, 为该地区生态保护与经济建设的协调发展提供理论支持。[方法] 基于2009, 2012, 2015, 2018 和 2021 年 5 期土地利用变更数据得到土地利用转移矩阵, 借助 InVEST 模型和 CA-Markov 模型分析预测南岳重点生态功能区土地利用结构及生境质量时空分布特征, 并运用双变量空间自相关分析方法探究林地与生境质量两者的相关性。[结果] ①2009—2021 年研究区林地和耕地主要转出为建设用地; 建设用地面积增加 15.87%, 其中 45.37%, 36.25% 分别由林地和耕地转入。②2009—2021 年该地区生境质量呈现出“先快后慢”的持续下降趋势和“西部高, 东南低”的空间分布特征。③研究区林地与生境质量在空间分布上的正相关性逐渐增强, 以林地和优等生境质量的高聚集为主要表现类型。④南岳区 2025 年建设用地将增加 4.36%, 2030 年建设用地面积将达到 1 563.53 hm²; 未来生境质量将缓慢下降。[结论] 生境质量变化与人类活动干扰导致的林地减少, 建设用地扩张紧密联系, 应加强对南岳重点生态功能区的资源与环境管控。

关键词: 生境质量; InVEST 模型; CA-Markov 模型; 双变量空间自相关; 湖南省南岳区; 土地利用变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0347-10

中图分类号: X826

文献参数: 郑云有, 刘艳婷, 姚鹏, 等. 湖南省重点生态功能区生境质量时空变化及其预测[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 347-356. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.043; Zheng Yunyou, Liu Yanting, Yao Peng, et al. Spatial and temporal changes and prediction of habitat quality in key ecological function area of Hu'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 347-356.

Spatial and Temporal Changes and Prediction of Habitat Quality in Key Ecological Function Area of Hu'nan Province

Zheng Yunyou¹, Liu Yanting¹, Yao Peng², Xie Xianjun², Zhang Guangjie¹, Deng Chuxiong¹

(1.School of Geographical Sciences, Hu'nan Normal University, Changsha, Hu'nan

410081, China; 2.Hu'nan Provincial Land and Resources Planning Institute, Changsha, Hu'nan 410007, China)

Abstract: [Objective] Land use change and habitat quality in Nanyue key ecological function area of Hu'nan Province were studied to reveal the relationship between forest land reduction and habitat quality caused by human activities, in order to promote the coordinated development of ecological protection and economic construction in this area. [Methods] The land use transfer matrix was obtained based on the land use change data of 2009, 2012, 2015, 2018 and 2021, and the spatial-temporal distribution characteristics of land use structure and habitat quality in Nanyue key ecological function area were analyzed and predicted by InVEST model and CA-Markov model. Bivariate spatial autocorrelation was used to explore the correlation between forest land and habitat quality. [Results] ① From 2009 to 2021, forestland and cultivated land in the study area were mainly transferred to construction land. The area of construction land increased by 15.87%, among them, 45.37% and 36.25% were transferred from forestland and cultivated land respectively. ② From 2009 to 2021, the spatial distribution of habitat quality in this region was higher in the west and lower in the southeast. ③ The positive correlation between the spatial distribution of forest land and habitat quality in the

收稿日期: 2022-02-17

修回日期: 2022-04-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“水生态系统服务流网络对流域‘三生’空间博弈变化的响应研究”(42171258); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30448); 湖南省自然资源科研项目(2021G01)

第一作者: 郑云有(1965—), 男(汉族), 湖南省怀化市人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态环境与土地资源评价方面的研究。Email: 178806451@qq.com。

通讯作者: 邓楚雄(1974—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态系统服务与资源环境经济方面的研究。Email: dcxppd@hunnu.edu.cn。

study area gradually increased, and the high aggregation of forest land and excellent habitat quality was the main type. ④ The construction land in Nanyue District will increase by 4.36% in 2025 and reach 1 563.53 hm² in 2030. The quality of habitat will slowly decline in the future. [Conclusion] The change of habitat quality is closely related to the decrease of forestland and expansion of construction land caused by human disturbance. Therefore, resource and environment control should be strengthened in Nanyue key ecological function zones.

Keywords: habitat quality; InVEST model; CA-Markov model; bivariate spatial autocorrelation; Nanyue District Hu'nan Province; land use change

土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)是地球表面发生改变的表现之一,是影响区域生境质量变化的关键因素^[1],而土地利用结构预测也在建设用地扩张的背景下成为全球关注的热点问题^[2]。生境质量是指生态系统在一定的时间和空间中,能够提供个体和种群持续适宜的生存条件的能力^[3];其作为一切生态系统服务的重要基础,更是提升人类福祉的关键环节^[4]。近年来,众多学者运用 SolVES, InVEST, FLUS, CA-Markov, MaxEnt 等^[5-7]模型集中对城市、流域、县域尺度进行生境质量评价和土地利用变化预测。早期学者们主要以动植物为对象构建评价指标体系研究生境质量,随着数理模型方法及各种软件的发展与应用,生境质量的时空动态变化受到关注^[8],InVEST 模型的生境质量模块(habitat quality)是目前使用最多的生态系统服务评估模型^[9]。刘智方^[10]、刘春芳^[11]、王耕等^[12]结合土地利用转移矩阵和景观格局指数分析福建省、榆中县黄土丘陵区、老铁山自然保护区的生境质量时空格局,发现生境质量与社会经济发展、人类干扰强度存在一定联系。CA-Markov 模型结合了元胞自动机在空间上模拟复杂变化的能力和马尔科夫链在数量上长期预测的优势^[13-14],能够有效提高土地利用时空格局变化的模拟精度^[15],得到国内外学者一致认可。Praveen Subedi^[16]、Nourqolipour 等^[17]利用 CA-Markov 模型预测 2015 年美国佛罗里达州 Saddle Creek 流域及 2020 年马来西亚 Kuala Langat 地区油棕种植园的土地利用变化趋势;同时褚琳^[18]、武丹等^[19]结合 InVEST 和 CA-Markov 模型研究并预测武汉市和宁夏回族自治区中部干旱区未来土地利用结构及生境质量的时空演变特征。

中共十八大报告明确提出建设生态文明和美丽中国,需要加强环境管理和保护,坚持严格准入、限制开发,构建生态安全保护屏障。但目前学者们对生物资源丰富、发挥涵养水源作用的重点生态功能区生境质量研究较少,且没有将生境质量结果与土地利用类型中林地的空间相关性进行单独探讨。因此,本文以湖南省重点生态功能区且林地居多的南岳区作为研

究对象,在采用土地利用转移矩阵及 InVEST 模型分析土地利用变化和生境质量时空格局的基础上,引入双变量空间自相关方法探究生境质量结果与林地两者的空间分布关系,并运用 CA-Markov 模型预测未来土地利用结构和生境质量变化趋势,为该地区的土地利用管理和生态保护提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南岳区地处湖南省衡阳市北部(112°33'44"—112°46'34"E,27°11'29"—27°20'5"N),总面积 179.27 km²,现设一乡(寿岳乡)一镇(南岳镇)一街(祝融街道),总人口为 7.03 万。该区属于大陆性中亚热带季风湿润气候,年均气温 17.5℃,年日照 1 628.6 h,年平均降水量 2 153.4 mm;中部是衡山山脉的主峰祝融峰,由中部向东南与西北两侧逐渐放缓变平,形成中部高、两翼低的倒 V 地形。生态环境优良,资源丰富;有银杏、长白松、玉龙蕨等国家一级保护植物 21 种;黄腹角雉等珍稀濒危动物 28 种;森林覆盖率高达 76.2%。南岳区作为生态保护屏障地区,是湖南省“重点生态功能区”“国家级风景公园”“国家级自然保护区”,但近年来该地区占用林地资源发展建设问题较为严重。在生态文明背景下,探究并预测重点生态功能区的生境质量时空特征对促进资源环境与社会经济的协调发展具有重要借鉴和指导意义。

1.2 数据来源

研究采用衡阳市自然资源和规划局提供的 2009,2012,2015,2018 和 2021 年 5 期土地利用变更数据,参考土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017)及研究区实际情况将所有地类归并为耕地、林地、园地、草地、水域、建设用地、其他土地 7 个一级地类(表 1)。DEM 高程数据从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)下载,分辨率为 30 m。人口数据来源于《南岳区统计年鉴》,生境质量均值、空间自相关指数及土地利用预测数据由 ArcGIS, InVEST, IDRISI, GeoDa 等软件进行运算处理后得到。

表 1 南岳区土地利用分类体系

一级地类	二级地类	一级地类	二级地类
耕地	水田	水域	水库水面
	旱地		坑塘水面
林地	有林地		滩涂
	灌木林地	城镇用地	
	其他林地	建设用地	
园地	茶园	村庄用地	
	果园	公路用地	
草地	草地	其他土地	裸地
			设施农用地

2 研究方法

2.1 土地利用转移矩阵

利用 ArcGIS 中的相交工具,将 2009, 2012, 2015, 2018 和 2021 年 5 期土地变更调查数据进行叠加分析并导出 Excel 表,借助数据透视表构建土地利用转移矩阵,分析南岳区不同时段各土地利用类型之间的转入、转出去向及面积大小。

2.2 InVEST 模型

InVEST 模型通过模拟不同土地覆被情景下生态系统服务的变化情况,将生态系统服务功能评价结果以栅格图的形式表现出来,其主要包括陆地、海洋和淡水生态系统评估 3 大模块^[20]。InVEST 模型的 Habitat Quality 模块是以土地利用数据为基础,根据各胁迫因子数据、生境类型的生境适宜性以及各胁迫因子的敏感性计算出生境质量指数来表征研究区土地利用动态变化与生境质量状况的关系^[21]。其计算的具体公式为:

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

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格 x 中的生境质量; D_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格 x 中的总威胁水平; H_j 表示土地利用类型 j 的生境适宜性。 k 为半饱和系数,取 Q_{xj} 试运行 1 次后所得到的最大值的 $1/2$; z 为模型默认参数。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (\omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

式中: r 为胁迫因子; y 为 r 威胁的栅格数; Y_r 为胁迫因子 r 所占的 1 组栅格数; ω_r 为胁迫因子 r 的权重; r_y 为栅格 y 的胁迫因子值; i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子 r 对生境栅格 x 的威胁度; β_x 为栅格 x 的可达性水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性; i_{rxy} 由以下计算公式得到:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (3)$$

式中: d_{xy} 为栅格与栅格之间的直线距离; d_{rmax} 为胁迫因子的最大影响距离。

胁迫因子的最大影响距离。

生境质量的取值范围为 $0 \sim 1$; 分值的高低反映了在威胁源的影响下生境质量的好坏,得分越高,表明其生境质量越好;反之,越差。依据 InVEST 模型手册中生态因子的划分标准并结合研究区实际情况,本文选取了水田、旱地、公路用地、城镇用地、村庄用地 5 种人类活动较为集中、容易对生境质量产生影响的土地利用类型作为生境威胁因子;并选取了受人类活动干扰较少的有林地作为生境。以模型推荐值为基础,参考包玉斌^[22]、张学儒^[23]、吴哲^[24]、王军等^[25]的研究以及专家意见进行赋值,确定各威胁因子及其最大影响距离、权重及衰退类型(表 2)、不同土地利用类型的生境适宜度及其对不同威胁因子的相对敏感程度(表 3)。通常情况下,越接近自然生态环境系统的生境适宜性越高,敏感性相对较低,用 $0 \sim 1$ 表示。该值越大,就代表生境对威胁因子敏感性越强。

表 2 威胁因子及其最大影响距离、权重及衰退类型

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰退类型
水田	1	0.2	线性衰退
旱地	1	0.3	线性衰退
公路用地	2	0.65	线性衰退
城镇用地	4	0.75	指数衰退
村庄用地	3	0.6	指数衰退

表 3 生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度

土地利用类型	生境适宜度	相对敏感程度				
		水田	旱地	公路用地	城镇用地	村庄用地
有林地	1	0.4	0.2	0.6	0.8	0.7
灌木林地	0.8	0.3	0.2	0.5	0.6	0.5
其他林地	0.9	0.3	0.3	0.4	0.7	0.6
茶园	0.5	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3
果园	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3
草地	0.6	0.2	0.1	0.4	0.7	0.6
水库水面	0.7	0.5	0.4	0.4	0.6	0.4
坑塘水面	0.7	0.3	0.3	0.4	0.6	0.5
滩涂	0.6	0.3	0.2	0.4	0.6	0.5
裸地	0	0	0	0	0	0
设施农用地	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2

2.3 双变量空间自相关

空间自相关分析可反映变量在空间上的分布特征及集聚性,分为全局空间自相关和局部空间自相关。Anselin 提出的双变量空间自相关 (Bivariate Moran's I) 能够探索多个变量在空间分布上的相关性^[26]。

双变量全局空间自相关是验证相关变量在整个研究区域的空间分布聚集趋势^[27],从土地利用类型

和生境质量空间分布结果来看,它们之间具有高度的相关性,运用全局 Moran's I 分析土地利用类型中比例最大且作为生境的林地与生境质量结果的空间关联,计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (4)$$

式中: n 表示研究的空间单元个数; W_{ij} 为空间单元 i 和 j 的空间权重矩阵; x_i, y_j 分别是自变量、因变量在空间单元 i 和 j 的观测值; s 为观测样本 x_i 的方差。Global Moran's I 取值范围为 $-1 \sim 1$,若指数大于 0,则表示空间单元存在正相关关系,且越接近 1,聚集程度越高;若指数趋向于 0,则表示该空间单元是随机分布,不具备空间相关性;若指数小于 0,则表示空间单元属性呈负相关,且越接近 -1 ,离散程度越高。

双变量局部空间自相关是衡量研究区域内各变量单元与其邻近单元之间的相关性,局部 Moran's I 计算公式为:

$$I_i = z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j \quad (5)$$

式中: I_i 代表空间单元自变量与因变量的局部空间自相关指数; z_i, z_j 都是方差标准化的单元观测值。根据 Local Moran's I 指数形成 4 种聚类模式,并由此组成基于 z 检验的 LISA(local indications of spatial association)分布图来呈现局部区域单元的关联性^[28]。聚类模式分为高高(HH)聚集,即林地与优等生境质量区;低低(LL)聚集,即非林地与低生境质量区;高低(HL)聚集,即林地与低生境质量区;低高(LH)聚集,即非林地与优等生境质量区。

2.4 CA-Markov 模型

2.4.1 元胞自动机模型 CA(元胞自动机)是由元胞及其状态、邻域和转换规则 4 部分组成的一个时间、空间、状态都呈现离散特征的网络动力学模型,它按照定义的转换规则进行更新,模拟复杂系统时空演化过程^[29]。其表达式为:

$$S_{(t+1)} = f[S_{(t)}, N] \quad (6)$$

式中: S 为元胞有限、离散的状态集合; $t, t+1$ 表示不同时刻; N 为元胞的邻域; f 为局部空间的元胞转换规则。

2.4.2 马尔柯夫模型 Markov 链是基于随机过程理论预测事件发生概率常用的一种方法,侧重于土地利用变化数量上的预测,但无法表达空间分布^[30]。它是通过矩阵分析当前状态以及变化趋势,对未来的可能性进行模拟,计算公式为:

$$S_{t+1}'' = P_{ij} \times S_t'' \quad (7)$$

式中: S_t'', S_{t+1}'' 分别为 $t, t+1$ 时刻的系统状态; P_{ij} 为状态转移概率。确定状态转移概率矩阵是该模型研究的关键步骤,计算公式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: n 表示土地利用类型; P_{ij} 表示土地利用类型 i 转变为土地利用类型 j 的转移概率,矩阵中每行为土地利用类型向其他类型转出的概率,每列为土地利用类型由其他类型转入的概率。

2.4.3 CA-Markov 模型 CA-Markov 模型将空间维度和时间维度分析优势结合起来,可以更加精准地模拟长期且复杂的土地时空变化^[31]。本文使用 IDRISI 软件中的 CA-Markov 模块来预测研究区未来土地利用格局。主要步骤为:①将 2009, 2012, 2015, 2018 和 2021 年 5 期土地利用栅格数据转换成 IDRISI 软件可识别的 .rst 栅格数据格式,然后对其进行重分类处理;利用 Markov 模块得到土地利用转移概率矩阵、面积矩阵和一系列条件概率图像。②结合研究区高程、坡度等实际情况制定 CA 模型转换规则,将各地类的适宜性图像通过 Collection editor 制成图集。③设置起始时刻和 CA 循环次数,使用 5×5 的滤波器模拟土地利用格局。运用 Crosstab 计算工具对预测图与实际图进行精度检验,得到 2012, 2015, 2018 和 2021 年的 kappa 系数均大于 0.91;说明模拟结果与实际情况较为吻合,可运用此模型对未来土地利用格局进行预测。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

从土地利用变化数量上看,2009—2021 年,研究区林地和耕地减少的面积最多(表 4)。其中林地面积共减少 73.88 hm^2 ;耕地面积由 $2\,329.82 \text{ hm}^2$ 减少至 $2\,256.12 \text{ hm}^2$,减少率为 3.16%。然而,因研究期内建成区的扩张,南岳重点生态功能区建设用地面积逐年增长,由 $1\,241.15 \text{ hm}^2$ 增加至 $1\,438.10 \text{ hm}^2$,共增加 196.95 hm^2 ,增长率为 15.87%。从土地利用变化空间分布上看(图 1),林地遍布南岳区的北部、南部和西部,约占研究区总面积的 75%。其次是建设用地和耕地,主要位于研究区的东部和东南部,呈“集中一点带”式分布。2009—2021 年,土地利用类型的空间变化主要表现在原建设用地附近的林地和耕地转为建设用地。

表4 南岳区2009—2021年土地利用变化率

地类	2009年 面积/hm ²	2021年 面积/hm ²	变化 面积/hm ²	变化率/ %
耕地	2 329.82	2 256.12	-73.70	-3.16
林地	13 512.68	13 438.80	-73.88	-0.55
园地	296.58	268.61	-27.97	-9.43
草地	65.05	51.68	-13.37	-20.55
水域	185.01	193.34	8.33	4.50
建设用地	1 241.15	1 438.10	196.95	15.87
其他土地	297.61	281.25	-16.36	-5.50

从土地利用转移矩阵分时段来看(表5),2009—2012年,有99.38 hm²土地转为建设用地,主要由40.31 hm²林地和28.29 hm²耕地转入,分别占新增建设用地面积的40.58%,28.47%;这一时期建设占用了较多的林地资源,主要与当时南岳推动旅游

经济发展,完善基础设施建设有关。2012—2015年,建设用地面积仍然保持较快的增长趋势,净增长72.30 hm²,有29.46 hm²林地和22.08 hm²耕地转入为建设用地,分别占新增建设用地面积的40.75%和30.54%;这一阶段建设占用林地的面积得到减少,但建设占用耕地的情况没有得到大幅缓解;这是由于耕地大多分布在建成区周围,基础条件较好,便于开发利用。2015—2018年,建设用地扩张速率得到明显降低,仅为2009—2012年新增建设用地总面积的25.25%。2018—2021年,在严格管控的条件下,建设用地面积仅增长20.08 hm²,年增长率进一步下降。从土地利用类型的整体变化趋势来看,南岳作为林地居多的重点生态功能区,2009—2021年,生境适宜度最高的林地变化最大,其生境质量也将发生相应变化。

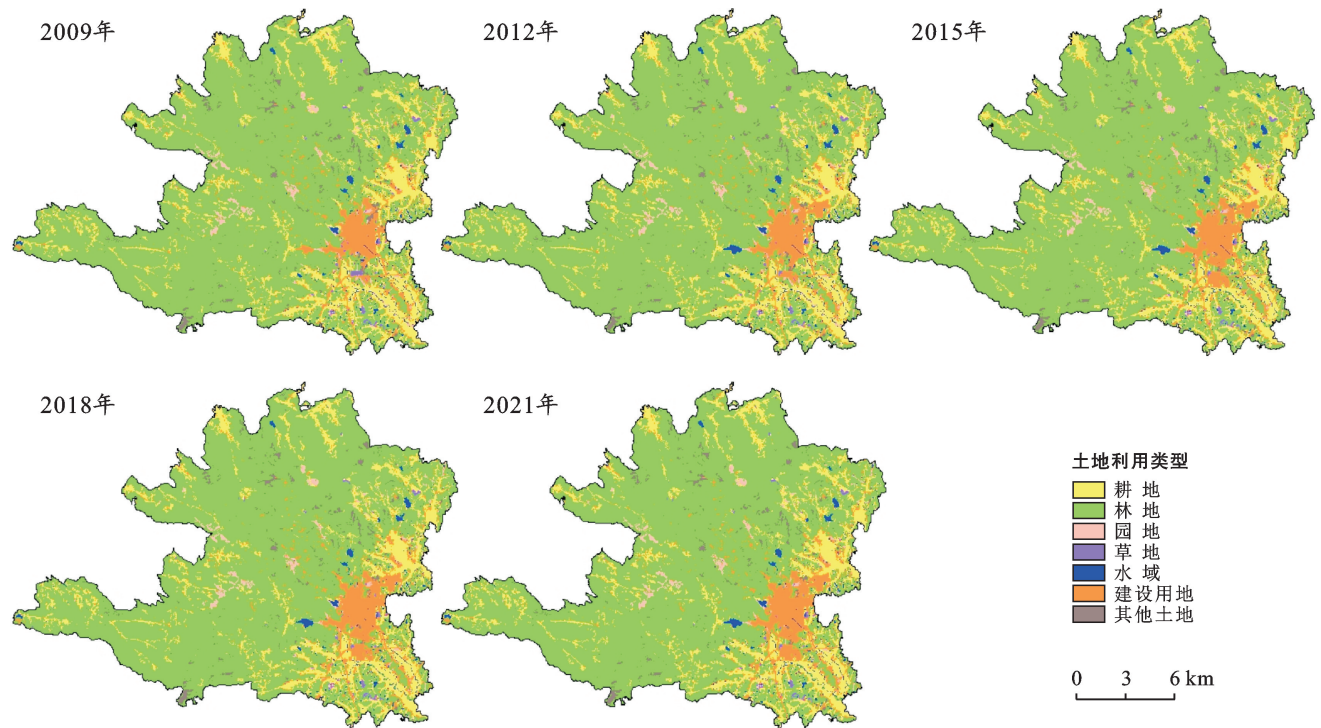


图1 南岳区2009—2021年土地利用变化空间分布

3.2 生境质量时空变化

根据南岳区实际情况和相关研究成果,采用自然断点法将研究区的生境质量结果(Q)划为4个等级:低($0 \leq Q < 0.2$)、中($0.2 \leq Q < 0.5$)、高($0.5 \leq Q \leq 0.8$)、优($0.8 < Q \leq 1$)。各年份的生境质量等级土地面积、比例及空间分布情况分别如表6和图2所示。通过栅格计算得到2009,2012,2015,2018和2021年研究期间南岳区的生境质量均值分别为0.6176,0.6087,0.6011,0.5988和0.5969,呈“先快后慢”的持续下降趋势,降幅分别为1.44%,1.25%,0.38%,0.32%。

从时间尺度上看,2009—2021年南岳区生境质量变化主要表现为低等和中等生境质量区面积缓慢增加,优等生境质量区面积逐渐减少2.35%。2009—2012年,优等生境质量区比重降低了1.3%,低、中、高等生境质量区分别增加了0.38%,0.37%,0.55%;其中,高等生境质量区面积增加最多,为98.01 hm²。主要是由于这一时期建设用地面积增长速率较快,林地面积显著减少,生境质量下降较多,优等生境质量大多转为高等生境质量。2012—2015年,研究区生境质量变化趋势与2009—2012年基本保持一致,但变化速率有所下降。2012年11月党的十八大报告

指出要“加大自然生态系统和环境保护力度”之后,建设用地面积增长趋势得到减缓,优等生境质量区面积变化也随之减少;但即使对人类干扰导致的环境恶化进行了一系列生态修复工程措施,也需要一定的时间

才能见效。所以低等生境质量区面积增幅最大,为 0.44%。2015—2018 年和 2018—2021 年,随着土地利用变化中建设占用林地资源等情况的减少,生境质量退化速率也进一步降低。

表 5 南岳区 2009—2021 年土地利用转移矩阵

hm²

年份	土地类型	2012 年							总计
		耕地	林地	园地	草地	水域	建设用地	其他土地	
2009 年	耕地	2 300.90	0	0	0	0.07	28.29	0.55	2 329.82
	林地	0	13 472.10	0	0	0.04	40.31	0.23	13 512.68
	园地	0	0	292.78	0	0	3.80	0	296.58
	草地	0	0.19	0	53.15	0	11.71	0	65.05
	水域	0	0.04	0.03	0	179.80	4.87	0.28	185.01
	建设用地	0	0	0	0	18.56	1 222.55	0.04	1 241.15
	其他土地	0	0.04	0.10	0	0	10.40	287.07	297.61
	总计	2 300.90	13 472.37	292.91	53.15	198.47	1 321.93	288.17	17 927.90
2012 年	土地类型	2015 年							
	耕地	2 278.64	0	0	0	0	22.08	0.18	2 300.90
	林地	0	13 442.91	0	0	0	29.46	0	13 472.37
	园地	0	11.7	271.73	0	0	9.48	0	292.91
	草地	0	0	0	52.09	0	1.06	0	53.15
	水域	0	0	0	0	193.73	4.74	0	198.47
	建设用地	0	0	0	0	0	1 321.93	0	1 321.93
	其他土地	0	0	0	0	0	5.48	282.69	288.17
总计	2 278.64	13 454.61	271.73	52.09	193.73	1 394.23	282.87	17 927.90	
2015 年	土地类型	2018 年							
	耕地	2 264.37	1.13	0.05	0.02	0.16	12.90	0.01	2 278.64
	林地	1.11	13 443.91	0.19	0.04	0.10	8.83	0.43	13 454.61
	园地	0.04	0.20	270.03	0	0.01	1.43	0	271.73
	草地	0.02	0.03	0	51.77	0.01	0.26	0	52.09
	水域	0.17	0.10	0.02	0	193.03	0.41	0	193.73
	建设用地	0.46	0.69	0.06	0.02	0.05	1 392.93	0.02	1 394.23
	其他土地	0.01	0.28	0	0	0	1.26	281.32	282.87
总计	2 266.18	13 446.34	270.36	51.85	193.36	1 418.02	281.79	17 927.90	
2018 年	土地类型	2021 年							
	耕地	2 254.74	0.98	0.03	0.02	0.43	9.98	0	2 266.18
	林地	1.02	13 436.82	0.16	0.03	0.08	7.95	0.28	13 446.34
	园地	0.02	0.18	268.37	0	0	1.79	0	270.36
	草地	0.01	0.02	0	51.62	0	0.20	0	51.85
	水域	0.02	0.21	0.01	0	192.80	0.32	0	193.36
	建设用地	0.31	0.42	0.04	0.01	0.03	1 417.20	0.01	1 418.02
	其他土地	0	0.17	0	0	0	0.66	280.96	281.79
总计	2 256.12	13 438.80	268.61	51.68	193.34	1 438.10	281.25	17 927.90	

表 6 南岳区 2009—2021 年各等级生境面积及比例

评估等级	2009 年		2012 年		2015 年		2018 年		2021 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
低	3 435.95	19.17	3 504.52	19.55	3 583.38	19.99	3 598.41	20.07	3 619.64	20.19
中	1 948.96	10.87	2 015.15	11.24	2 076.44	11.58	2 098.35	11.70	2 111.91	11.78
高	5 216.95	29.10	5 314.94	29.65	5 333.67	29.75	5 313.12	29.64	5 292.32	29.52
优	7 326.04	40.86	7 093.29	39.56	6 934.41	38.68	6 918.02	38.59	6 904.03	38.51

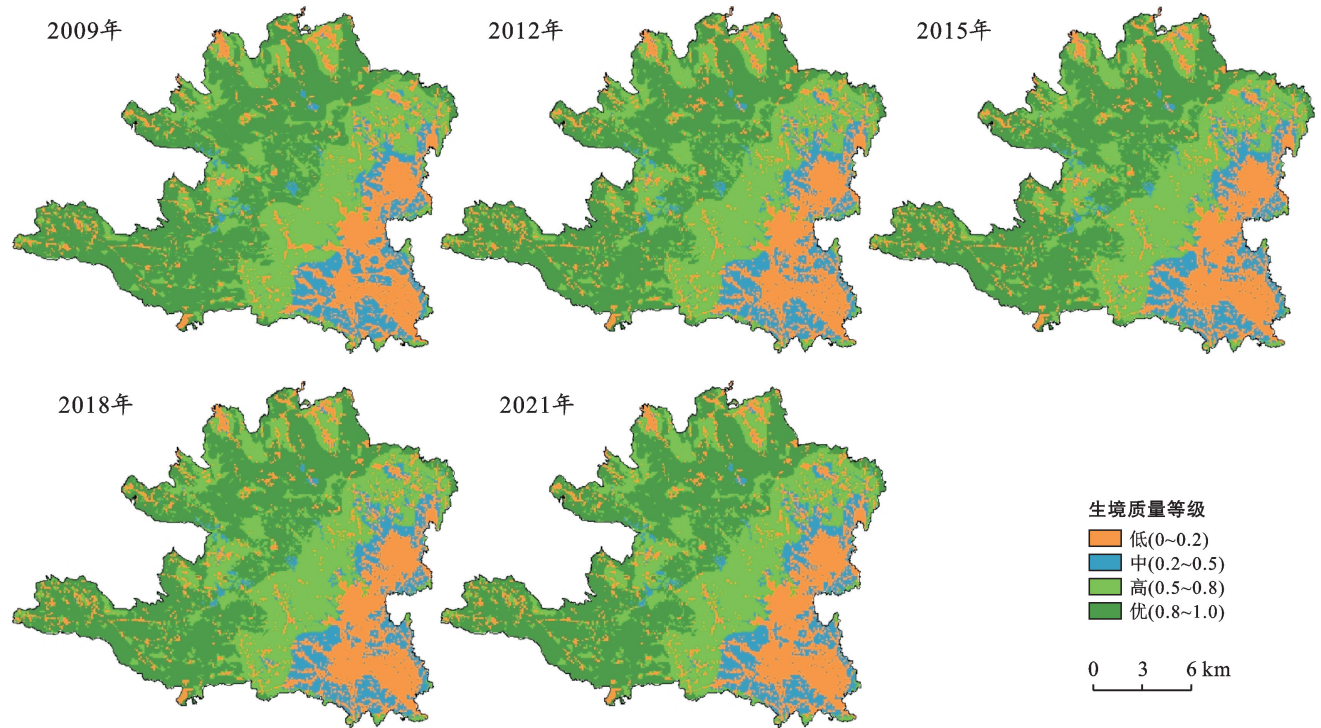


图2 南岳区 2009—2021 年生境质量空间分布

从空间格局上看,研究区整体生境质量处于较高水平,以高等和优等为主,约占南岳区总面积的68%,呈现出“西部高、东南低”的空间分布特征。其中,优等生境质量区主要位于山脉西侧的林地部分,该地区的原始次生林为南岳重点生态功能区的定位奠定了重要基础。高等生境质量区的土地利用类型仍然以林地为主,但是由于距耕地、建设用地等威胁源较近,这部分林地的生境质量偏低,主要分布在山脉东侧的南岳镇以及寿岳乡零散耕地周围。中等生境质量区面积最少,呈“带状”分布在低等生境质量区与高等生境质量区两者的耕地及林地中;低等生境质量区的土地利用类型以建设用地为主,该区域地势平缓、人类活动频繁,导致生境质量偏低。

从空间变化上看,随着建成区的扩张,低生境质量区逐渐向其附近的中生境质量区扩散,使得该生境类型范围增大;中生境质量区沿着高生境质量区向西北方向递进;而高生境质量区逐渐向其西侧的优生境质量区蔓延。生境质量的等级变化主要发生在各等级接壤地带,出现了上一等级生境质量向其下一等级生境质量转换的现象。根据南岳区土地利用类型和生境质量空间分布图,可发现生境质量分区与土地利用类型的空间分布有着相似之处,进一步探索他们的内在联系,有利于加强重点生态功能区的保护与管控。

3.3 林地与生境质量的空间相关性

高等和优等生境质量区分布较广,且大多为林

地;而低等生境质量区以建设用地和耕地居多。将研究区地类分为林地和非林地两部分,采用 GeoDa 软件的 queen contiguity 空间矩阵,测算出 2009—2021 年 5 个时间段南岳区林地与生境质量的双变量全局空间自相关指数,分别为 0.204, 0.207, 0.209, 0.213 和 0.216,且在 1% 的显著性水平下其正态性假设检验统计量 Z 值均通过了检验。双变量全局空间自相关检验表明林地与生境质量具有显著的空间依赖效应,2009—2021 年研究区林地与生境质量在空间分布上并非完全随机,具有明显的聚集性,且其正相关性逐渐增强。由于近年来人类活动导致部分林地被建设占用,生境质量的降低与林地的减少存在着一定联系,为了揭示研究区内空间自相关性的具体位置,选择局部 Moran's I 分析出现聚集区域的特征(图 3)。

从时间尺度上看,2009—2012 年,林地被建设占用,导致高高聚集区域减少,转变为不显著;2012—2015 年,生态文明建设推行的土地整治、退耕还林等措施,使林地增加,生境质量提升,高高聚集区域稍有增加;2015—2018 年和 2018—2021 年,由于各项环境保护政策的实行,土地利用类型与生境质量变化较慢,研究区各聚集类型的空间分布变化也较小;2021 年较 2009 年,高高聚集和低低聚集区域均有略微增加,说明部分林地转为非林地、生境质量降低;同时生态修复工程得以见效,部分林地生境质量升高。从空

间格局上看,2009—2021年,高高聚集是南岳区林地与生境质量等级在空间位置上的主要关系,分布于山脉西部海拔较高且难以开发利用的生态区;低低聚集分布的区域也相对较广,主要在生境质量较低的耕地、建设用地等地势平缓的土地利用类型上集中分

布;高低聚集地区的土地类型为林地,但是由于城镇开发的辐射作用,导致其生境质量偏低;低高聚集零散分布在优等生境质量区的园地、草地等其他地类中;高高聚集与低低聚集过渡带存在大量的聚集不显著地区,此处生境质量与林地的存在无直接关系。

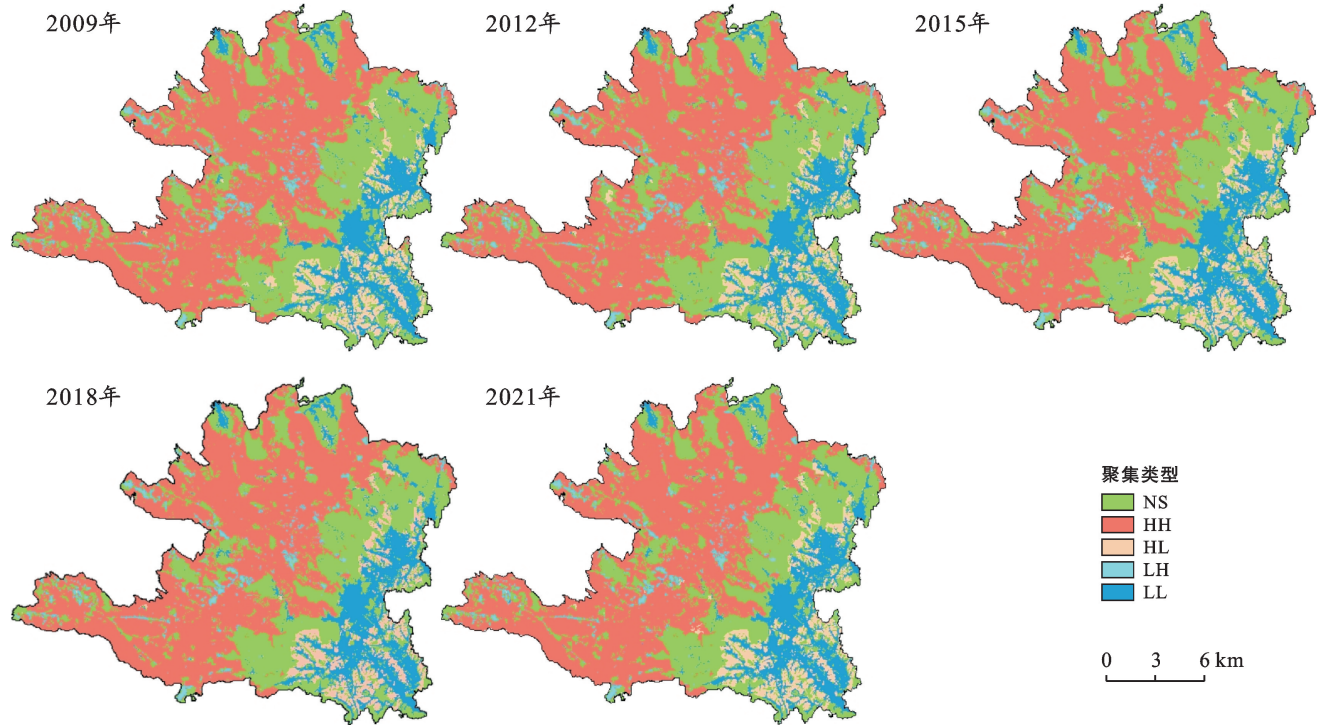


图 3 南岳区 2009—2021 年生境质量 LISA 分布

3.4 土地利用结构与生境质量预测

根据空间自相关分析,发现重点生态功能区土地利用类型中的林地影响着生境质量的高低。通过验证模拟精度后,以 2021 年土地利用数据为基础,把生态红线范围的区域设置为限制因素;运用 CA-Markov 模型对研究区 LUCC 进行预测。并根据预测结果,得到 2025—2030 年南岳区土地利用变化率(表 7)及生境质量空间分布图(图 4—5),以便引导政府未来管控。

表 7 南岳区 2025—2030 年土地利用变化率

土地利用类型	2025 年面积/hm ²	2030 年面积/hm ²	变化面积/hm ²	变化率/%
耕地	2 242.08	2 219.53	-22.55	-1.01
林地	13 397.73	13 370.06	-27.67	-0.21
园地	263.61	257.85	-5.76	-2.19
草地	51.54	50.23	-1.31	-2.54
水域	193.26	196.42	3.16	1.64
建设用地	1 500.86	1 563.53	62.67	4.18
其他土地	278.82	272.28	-6.54	-2.35

从时间和数量上看,预测显示 2025 年研究区耕地、林地、园地、草地、水域、建设用地和其他土地的面

积分别为 2 242.08,13 397.73,263.61,51.54,193.26,1 500.86,278.82 hm²。其中,建设用地将从 2021 年的 1 438.10 hm² 增加至 2025 年的 1 500.86 hm²;增加 62.76 hm²,增长率为 4.36%;而其他地类中,林地减少的面积最多,耕地减少的比重最大。低、高等生境质量区将呈现“圈层”扩散趋势,优等生境质量区向高等生境质量区转变、中等生境质量区向低等生境质量区转变,低、高等生境质量区面积将进一步增加。预测显示 2030 年研究区建设用地面积将持续增加到 1 563.53 hm²,从转变类型上看,未来建设用地面积增加的主要来源为原建设用地周围的林地和耕地;在不考虑各项政策因素的影响下,随着建设用地面积的增加,未来南岳区生境质量将整体下降。

从空间格局上看,研究区西部将依然以林地为主,耕地在整个区域内呈破碎状分布,而草地、园地、水域和其他土地将继续以零散状态分布在整个区域内。结合南岳区“一山一核一轴一区”的发展格局及规划,未来土地利用变化将主要发生在地势较低的东南方;建设用地以“点状结合”的形式向北部和南部的耕地以及西部的林地扩散。研究区东南部生境质量

受土地利用类型变化的影响将有所降低,中等生境质量区将继续向西侧高等生境质量区蔓延。但在重点

生态功能区的定位背景下,各级生境质量变化速率将进一步降低。

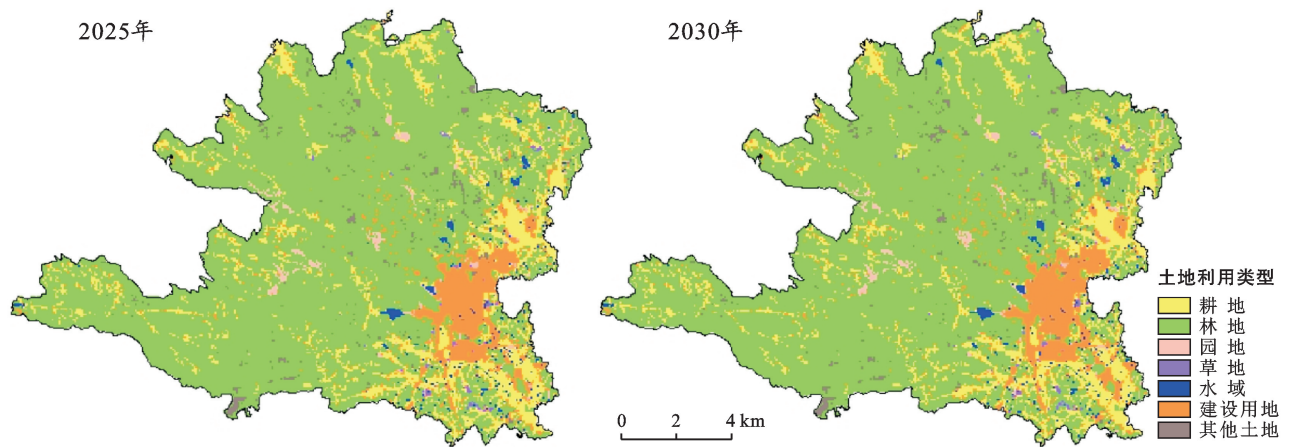


图4 南岳区 2025—2030 年土地利用变化

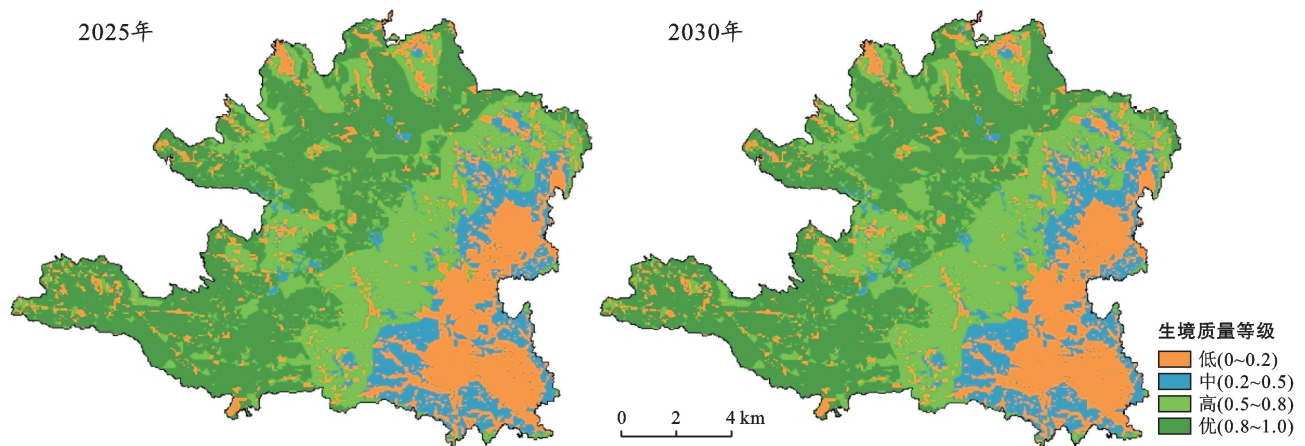


图5 南岳区 2025—2030 年生境质量空间分布预测

4 讨论与结论

4.1 结论

本文以南岳重点生态功能区为例,基于 2009, 2012, 2015, 2018 和 2021 年 5 期土地利用现状数据,借助 ArcGIS 软件、InVEST 模型、双变量空间自相关和 CA-Markov 模型分析研究区 2009—2021 年土地利用结构和生境质量时空特征,探讨生境质量高低与林地之间的聚集关系,并预测该区域 2025 和 2030 年土地利用结构和生境质量的时空变化趋势,得出以下结论:

(1) 研究期内南岳区各地类间的转移以林地和耕地转为建设用地为主,林地减少的面积最多,耕地下降比重最大;2009—2021 年建设用地面积增加 196.95 hm²,增长率为 15.87%,且 45.37%,36.25% 分别由林地和耕地转入。

(2) 研究区平均生境质量指数均超过 0.59,优等

生境质量区所占比例最大,分布较为集中;2009—2021 年整体生境水平有所下降,生境质量指数由 0.617 6 下降至 0.596 9;主要表现为优等生境质量区减少,低等生境质量区增加。

(3) 南岳区林地与生境质量的全局 Moran's *I* 均大于 0.2,具有显著的正相关性,且林地对生境质量的正向影响逐渐增强;其中,高高聚集为主要表现类型,但低低聚集区域的增加表明林地的减少会导致生境质量的降低。

(4) 2025 和 2030 年研究区土地利用类型变化将主要发生在东南方地势平坦的城镇中心,低等生境质量区向周围中等生境质量区扩增;建设用地面积持续增加,林地和耕地面积继续减少,整体生境质量进一步降低。

4.2 讨论

本文研究发现在过去和将来,南岳作为旅游景区和重点生态功能区,生态环境保护都格外重要。但建

设用地增加、林地减少导致的生境质量降低已成为难以避免的现实问题。从 2009—2021 年的土地利用转移矩阵来看,该区域土地利用变化以林地、耕地和建设用地 3 种土地类型为主;采用 InVEST 模型可将其生境质量评价结果直观地展示出来,为行政部门分区管控提供科学参考;探究林地与生境质量的空间关系,并预测研究区未来土地利用结构和生境质量特征,可进一步引导优化土地利用空间布局。

由于模型存在一定的局限性,生境质量中的威胁源不仅会受到人类社会经济活动的影响,还会受到自然环境中不确定性灾害的干扰。自然、社会、经济等诸多因素的存在,威胁因子和生境敏感性等参数的设置通常会受主观判断的影响,并且多种威胁的集体影响可能远远大于各种威胁水平之和,从而导致试验结果与实际状况存在偏差。对于未来土地利用结构及生境质量的预测,也会因政策及规划的不同而产生误差;但是作为湖南省国土空间规划确定的重点生态功能区,在追求经济效益的同时,更应该注重生态效益;适当控制建设用地扩张,加强土地资源管理,实现南岳区经济发展与生态保护“双赢”目标。

[参 考 文 献]

- [1] 华文剑,陈海山,李兴.中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J].地球科学进展,2014,29(9):1025-1036.
- [2] 傅伯杰,陈利顶,马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响:以延安市羊圈沟流域为例[J].地理学报,1999,54(3):241-246.
- [3] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology [J]. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25(1):173-182.
- [4] 冯伟林,李树苗,李聪.生态系统服务与人类福祉:文献综述与分析框架[J].资源科学,2013,35(7):1482-1489.
- [5] 马永强,石云,郝姗姗,等.黄土丘陵区土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J].生态学报,2019,39(8):2806-2815.
- [6] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
- [7] 刘振生,高惠,滕丽微,等.基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J].生态学报,2013,33(22):7243-7249.
- [8] Zhang L, Dzakpasu M, Chen R, et al. Validity and utility of ecological footprint accounting: A state-of-the-art review [J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 32: 411-416.
- [9] Christina P, Bo Jiang, Ann P, et al. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy [J]. Ecology Letters, 2015,18(1):108-118.
- [10] 刘智方,唐立娜,邱全毅.基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究[J].生态学报,2017,37(13):4538-4548.
- [11] 刘春芳,王川.基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征:以榆中县为例[J].生态学报,2018,38(20):7300-7311.
- [12] 王耕,常畅,韩冬雪,等.老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化[J].生态学报,2020,40(6):1910-1922.
- [13] 黎夏,刘小平.基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟[J].地理学报,2007,62(10):1097-1109.
- [14] 李明杰,钱乐祥,吴志峰,等.广州市海珠区高密度城区扩展 SLEUTH 模型模拟[J].地理学报,2010,65(10):1163-1172.
- [15] Ye B Y, Bai Z K. Simulating land use/cover changes of Nenjiang County based on CA-Markov model [M]//Li D L. Computer and Computing Technologies in Agriculture, (Volume D). Boston: Springer, 2008:321-329.
- [16] Praveen Subedi. Application of a hybrid cellular automaton-Markov(CA-Markov)model in land-use change prediction: A case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida [J]. Science & Education, 2013,1(6):126-132.
- [17] Nourqolipour R, Mohamed Shariff A R B, 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.
- [18] 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].生态学杂志,2018,29(12):4106-4118.
- [19] 武丹,李欢,艾宁,等.基于 CA-Markov 的土地利用时空变化与生境质量预测:以宁夏中部干旱区为例[J].中国生态农业学报,2020,28(12):1969-1978.
- [20] 王志强,傅建春,全斌,等.扎龙湿地丹顶鹤繁殖生境质量变化[J].应用生态学报,2010,21(11):2871-2875.
- [21] 杨志鹏,许嘉巍,冯兴华,等.基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J].生态科学,2018,37(6):139-147.
- [22] 包玉斌,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J].干旱区研究,2015,32(3):622-629.
- [23] 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.
- [24] 吴哲,陈歆,刘贝贝.InVEST 模型及其应用的研究进展[J].热带作物学报,2013,33(4):58-62.

- 土空间综合功能分区[J].资源科学,2014,36(9):1958-1968.
- [9] 畅田颖,张仲伍,乔旭宁.黄河流域 2000—2020 年“三生”空间土地利用转型及其生态环境效应[J].水土保持通报,2021,41(4):268-275.
- [10] 吕立刚,周生路,周兵兵,等.区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究:以江苏省为例[J].地理科学,2013,33(12):1442-1449.
- [11] 周浩,金平,夏卫生.省级国土空间“三生”功能评价及其分区研究:以河南省为例[J].中国土地科学,2020,34(8):10-17.
- [12] 于莉,宋安安,郑宇,等.“三生用地”分类及其空间格局分析:以昌黎县为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(2):89-96.
- [13] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(7):1290-1304.
- [14] 林伊琳,赵俊三,张萌,等.滇中城市群国土空间格局识别与时空演化特征分析[J].农业机械学报,2019,50(8):176-191.
- [15] 张红旗,许尔琪,朱会义.中国“三生用地”分类及其空间格局[J].资源科学,2015,37(7):1332-1338.
- [16] 马世发,马梅,蔡玉梅,等.省级尺度国土空间生态保护红线划定:以湖南省为例[J].热带地理,2015,35(1):43-50.
- [17] 朱媛媛,余斌,曾菊新,等.国家限制开发区“生产—生活—生态”空间的优化:以湖北省五峰县为例[J].经济地理,2015,35(4):26-32.
- [18] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报,2016,71(1):49-65.
- [19] 于莉,宋安安,郑宇,等.“三生用地”分类及其空间格局分析:以昌黎县为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(2):89-96.
- [20] 雷鸣,孔祥斌,张雪靓,等.黄淮海平原区土地利用变化对地下水资源量变化的影响[J].资源科学,2017,39(6):1099-1116.
- [21] 洪舒蔓,郝晋珉,周宁,等.黄淮海平原耕地变化及对粮食生产格局变化的影响[J].农业工程学报,2014,30(21):268-277.
- [22] 孟鹏,郝晋珉,周宁,等.黄淮海平原城镇化对耕地变化影响的差异性分析[J].农业工程学报,2013,29(22):1-10.
- [23] 欧阳竹,邓祥征,孙志刚,等.面向国民经济主战场的区域农业研究[J].地理学报,2020,75(12):2636-2654.
- [24] 田鹏,李加林,史小丽,等.浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2697-2706.
- [25] 单薇,金晓斌,冉娜,等.江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1541-1551.
- [26] 庞丽,周兴,韦芦桂.2009—2018 年广西国土空间“三生”功能评价及耦合协调性分析[J].水土保持通报,2021,41(1):237-244.

(上接第 356 页)

- [25] 王军,严有龙,王金满,等.闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J].生态学报,2021,41(14):5837-5848.
- [26] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical analysis, 1995,27(2):93-115.
- [27] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J].生态学报,2019,39(7):2366-2377.
- [28] 孟斌,王劲峰,张文忠,等.基于空间分析方法的中国区域差异研究[J].地理科学,2005,25(4):393-400.
- [29] 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.
- [30] Wickramasuriya R C, Bregt A K, Van Delden H, et al. The dynamics of shifting cultivation captured in an extended constrained cellular automata land use model [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(18): 2302-2309.
- [31] 黎云云,畅建霞,王义民.基于 CA-Markov 模型的黄河流域土地利用模拟预测研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(12):107-116.