DOI: 10.20103/j.stxb.202206171728
周俊鑫,蔡梅芳,黄志强,郭福生,翟健程.江西省生境质量时空演化特征及预测.生态学报,2023,43(18):7623-7636.
Zhou J X, Cai M F, Huang Z Q, Guo F S, Zhai J C.Spatio-temporal evolution characteristics and prediction of habitat quality in Jiangxi Province.Acta Ecologica Sinica,2023,43(18):7623-7636.

江西省生境质量时空演化特征及预测

周俊鑫[1,2],蔡梅芳[1,2],黄志强[1,2,*],郭福生[1],翟健程[1,2]
1 东华理工大学,地球科学学院, 南昌　330013
2 东华理工大学,自然保护地规划研究院, 南昌　330013

摘要:生境质量关乎区域可持续发展和人类福祉,评估其时空演化特征和预测未来变化对生态文明建设和高质量发展具有重要意义。以江西省为研究区,利用 InVEST 模型和热点分析方法定量评估 2000—2020 年生境质量时空演化特征,结合 PLUS 模型模拟预测 2020—2050 年土地利用和生境质量变化。结果表明:(1)2000—2020 年江西省有林地、灌木林地、疏林地、水田、旱地面积呈减少趋势,减少部分主要位于南昌市等城市边缘,转为城镇用地和其他建设用地。(2)江西省生境质量总体较好,均值呈微幅下降且加速下降的趋势,具有以南昌市等城市为中心、向外辐射提高和中部低、四周高、北部低、南部高的时空分异特点,20 年内 8.52%的区域生境质量得到改善,44.85%的区域发生退化,退化区域以生境质量低值区域为核心向外辐射。热点分析显示,在乡镇尺度上,生境质量与生境退化度在空间分布上具有相似的集聚特征,但高低值相反。(3)结合 PLUS 模型预测显示,2020—2050 年江西省城镇用地、其他建设用地进一步急剧扩张,时空特征表现为环鄱阳湖扩张圈和萍乡市-宜春市-新余市-南昌市-抚州市-鹰潭市-上饶市东西向扩张带,生境质量均值保持下降趋势,退化区域呈现相似的“一环一带”时空特征。研究结果可为完善山水林田湖草系统治理制度和国土空间开发保护制度提供科学依据。

关键词:生境质量;土地利用;InVEST 模型;PLUS 模型;生态保护情景预测

Spatio-temporal evolution characteristics and prediction of habitat quality in Jiangxi Province

ZHOU Junxin[1,2], CAI Meifang[1,2], HUANG Zhiqiang[1,2,*], GUO Fusheng[1], ZHAI Jiancheng[1,2]
1 *School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*
2 *Planning and Research Institute of Nature Reserves, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*

Abstract: Habitat quality is related to regional sustainable development and human well-being. Assessing its spatio-temporal evolution characteristics and predicting future changes are of great significance to the construction of ecological civilization and high-quality development. Taking Jiangxi Province as the study area, the spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality from 2000 to 2020 were quantitatively evaluated by using the InVEST model and hot spot analysis method, and the changes of land use and habitat quality from 2020 to 2050 were simulated and predicted by using the PLUS model. The results showed that: (1) from 2000 to 2020, the area of forest, shrub, sparse woodland land, paddy field and dry land in Jiangxi Province presented a decreasing trend, and the decreasing part was mainly located at the edge of Nanchang City and other cities, and turned to urban land and other construction land. (2) The overall habitat quality of Jiangxi Province is good, with a slight decline and accelerated decline in the mean value. It had the characteristics of spatio-temporal differentiation with Nanchang and other cities as the center, increased outward radiation and low in the middle, high around, low in the north and high in the south. Within 20 years, 8.52% of the regional habitat quality has been

基金项目:国家自然科学基金项目(41772197)
收稿日期:2022-06-17;　　**网络出版日期**:2023-05-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 18771556@qq.com

improved, 44.85% of the regions have been degraded, and the degraded regions radiated outward with low habitat quality as the core. Hot spot analysis showed that at the township scale, the spatial distribution of habitat quality and habitat degradation degree had similar clustering characteristics, but the high and low values were opposite. (3) According to the prediction results of PLUS model, the urban land and other construction land in Jiangxi Province would further expand sharply from 2020 to 2050. The spatio-temporal characteristics would be shown as the expansion circle around Poyang Lake and the East-West expansion belt from Pingxiang to Yichun to Xinyu to Nanchang to Fuzhou to Yingtan to Shangrao. The average value of habitat quality would maintain a downward trend, and the degraded areas would show similar spatio-temporal characteristics of "one ring and one belt". The research results can provide a scientific basis for improving the management system of mountain, water, forest, field, lake and grass system and the protection system of land and space development.

Key Words: habitat quality; land use; InVEST model; PLUS model; ecological protection scenario prediction

土地是人类社会和各类生态系统运转最基本的载体[1],近年来人类活动的剧烈扰动深刻改变着土地利用的格局[2],也引起了区域生态系统服务和生境质量的退化[3]。生境质量指生态环境为生物生存提供适宜条件的能力,是关乎区域可持续发展和人类福祉的重要指标[4—5],在新时代推动区域高质量发展和生态文明建设背景下成为当下研究热门[6],评估区域生境质量既往、现状和预测未来变化趋势,对政府制定生态环境保护政策和学者研究构建生态安全格局等具有重要意义[7—9]。

国内外学者主要从生态学视角和地理学视角进行生境质量评估研究[10],通过遥感和 GIS 等技术手段、基于土地利用/覆被变化的评估模型被广泛应用[11],其中 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块因能在评价生境适宜性时考虑威胁源及敏感性而备受青睐[12—13]。为研究和预测生境质量的变化趋势,有部分学者耦合生境质量评估模型和基于元胞自动机(Cellular, CA)的 CA-Markov、CLUE-S、FLUS 等土地利用模拟预测模型[14—16],相较于以上模型,由关庆峰团队开发的斑块生成土地利用变化模拟模型(Patch-generating Land Use Simulation Model, PLUS)在大尺度和多地类综合模拟等方面更具优势[17—18]。王军等人预测了闽江流域 2020—2040 年的生境质量时空特征,对上中下游各县域生境质量变化进行分析[19]。夏盈等人基于 3 km 幅度预测并对比了自然变化情景和生态保护情景下 2030 年汉江平原四湖流域的生境质量[20]。武丹等人以宁夏中部干旱区为例,研究和预测未来 10 年干旱半干旱区的土地利用动态结构和生境质量变化[21]。高周冰等人模拟预测了生态优先、协调发展、自然增长、经济发展 4 种情景下的 2025 年和 2035 年南京市生境质量[22]。现有生境质量预测研究多集中在流域和城市尺度,缺乏省域层面全局性的和长江中下游流域、鄱阳湖流域的预测研究,未能满足新时代全域空间治理的新需求[10]。

江西省作为首批 3 个国家生态文明试验区之一,全省约 94%的面积为鄱阳湖流域,是我国南方地区重要的生态安全屏障,面临发展经济和保护环境的双重压力,研究和预测其生境质量时空演变特征,有利于探索中部地区绿色崛起和高质量发展,有利于保护鄱阳湖流域作为独立自然生态系统的完整性,对建立山水林田湖草系统治理制度和完善国土空间开发保护制度具有现实意义[23—24]。基于此,本研究基于 2000—2020 年 5 期土地利用等数据,利用 InVEST 模型和热点分析方法对生态保护情景下江西省生境质量时空演变特征进行定量评估,结合 PLUS 模型模拟预测 2020—2050 年土地利用和生境质量时空变化趋势,以期为制定生态环境政策提供科学依据和丰富生境质量评估预测理论研究。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

江西省(图 1)位于我国东南部、长江中下游交接处南岸,地处北纬 24°29′14″—30°04′41″,东经 113°34′36″—118°28′58″之间,总面积 16.69 万 km^2,辖 11 个设区市,总人口 4518.86 万。地势总体由边界向中、北部逐渐降

低,平均海拔 217.7 m,地貌以丘陵和山地为主,省境东、南、西三面环山,北面环湖,形成独特的半封闭式地理结构,使得其行政边界在历史上较为稳定,全省约 94%的面积为鄱阳湖流域,森林覆盖率 63.1%,居全国第二。江西属亚热带湿润季风气候,四季分明且天气复杂多变,年均气温 18 ℃,年均降水量 1675 mm,年均无霜期 272 d。

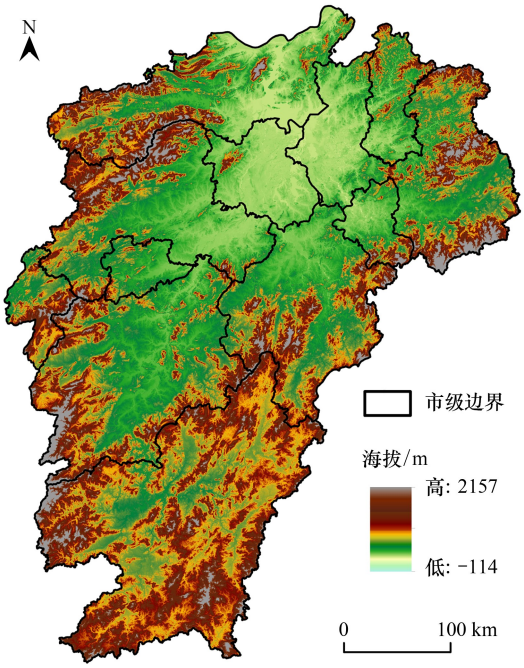

图 1　研究区概况

Fig.1　Location of study area

1.2　数据来源与处理

研究数据包括 InVEST 模型中 Habitat Quality 模块和 PLUS 模型所需数据。2000、2005、2010、2015、2020 年 5 期二级类土地利用 30 m 栅格数据、水系、路网、各级行政边界矢量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)。数字高程模型数据(DEM)来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn),坡度数据基于此通过 Slope 模块提取。土壤类型 1 km栅格数据来源于世界土壤数据库(HWSD)。年平均降水量、气温数据来源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn),通过克里金插值得到栅格数据。自然保护地边界矢量数据来源于江西省林业局。高速收费站、火车站、市中心、县中心坐标基于百度地图和高德地图通过 Python 爬取,距火车站、收费站距离等基于爬取的坐标通过欧式距离分析提取。各县国内生产总值数据来源于《江西省统计年鉴》(2021),人口统计数据来源于江西第七次人口普查。通过 Arcgis10.6 软件对所有空间数据进行预处理,统一所有空间数据行列号,分辨率为 30 m×30 m,投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。

1.3　研究方法

1.3.1　基于 InVEST 模型的生境质量评估

本文利用 InVEST 3.10.2 模型中 Habit Quality 模块对江西省生境质量进行评估,能够反映江西省各时期生境退化度、生境质量时空格局,生境退化度计算公式如下[25]:

$$D_{xj} = \sum_{1}^{r} r \sum_{1}^{y} \left(\frac{\omega_w}{\sum_{r=1}^{n} \omega_w} \right) \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr} \tag{1}$$

式中:D_{xj}为第 j 种生境类型的第 x 栅格的生境退化度;r 为威胁源个数;y 为威胁源为 r 的栅格;w 为不同威胁源的权重;r_y为栅格 y 的胁迫值;β_x为生境抗干扰水平;S_{jr}为不同生境对不同威胁因子的敏感性;i_{rxy}为威胁源为 r 的栅格 y 对栅格 x 的影响;d_{xy}为栅格 x 与栅格 y 之间的距离;$d_{r\max}$为威胁因子 r 的最大影响距离。

生境质量计算公式如下:

$$i_{rxy} = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{d_{xy}}{d_{r\max}} \right) & \text{指数衰退} \\ \exp\left[- \left(\dfrac{2.99}{d_{r\max}} \right) \right] & \text{线性衰退} \end{cases} \tag{2}$$

式中:Q_{xj}为第 j 种生境类型中的栅格 x 的生境质量;H_j为第 j 种生境类型的生境适宜度;z 为归一化常量,取默认值 2.5;k 为半包和常数,一般为最大生境退化度的一半,取默认值 0.5。

本研究参考 InVEST 模型手册和相关研究[26—29],结合江西省实际情况,将水田、旱地、城镇、农村居民点、其他建设用地、主要道路作为威胁因子,各威胁因子最大影响距离及权重、各土地利用类型对威胁源的敏感度

参数等数据见表 1 和表 2。

表 1 威胁因子的最大影响距离及权重

Table 1 Weight and max impact distant of threat factors

威胁因子 Threats	最大影响距离/km Max distance of influence	权重 Weight	衰退类型 Decay type
水田 Paddy field	1	0.6	线性衰退
旱地 dry land	1	0.6	线性衰退
城镇用地 Urban land	8	1	指数衰退
农村居民点 Rural settlements	6	0.8	指数衰退
其他建设用地 Other construction land	5	0.6	指数衰退
未利用地 Unused land	3	0.5	线性衰退

表 2 各土地利用类型生境适宜度及对威胁因子的敏感度

Table 2 Habitat suitability of different land use types and sensitivity to threat factors

土地利用类型 Land use types	生境适宜性 Habitat	水田 Paddy field	旱地 Dry land	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural settlements	其他建设用地 Other construction land	未利用地 Unused land
水田 Paddy field	0.5	0	0	0.8	0.7	0.6	0.4
旱地 Dry land	0.3	0	0	0.8	0.7	0.6	0.4
有林地 Forest	1	0.6	0.7	0.9	0.8	0.8	0.5
灌木林地 Shrub	0.8	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.5
疏林地 Sparse woodland	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.4
其他林地 Other woodland	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.4
高覆盖度草地 High covered grassland	0.7	0.6	0.7	0.9	0.8	0.7	0.6
中覆盖度草地 Medium covered grassland	0.6	0.5	0.6	0.9	0.8	0.7	0.6
低覆盖度草地 Low covered grassland	0.5	0.5	0.6	0.9	0.8	0.7	0.6
河渠 River	0.9	0.4	0.5	0.9	0.8	0.7	0.3
湖泊 Lake	1	0.4	0.5	0.9	0.8	0.6	0.3
水库、坑塘 Reservoir	0.6	0.4	0.5	0.9	0.8	0.6	0.3
滩地 Beach land	0.7	0.55	0.6	0.7	0.6	0.7	0.3
城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0	0
农村居民点 Rural settlements	0	0	0	0	0	0	0
其他建设用地 Other construction land	0	0	0	0	0	0	0
未利用地 Unused land	0.3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5	0

1.3.2 基于 PLUS 模型的土地利用模拟预测

斑块生成土地利用模拟模型(PLUS)提出了一个基于土地扩张分析策略的规则挖掘框架和基于多类型随机种子的 CA 模型,该模型可以挖掘土地扩张和景观变化的驱动因素。与其他模型相比,PLUS 模型可以获得更高的仿真精度和更相似的景观[30]。

(1)各土地利用类型发展概率

本文使用用地扩张分析策略模块,提取研究区 2010、2020 年各类土地利用变化部分,选取高程、坡度、气温、降水量、距水系的距离、土壤类型 6 个自然驱动因子和国内生产总值、人口数量、距铁路的距离、距火车站的距离、距高速的距离、距高速出入口的距离、距主要道路的距离、距市中心的距离、距县中心的距离 9 个社会驱动因子,采用随机森林算法对各类土地利用变化部分进行采样计算,获取各驱动因子对各土地利用类型变化的影响权重和各土地利用类型的发展概率,采样方式、采样率、决策树数目参数设为默认,计算公式如下[31]:

$$Q_{xj} = H_j\left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right)\right] \tag{3}$$

式中:d 为各土地利用类型间的转移条件,取值 0 或 1,当取 1 时表示某一土地利用类型允许转化为另一类,取 0 时则表示不允许;x 为由驱动因子组成的向量;h_{nx} 为决策树为 n 时的运算结果;Y_n 为决策树为 n 时的分类结果;$I[h_n(x)=y_n]$ 为分类结果指示函数;M 为决策树的数量,$P_{ix}{}^{d}$ 为在 d 条件下栅格 x 的第 i 类土地利用类型的发展概率。

(2)Markov 模型

本文基于研究区往期土地利用数据,运用 Markov 模型进行土地利用预测[19],计算公式如下:

$$P_{ix}^{d}=\frac{\sum_{n=1}^{M} I[h_n(x)=y_n]}{M} \tag{4}$$

式中:$S^{(t+1)}$ 为所预测地类在 t+1 时的类型;$S^{(0)}$ 为所预测地类的初始类型;$S^{(t)}$ 为所预测地类在 t 时的类型;P_{ij} 为土地利用类型 i 转换为类型 j 的概率。

(3)基于多类随机斑块种子的 CA 模型

根据 Markov 模型预测和 LEAS 策略分析的各土地利用类型面积和发展概率,基于地理元胞自动机模型,结合自适应惯性、随机种子生成、阈值递减、邻域权重表、转移矩阵等机制,能够实现土地利用动态变化自动模拟。邻域范围、递减阈值、扩散系数等模型参数设为默认,转移矩阵根据研究区往期变化经验和现实情况设定。

$$S^{(t+1)}=S^{(t)}P_{ij}=S^{(0)}P_{ij}{}^{(t+1)} \tag{5}$$

邻域权重表示各土地利用类型发生转换的难易程度,此处根据往期各土地利用类型变化面积的占比计算,计算公式如下:

$$W_i=\frac{S_i-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}} \tag{6}$$

式中:W_i 为第 i 类土地利用类型的邻域权重,取值 0-1,值越大表示越容易发生转换;S_i 为第 i 类土地利用类型的变化面积;S_{max} 为各土地利用类型变化面积中的最大值,S_{min} 各土地利用类型变化面积中的最小值。计算结果见表 3。

表 3　各土地利用类型邻域权重

Table 3　Realm weight parameters of different land use types

土地利类型 Land use types	邻域权重 Realm weight	土地利类型 Land-use types	邻域权重 Realm weight	土地利类型 Land-use types	邻域权重 Realm weight
水田 Paddy field	1	旱地 Dry land	0.4478	有林地 Forest	0.8773
灌木林地 Shrub	0.3381	疏林地 Sparse woodland	0.4346	其他林地 Otherwood land	0.0348
高覆盖度草地 High covered grassland	0.1646	中覆盖度草地 Medium covered grassland	0.0572	低覆盖度草地 Low coveredgrassland	0
河渠 River	0.0682	湖泊 Lake	0.2177	水库坑塘 Reservoir	0.1774
滩地 Beach land	0.1701	其他建设用地 Other construction land	0.1145	农村居民点 Rural settlements	0.1757
城镇用地 Urban land	0.7889	未利用地 Unused land	0.0203		

(4)模拟精度检验

本文使用 Kappa 系数进行模拟精度检验,计算公式如下:

$$\text{Kappa}=\frac{(P_0-P_c)}{(P_0-P_c)} \tag{7}$$

式中:P_0 为模拟正确的比例;P_c 为随机状态下预测正确比例;P_p 为理想状态下模拟正确的比例;当 Kappa 值大

于 0.8 时,表明模拟精度好。

1.3.3 热点分析

Getis-Ord G_i^* 可以用来分析研究区生境质量和生境退化度的的空间集聚特征,能够清晰地可视化生境质量、生境退化度高值和低值的时空格局。计算公式如下:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j^n W_{ij}(d) X_j}{\sum_j^n X_j} \tag{8}$$

式中:d 为距离,$W_{ij}(d)$为以距离规则定义的空间权重;X_i和 X_j分别是 i 和 j 区域的观测值;当 G_i^* 为正时,表明高值空间集聚(热点区),当 G_i^* 为负,表明低值空间集聚(冷点区)。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空动态分析

由表 4 和图 2 可知,2000—2020 年总体上,江西省土地利用面积林地>耕地>草地>水域>建设用地>未利用地。其中,林地以有林地为主,主要集中分布在江西省四至边界的怀玉山脉、九连山脉、幕阜山脉、罗霄山脉、九岭山脉、武夷山脉等山脉和中部丘陵地区。有林地仅在 2010—2015 年间增加,其余时间持续减少;灌木林地和疏林地整体呈减少趋势;其他林地则在前 10 年快速增加和减少后保持稳定。总体上看,20 年间林地呈减少趋势,主要转为城市用地和其他建设用地。耕地中水田旱地比保持在约 7.2∶2.8,主要集中分布在鄱阳湖平原、吉泰平原和赣江、信江等河流的冲积平原,20 年间水田持续减少 778.28 km^2,旱地持续减少 322.88 km^2,主要转为城市用地等建设用地。草地以高覆盖度草地和中覆盖度草地为主,多零散分布在林地边缘,20 年间变化幅度较小。水域总体上集中分布在赣北的鄱阳湖区域,20 年间呈缓慢增加趋势,各类面积的大幅变化主要是由于季节时相变化引起的地表覆被相互转化。

表 4 2000—2020 年研究区各土地利用类型面积及占比

Table 4 Area and percentage of land use types in study area from 2000 to 2020

土地利用类型 Land use types	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km^2 Area	占比/% Proportion	面积/km^2 Area	占比/% Proportion	面积/km^2 Area	占比/% Proportion	面积/km^2 Area	占比/% Proportion	面积/km^2 Area	占比/% Proportion
水田 Paddy field	32926.45	19.73	32742.59	19.62	32679.56	19.58	32402.71	19.41	32148.16	19.26
旱地 Dry land	12371.70	7.41	12383.89	7.42	12312.57	7.38	12172.00	7.29	12048.82	7.22
有林地 Forest	71691.36	42.95	71272.27	42.70	73018.87	43.75	72449.40	43.40	72354.14	43.35
灌木林地 Shrub	9983.63	5.98	9909.52	5.94	9261.99	5.55	9221.67	5.52	9206.50	5.52
疏林地 Sparse woodland	21299.49	12.76	21238.15	12.72	20197.04	12.10	20010.95	11.99	19896.28	11.92
其他林地 Other woodland	800.85	0.48	1270.39	0.76	1014.26	0.61	1031.86	0.62	1024.08	0.61
高覆盖度草地 High covered grassland	4883.78	2.93	4753.17	2.85	4566.29	2.74	4941.66	2.96	4923.19	2.95
中覆盖度草地 Medium covered grassland	2293.47	1.37	2258.49	1.35	2130.21	1.28	2111.61	1.27	2098.50	1.26
低覆盖度草地 Low covered grassland	105.04	0.06	104.76	0.06	104.13	0.06	104.38	0.06	104.16	0.06
河渠 River	1437.85	0.86	1355.70	0.81	1627.53	0.98	1632.72	0.98	1640.47	0.98
湖泊 Lake	1949.97	1.17	2826.71	1.69	1083.24	0.65	1774.84	1.06	1190.46	0.71
水库、坑塘 Reservoir	1719.95	1.03	1621.78	0.97	1635.58	0.98	1717.38	1.03	1742.41	1.04
滩地 Beach land	1704.49	1.02	1214.17	0.73	2771.60	1.66	2024.78	1.21	2591.83	1.55
城镇用地 Urban land	584.81	0.35	849.61	0.51	1129.20	0.68	1223.13	0.73	1264.56	0.76
农村居民点 Rural settlements	2077.59	1.24	2227.41	1.33	2291.45	1.37	2291.07	1.37	2318.63	1.39
其他建设用地 Other construction land	158.98	0.10	258.44	0.15	540.48	0.32	1268.42	0.76	1826.49	1.09
未利用地 Unused land	929.90	0.56	632.25	0.38	555.29	0.33	540.72	0.32	540.63	0.32

未利用地主要集中分布在鄱阳湖西南沿岸的沙地,这部分 20 年间变化较小,而零散各处的未利用地大部分转为建设用地。建设用地总体呈显著增加趋势,在 2010—2015 年增长最快,增加部分多由位于城区边缘和城市连通线上的林地和耕地转入。20 年间,城镇用地、农村居民用地、其他建设用地分别增加 679.75 km^2、241.04 km^2、1667.51 km^2,同比增长 116.24%、11.60%、1048.89%。

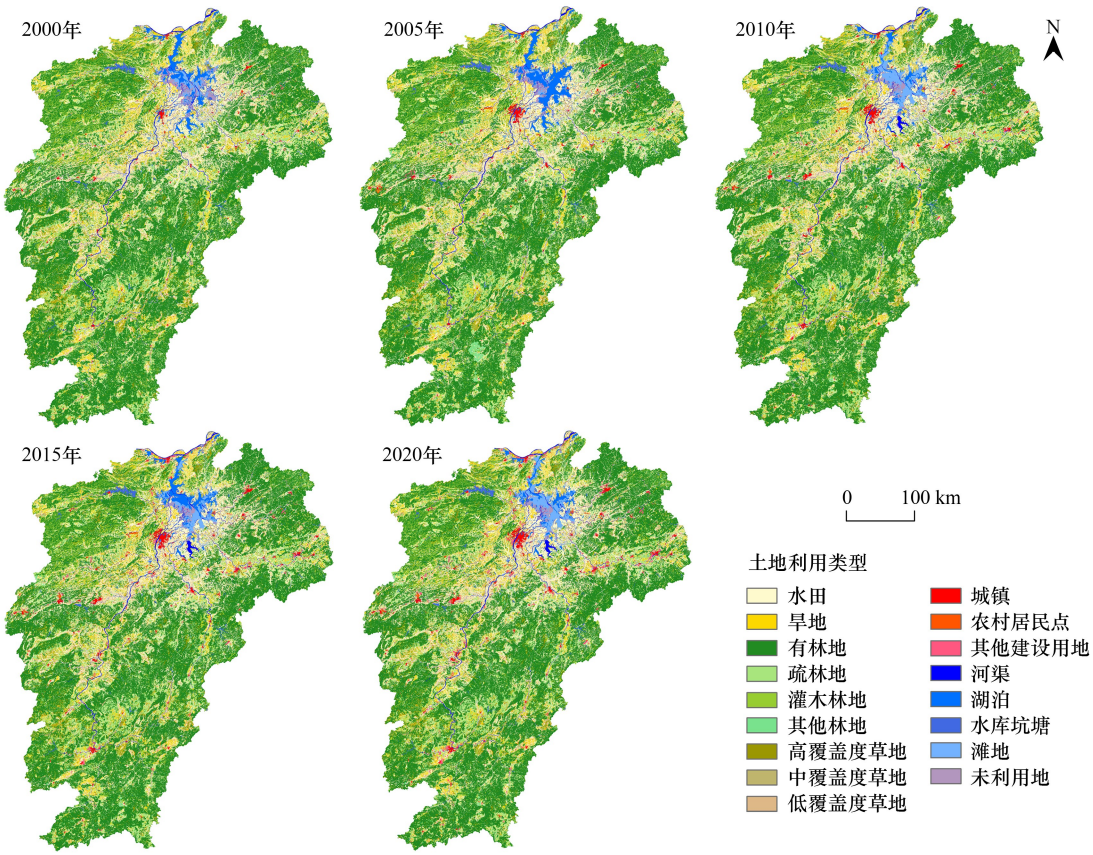

图 2　2000—2020 年研究区土地利用类型分布

Fig.2　Distribution of land use types in sutdy area from 2000 to 2020

2.2　生境质量时空动态分析

结果表明,在时间上,2000、2005、2010、2015、2020 年江西省生境质量得分均值分别为 0.7516、0.7509、0.7489、0.7462、0.7430,总体生境质量良好,20 年间每 5 年变化率分别为-0.09%、-0.27%、-0.35%、-0.44%,总变化率-1.14%,整体呈现微幅下降且加速的趋势。为进一步对比江西省生境质量的时间动态,参考已有研究[10],将生境质量得分以 0.2 为区间划分为低、较低、中等、较高、高五个等级。根据表 5 可知,2000—2020 年江西省低、较低、中等、较高、高生境质量区域面积占比均值分别为 2.43%、7.73%、22.05%、21.65、46.14%。其中,高生境质量区域面积先由 2000 年 76830.86 km^2 持续增加至 2010 年的 77273.74 km^2,后又持续减少至 2020 年的 76568.05 km^2,呈倒 V 字形。低生境质量区域面积 20 年间持续增加 2588.10 km^2,同比增长 91.78%,呈显著增加趋势。

对比 2000—2020 年江西省生境质量(图 3),同时以 2020 年为例,对江西省生境质量、生境退化度和生境稀缺度进行冷热点分析(图 5)。结果表明,在空间上,江西省生境质量区域差异显著。赣东北、赣西北、赣东、赣南等区域生境质量总体较好,这些区域山脉纵横,植被覆盖度高,交通不便,受人类活动影响较弱,且已建立大量自然保护地;环鄱阳湖平原、吉泰平原,尤其是南昌、九江等城市城区生境质量总体较差,这些区域地势平坦开阔,城市化程度较高,经济较为发达,农田也多集中于此。整体来看,生境质量的空间格局具有以南昌等

城市和鄱阳湖为中心向外辐射提高和中部低、四周高、北部低、南部高的特点。

表 5 2000—2020 年研究区各等级生境质量面积及占比

Table 5 Area and percentage of the habitat quality levels in study area from 2000 to 2020

生境质量等级 Habitat quality levels	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion
低 Low	2819.98	1.69	3333.48	2.00	3959.30	2.37	4780.38	2.86	5408.08	3.24
较低 Poor	13300.25	7.97	13014.07	7.80	12866.18	7.71	12711.37	7.62	12586.99	7.54
中 Medium	37054.85	22.20	37205.68	22.29	36819.40	22.06	36599.13	21.93	36333.75	21.77
较高 Good	36913.36	22.11	36194.18	21.68	36000.69	21.57	35560.96	21.30	36022.44	21.58
高 High	76830.86	46.03	77171.89	46.23	77273.74	46.29	77267.47	46.29	76568.05	45.87

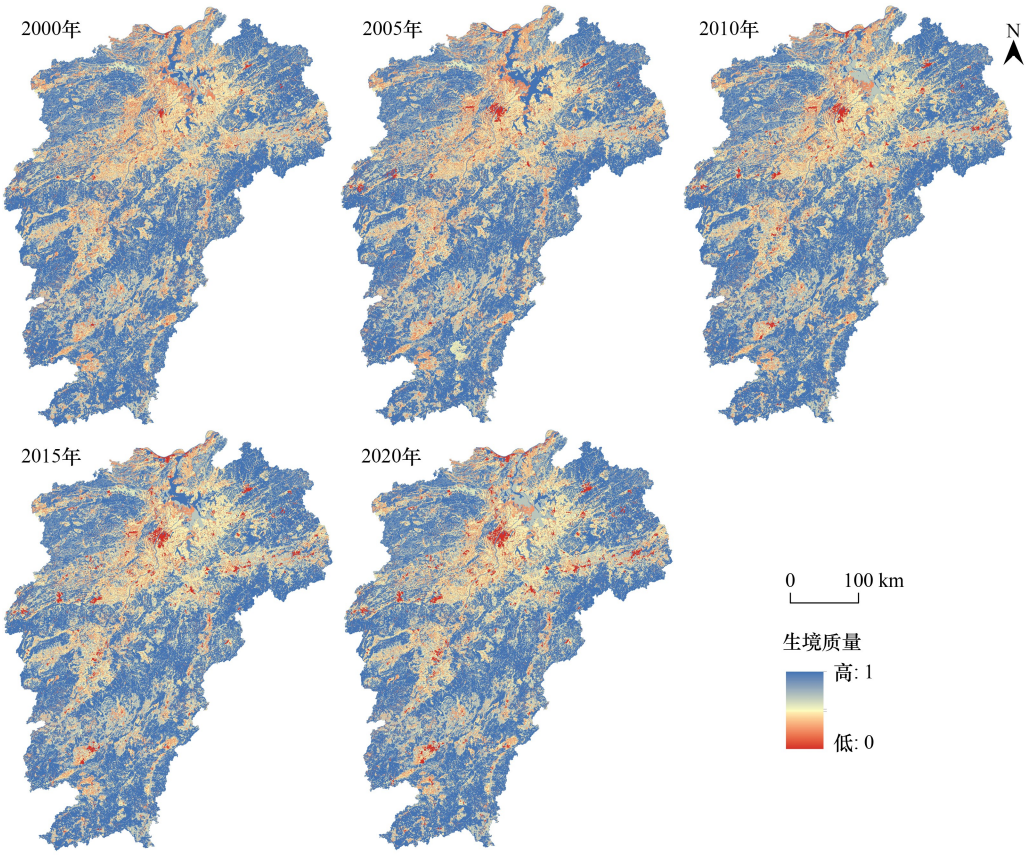

图 3 2000—2020 年研究区生境质量分布

Fig.3 Distribution of the habitat quality in study area from 2000 to 2020

在生境质量热点分析中也发现相似的分布特征,其热点区域涉及 538 个乡镇,约占全省总面积的 39.56%,冷点区域,涉及 731 个乡镇,约占全省总面积的 24.32%。在生境退化度热点分析中,发现其空间分布整体上与生境质量存在相似的集聚特征,但高低值相反,热点区域主要分布在赣北环鄱阳湖平原,涉及 588 个乡镇,约占全省总面积的 23.59%;冷点区域主要分布在赣南、赣西北等山脉和中部丘陵地区,涉及 616 个乡镇,约占全省总面积的 44.24%。

生境稀缺性表明某一景观类型的相对生境稀缺程度,其热点区域也主要分布在中部丘陵、赣南九岭山脉和赣西北怀玉山脉等区域,范围较小,涉及 297 个乡镇,约占全省总面积的 19.68%;冷点区域主要分布在南昌、赣州、九江、上饶等城区,涉及 429 个乡镇,约占全省总面积的 11.65%。

为进一步研究江西省各区域生境质量的时空动态,计算各像元的生境质量变化,参考已有研究[32],将其划为强烈退化(-1—-0.5)、明显退化(-0.5—-0.2)、轻微退化(-0.2—0)、保持稳定(0)、轻微改善(0—0.2)、明显改善(0.2—0.5)、强烈改善(0.5—1.0)七个等级。由图 4 和表 6 可知,20 年间,生境质量退化、保持稳定、改善区域的面积存在一定程度的波动,但生境质量退化区域面积始终远大于改善区域,在 2010—2015 年相差最大,退化区域占比高达 29.71%,改善区域仅 1.11%;保持稳定的区域面积则呈减少趋势,由 2000—2005 年的 71.46%减少至 2015—2020 年的 61.77%。总的来看,2000—2020 年,46.63%的区域生境质量保持稳定,多分布在各大山脉;44.85%的区域生境质量发生退化,其中多为轻微退化,在南昌、上饶等城市边缘和连通线上

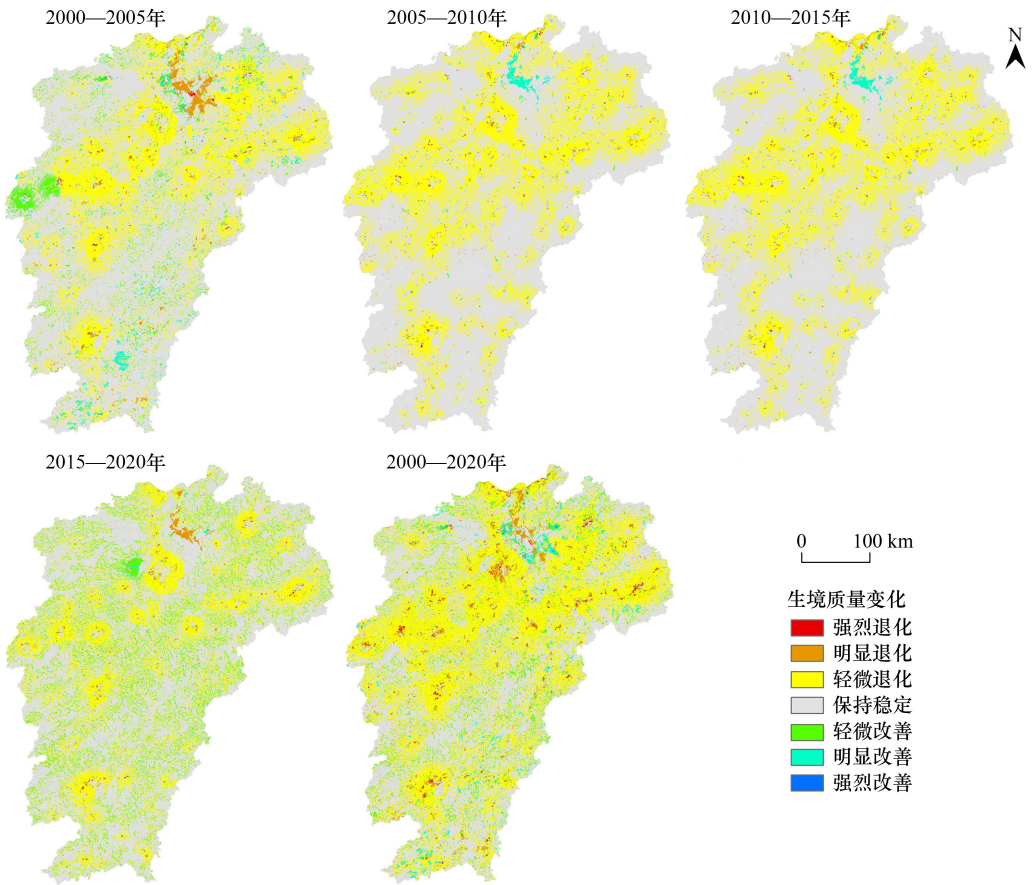

图 4　2000—2020 年研究区生境质量时空变化

Fig.4　Spatiotemporal pattern of the habitat quality in study area from 2000 to 2020

表 6　2000—2020 年研究区生境质量变化面积及占比

Table 6　Area and percentage change of the habitat quality in study area from 2000 to 2020

生境质量变化 Habitat quality change	2000—2005 年		2005—2010 年		2010—2015 年		2015—2020 年		2000—2020 年	
	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion
强烈退化 Strong degradation	280.41	0.17	526.83	0.32	443.30	0.27	742.62	0.44	1732.72	1.04
明显退化 Obvious degradation	1480.35	0.89	3093.03	1.85	907.21	0.54	3094.99	1.85	6152.01	3.68
轻微退化 Slight degradation	34527.65	20.69	43447.17	26.03	48234.61	28.90	42003.53	25.16	66986.75	40.13
保持稳定 Keep stable	119273.12	71.46	109113.01	65.37	115474.95	69.18	103101.91	61.77	77827.99	46.63
轻微改善 Slight improvement	9801.02	5.87	7936.71	4.75	1042.17	0.62	15378.17	9.21	9179.68	5.50
明显改善 Obvious improvement	1153.54	0.69	2648.19	1.59	800.91	0.48	2178.75	1.31	4522.99	2.71
强烈改善 Strong improvement	403.22	0.24	154.36	0.09	16.16	0.01	419.34	0.25	517.17	0.31

最为显著,并有北部多,南部少,中部多,四周少的区域分异特点,与生境质量低值区域的空间格局存在共性,表明生境质量低值区域正在扩散;仅有 8.52%的区域生境质量得到改善,其中 5.50%为轻微改善,零散分布在全省各处,但以赣南、赣东、赣西北为主。

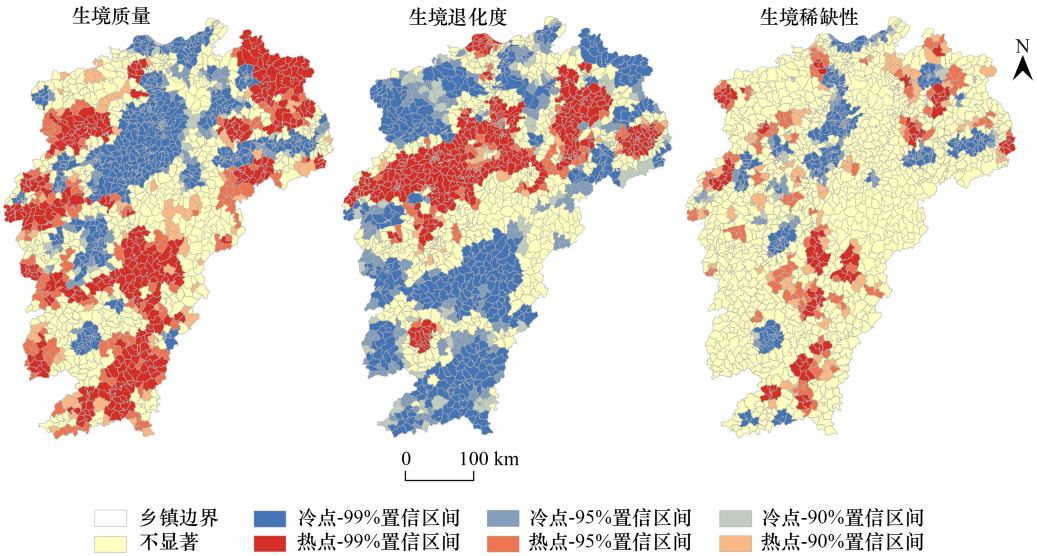

图 5 研究区生境质量、生境退化度、生境稀缺性热点分析

Fig.5 Habitat quality、habitat degradation degree、habitat scarcity in study area

2.3 土地利用变化模拟预测

基于往期数据模拟 2020 江西省年土地利用情况,将模拟结果与 2020 年实际土地利用对比检验,计算得 Kappa 系数为 0.827,表明 PLUS 模型预测结果可靠。

根据往期土地利用数据模拟预测 2030、2040、2050 年江西省土地利用情况(表 7、图 6)。结果表明,江西省城镇用地、其他建设用地等进一步快速扩张,扩张部分主要分布在南昌市等城市边缘,并且呈现出明显的环鄱阳湖城市扩张圈和萍乡市—宜春市—新余市—南昌市—抚州市—鹰潭市—上饶市东西向城市扩张带。水

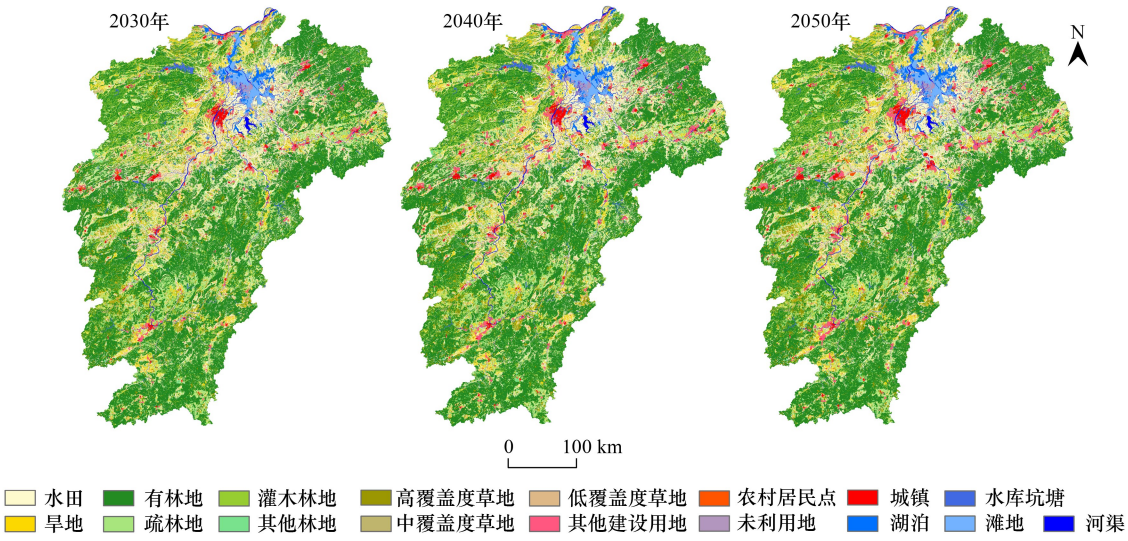

图 6 2020—2050 年研究区土地利用类型分布模拟预测

Fig.6 Simulation prediction of distribution of land use types in sutdy area from 2020 to 2050

田、旱地、有林地面积保持显著减少趋势,减少部分空间分布与建设用地扩张部分相对应。草地面积总体变化较小。未利用地由于多分布在鄱阳湖沙地而基本未发生改变。水域中湖泊面积呈增加趋势,部分原因可能是由于解译数据和土地变化模拟误差将其他类型水域转入,滩地面积保持减小趋势。

表 7　2020—2050 年研究区各土地利用类型面积及占比

Table 7　Area and percentage of land use types in study area from 2020 to 2050

土地利用类型 Land use types	2030 年		2040 年		2050 年	
	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion
水田 Paddy field	31836.50	19.07	31529.97	18.89	31222.07	18.70
旱地 Dry land	11809.42	7.07	11598.53	6.95	11409.14	6.84
有林地 Forest	71742.99	42.98	71126.58	42.61	70517.42	42.25
灌木林地 Shrub	9149.77	5.48	9097.77	5.45	9045.41	5.42
疏林地 Sparse woodland	19606.52	11.75	19343.82	11.59	19096.53	11.44
其他林地 Other woodland	959.59	0.57	916.63	0.55	909.93	0.55
高覆盖度草地 High covered grassland	5248.58	3.14	5552.89	3.33	5832.01	3.49
中覆盖度草地 Medium covered grassland	2066.03	1.24	2037.48	1.22	2010.41	1.20
低覆盖度草地 Low covered grassland	103.24	0.06	103.06	0.06	102.83	0.06
河渠 River	1654.46	0.99	1667.90	1.00	1681.27	1.01
湖泊 Lake	1267.82	0.76	1323.87	0.79	1363.42	0.82
水库、坑塘 Reservoir	1761.92	1.06	1775.41	1.06	1781.75	1.07
滩地 Beach land	2488.42	1.49	2409.19	1.44	2356.45	1.41
城镇用地 Urban land	1330.48	0.80	1450.12	0.87	1520.39	0.91
农村居民点 Rural settlements	2340.12	1.40	2323.29	1.39	2371.10	1.42
其他建设用地 Other construction land	3026.08	1.81	4146.43	2.48	5192.54	3.11
未利用地 Unused land	527.37	0.32	516.36	0.31	506.64	0.30

2.4　生境质量模拟

以模拟预测的 2030、2040、2050 年江西省土地利用数据为基础,基于 InVEST 模型模拟未来研究区生境质量(图 7),估算各等级生级质量面积及占比变化(表 8)。结果表明,从时间上看,2030、2040、2050 年江西省生境质量平均值为 0.7376、0.7314、0.7262,生境质量总体较好,每 10 年分别降低 0.0054、0.0062、0.0052,保持略微降低趋势,但降低速度先加快后减缓。低生境质量区域面积持续增长,由 2020 年 5408.08 km² 的扩大到 2050 年的 9084.02 km²,30 年间同比增长 67.97%,高生境质量区域面积持续减少,由 2020 年的 76568.05 km² 减少至 2050 年的 74810.92 km²,30 年间同比减少 2.30%。

表 8　2020—2050 年研究区各等级生境质量面积及占比

Table 8　Area and percentage of the habitat quality levels in study area from 2020 to 2050

生境质量等级 Habitat quality levels	2030 年		2040 年		2050 年	
	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion	面积/km² Area	占比/% Proportion
低 Low	6696.68	4.01	7919.84	4.75	9084.02	5.44
较低 Poor	12336.79	7.39	12114.89	7.26	11915.78	7.14
中 Medium	35956.83	21.54	35595.09	21.33	35261.10	21.13
较高 Good	35955.48	21.54	35892.00	21.50	35847.49	21.48
高 High	75973.53	45.52	75397.49	45.16	74810.92	44.81

从空间上来看,在保持原有江西省生境质量时空格局的基础上,模拟结果进一步凸显其变化特征,南昌城区周边生境质量退化最为显著,赣州、九江、上饶等城区周边次之,生境质量退化与土地利用变化模拟中建设

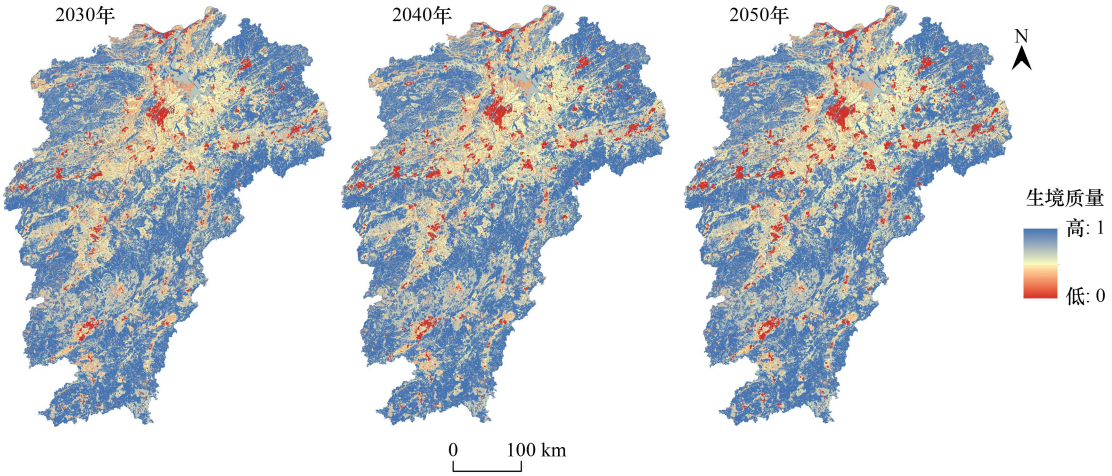

图 7 2020—2050 年研究区生境质量分布

Fig.7 Prediction of distribution of the habitat quality in study area from 2020 to 2050

用地扩张具有相似特征,即环鄱阳湖生境退化圈和萍乡市-宜春市-南昌市-抚州市-鹰潭市-上饶市东西向生境退化带。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1)根据时空变化特征研究结果,江西省土地利用变化最主要的原因是社会经济的快速发展。城市的急剧扩张威胁了生态系统的稳定,林地、草地等生境适宜度较高的地类转为建设用地等生境适宜度较低的地类,造成了区域生境质量退化。通过评估既往、现状和预测未来变化趋势,发现以南昌市为首的环鄱阳湖经济圈和萍乡市-宜春市-新余市-南昌市-抚州市-鹰潭市-上饶市东西向城市带是江西省生境质量最差和退化最为严重的区域。一方面由于这两区域地势平坦,区位优越,经济发展程度相较于全省其他地区较高,土地利用情况也多为耕地和建设用地,人为扰动剧烈。另一方面由于社会经济和城市发展需求,驱动土地利用类型急剧转为建设用地,在转换过程中忽视或未能处理好与生态环境之间的平衡关系,加剧生境质量退化。江西作为生态文明试验区,担有探究环境保护与经济发展之间协调关系的责任,因此对这两大区域的协调尤为重要。

对于研究和预测结果中环鄱阳湖经济圈和萍乡市-宜春市-新余市-南昌市-抚州市-鹰潭市-上饶市东西向城市扩张带,应严格控制城市无序扩张,完善三区三线的划定,可以编制整体区域专项的国土空间总体规划;加强土地集约化利用,改善空间和产业结构,出台区域专项土地节约集约利用土地政策;大力开展生态环境治理和生态修复工作,编制区域生态环境治理和生态修复总体规划,积极引入社会资本参与;可以参考城市中生境较好的区域,构建城市生态系统生态安全格局,也可在省域市域层面进行或完善生态功能区划分。

对于赣东北、赣西北、赣东、赣南等生境质量总体较好的区域,在保持现有生态环境保护政策和实施力度的基础上,可以建立生态环境保护奖惩机制,或由省市层面统一组织设立地区“生态环境保护转移支付”专项基金,实现地区经济发展和生态保护的平衡;可以合理利用生态资源探索“绿水青山就是金山银山”的实现路径,促进生态价值转化,将生态优势转化为经济和发展优势;可以对照现有的保护体系,标识可能潜在的优先保护区,健全自然保护地等保护网络体系。

同时,政府在制定其他区域开发战略、生态环境保护和生态风险防范政策时也需重点关注以上两区域,以便统筹推进区域社会经济和生态环境高质量发展,建议政府关注和学者研究如何制定科学有序的国土空间规划方案管控建设用地规模,健全自然保护地网络体系和构建生态安全格局[32—33],完善生态功能区划、加强生境较好区域的生态保护工作,落实生境较差及退化区域的生态修复工作,探索生境质量优化和生态价值转化

新方式。

(2)在遥感解译、生境评估、模拟预测等处理过程中均存在一定误差,不同研究区也存在一定特殊性、各地类生境现实情况也颇为复杂,后续优化可以尝试通过建立长时序监测样点、本地化相关指标参数等方法提升与现实情况的结合度。PLUS 模型中土地扩张分析策略模块采用随机森林算法,与地理探测器分析机制不同[34],可以不考虑各驱动因素的自相关性,计算得各驱动因素对各土地利用类型变化的影响权重,对探究土地利用变化的原因机制具有一定参考。

3.2　结论

本研究运用 PLUS 模型模拟预测 2030、2040、2050 年江西省土地利用变化情况,运用 InVEST 模型评估和预测 2000—2050 年江西省生境质量时空格局,结论如下:

(1)2000—2020 年江西省有林地、灌木林地、疏林地地面积持续减少,主要转为城镇用地和其他建设用地。水田、旱地主要集中分布在鄱阳湖平原和吉泰平原,流失严重,流失部分主要位于南昌等城市边缘。城镇用地、其他建设用地呈迅速扩张趋势,扩张部分与林地、耕地流失部分对应明显。

(2)PLUS 模型预测结果表明 2020—2050 年江西省有林地、灌木林地、水田、旱地等面积保持减少趋势。城镇用地、其他建设用地进一步快速扩张,时空特征表现为环鄱阳湖扩张圈和萍乡市-宜春市-新余市-南昌市-抚州市-鹰潭市-上饶市东西向城市扩张带。

(3)2000—2020 年江西省生境质量总体较好,呈微幅下降且加速下降的趋势。区域差异显著,高生境质量区域多分布在赣东北、赣西北、赣东、赣南等处的山脉和中部丘陵地区,低生境质量区域分布在南昌等城区和环鄱阳湖平原、吉泰平原,具有以南昌等城市为中心向外辐射提高和中部低、四周高、北部低、南部高的特点。退化区域与生境质量低值区域的空间格局存在共性,表明生境质量低值区域正在扩散。

(4)2030—2050 年江西省生境质量保持下降趋势,下降速度先增后缓,退化区域以南昌等城区周边最为显著,并与土地利用变化模拟中建设用地扩张具有相似的一环一带空间分布特征。

参考文献(References):

[1] Fleskens L, Duarte F, Eicher I. A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: a case study of Trás-os-Montes olive groves. Journal of Rural Studies, 2009, 25(1): 141-155.

[2] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.

[3] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.

[4] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 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. 生态学报, 2020, 40(9): 2895-2906.

[5] 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. 生态学报, 2018, 38(20): 7300-7311.

[6] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向. 地理研究, 2019, 38(1): 13-22.

[7] 于丹丹, 吕楠, 傅伯杰. 生物多样性与生态系统服务评估指标与方法. 生态学报, 2017, 37(2): 349-357.

[8] 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. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178.

[9] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(3): 874-885.

[10] 岳文泽, 夏皓轩, 吴桐, 熊锦惠, 钟鹏宇, 陈阳. 浙江省生境质量时空演变与生态红线评估. 生态学报, 2022, 42(15): 6406-6417.

[11] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 马学成, 胡宝清. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. 地理科学, 2018, 38(6): 979-986.

[12] 冯舒, 孙然好, 陈利顶. 基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究. 生态学报, 2018, 38(12): 4167-4179.

[13] 邓越, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 陈坤. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降. 生态学报, 2018, 38(12): 4516-4525.

[14] Li Z T, Li M, Xia B C. Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl River Delta urban agglomeration based on LUCC simulation. Ecological Indicators, 2020, 114: 106319.

[15] Van Dessel W, Van Rompaey A, Szilassi P. Sensitivity analysis of logistic regression parameterization for land use and land cover probability estimation. International Journal of Geographical Information Science, 2011, 25(3): 489-508.

[16] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating

multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.

[17] Liang X, Liu X P, Li D, Zhao H, Chen G Z. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model. International Journal of Geographical Information Science, 2018, 32(11): 2294-2316.

[18] Li C, Wu Y M, Gao B P, Zheng K J, Wu Y, Li C. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China. Ecological Indicators, 2021, 132: 108328.

[19] 王军, 严有龙, 王金满, 应凌霄, 唐倩. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848.

[20] 夏盈, 张莹莹, 厉恩华, 蔡晓斌, 杨超, 杨娇. 江汉平原四湖流域生境质量时空演化及预测. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1616-1626.

[21] 武丹, 李欢, 艾宁, 黄涛, 顾继升. 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. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1969-1978.

[22] 高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 汪翔, 范业婷, 朱青, 吕立刚. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1001-1013.

[23] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考. 自然资源学报, 2020, 35(1): 26-36.

[24] 王军, 钟莉娜. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用. 生态学报, 2019, 39(23): 8702-8708.

[25] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. Habitat International, 2018, 71: 110-124.

[26] Aneseyee A B, Noszczyk T, Soromessa T, Elias E. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: a qualitative case study of the Winike Watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1103.

[27] 李亚楠, 多玲花, 张明. 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. 水土保持研究, 2022, 29(2): 345-354.

[28] 陈淼, 苏晓磊, 黄慧敏, 高婷, 党成强, 董蓉, 曾波, 陶建平. 三峡库区河流生境质量评价. 生态学报, 2019, 39(1): 192-201.

[29] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 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. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4106-4118.

[30] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.

[31] 胡丰, 张艳, 郭宇, 张盼盼, 吕帅, 张长春. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136.

[32] 王超, 常勇, 侯西勇, 刘玉斌. 基于土地利用格局变化的胶东半岛生境质量时空演变特征研究. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1809-1822.

[33] 陈子琦, 董凯凯, 张艳红, 侯光雷, 刘兆礼. 全国重要生态功能区生物多样性保护成效区域对比评估. 生态学报, 2022, 42(13): 5264-5274.

[34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.