

引用格式:单渌铤,王海军,张彬,等.顾及土地生态安全的环鄱阳湖城市群土地利用情景模拟[J].地球信息科学学报,2020,22(3):543-556. [Shan L Y, Wang H J, Zhang B, et al. Land use simulation of the city clusters around Poyang Lake based on land ecological security assessment[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):543-556.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190306

顾及土地生态安全的环鄱阳湖城市群 土地利用情景模拟

单渌铤¹,王海军^{1,2},张彬¹,潘鹏^{3*}

1. 武汉大学资源与环境科学学院,武汉 430079; 2. 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室,武汉 430079;
3. 生态环境部环境工程评估中心,北京 100012

Land Use Simulation of the City Clusters Around Poyang Lake based on Land Ecological Security Assessment

SHAN Luyi¹, WANG Haijun^{1,2}, ZHANG Bin¹, PAN Peng^{3*}

1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Systems, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China

Abstract: As China has been vigorously promoting the new-type urbanization and implementing spatial planning policies, city clusters have become the urbanization frontier. But the contradiction between economic development and ecological protection restricts the sustainable urbanization. As the basis of urban development, the changes of land quantity and distribution have a significant impact on the structure and functioning of ecosystem. Therefore, land ecological security assessment of city clusters and predicting future land use patterns of city clusters based on such an assessment are crucial to the sustainability of city clusters. The assessment of land ecological security is the basis of the optimal allocation of land resources, and land use simulation is an important method to predict the trend of land use changes. Combination of the two methods can provide reference for optimizing land use patterns and protecting the eco-environment. By studying the city clusters around Poyang Lake, this paper analyzed land ecological security patterns and changes of the city clusters. Based on the results of land ecological security assessment, the paper set up the business-as-usual scenario and the ecological protection scenario. By combining the multinomial logistic regression and Multi-Criteria Evaluation method (MCE), the paper constructed the CA-Markov model to predict land use patterns in 2030 under the two scenarios, and conducted comparative analyses. Results show: (1) In 2005, 2010, and 2015, the average ecological security of the city clusters around Poyang Lake were 0.574, 0.573, and 0.571, respectively. The security level were low in the middle and high in the east and west in the spatial layout. (2) In 2030, the newly developed urban lands under the business-as-usual scenario will mainly occur in Jiujiang, Shangrao, and Nanchang. Under the ecological protection scenario, the lands for constructing towns and other construction purposes will be restricted properly for compact urban growth. (3) Under the ecological protection scenario, the area of high ecological security zones will be 39.39% larger than that under the business-as-usual scenario, and it

收稿日期:2019-06-15;修回日期:2019-12-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(41571384)。[Foundation item: National Natural Science Foundation of China, No.41571384.]

作者简介:单渌铤(1994—),女,浙江杭州人,硕士生,研究方向为土地利用。E-mail: shanluyi361@163.com

*通讯作者:潘鹏(1985—),男,湖北武汉人,博士,副研究员,研究方向为资源环境信息理论与技术。E-mail: dpper@126.com

tends to be distributed more evenly. The ecological security of the city clusters, including areas around Poyang Lake, the central part of Jiujiang, Xinyu and Ji'an, will be effectively protected. It is hoped that the present study can serve as a reference for the land use planning and ecological protection of the city clusters around Poyang Lake.

Key words: land use; land ecological security; geographical simulation; multinomial logistic regression; Multi-Criteria Evaluation method (MCE); cellular automata; Markov model; city clusters around Poyang Lake

*Corresponding author: PAN Peng, E-mail: dpper@126.com

摘要:在国家大力推进新型城镇化和落实城市群空间规划的背景下,评价城市群土地生态安全水平,并以此为限制条件预测城市群未来土地利用格局,对城市群可持续发展具有重要意义。本文以环鄱阳湖城市群为研究对象,对城市群土地生态安全格局和变化进行分析,根据土地生态安全评价结果设置自然发展情景和生态保护情景,结合多分类 Logistic 回归和多标准评价方法(MCE),构建 CA-Markov 模型,预测2种情景下2030年土地利用格局并进行对比分析。研究结果表明:① 2005、2010和2015年,环鄱阳湖城市群网格平均生态安全值分别为0.574、0.573和0.571,空间布局上呈现“中部低、东西高”的特征;② 预测2030年,自然发展情景下新增城镇用地主要位于九江市、上饶市和南昌市,生态保护情景下限制城镇用地和其他建设用地向土地生态安全高值区扩展,使得城镇用地和其他建设用地扩展更加集中;③ 预测生态保护情景下,高生态安全区面积比自然发展情景下多39.39%且分布更加均匀,包括鄱阳湖周边区域、九江市中部以及新余市和吉安市,城市群生态安全得到有效保护。该研究可为环鄱阳湖城市群土地利用规划及生态保护提供参考。

关键词:土地利用;土地生态安全;地理模拟;多分类 Logistic 回归;多标准评价方法(MCE);元胞自动机;马尔科夫模型;环鄱阳湖城市群

1 引言

土地利用/覆盖变化反映了自然环境与人类活动相互作用的结果,自20世纪90年代以来,成为了全球环境变化和可持续发展研究的重要课题^[1]。城镇经济快速发展和人口的增加,推动了建设用地迅速扩展,而土地资源的浪费以及土地结构的不合理,使得生态环境质量不断下降^[2-3]。城市群是我国城镇化的空间载体,但其面临的经济发展与生态保护之间的矛盾制约了区域的可持续发展^[4]。因此,评估城市群土地生态安全,预测未来土地利用变化情况,对优化土地利用方式和保护生态环境具有重要意义。

生态安全是指生态资源和环境能满足社会经济发展需求的状态,是国家稳定与发展的基础^[5]。而土地作为城市发展的基础,其数量和布局的变化对生态安全具有重要影响。为识别土地利用过程中的生态安全风险,促进土地资源的优化配置和可持续利用,近年来土地生态安全评价逐渐成为生态安全研究领域的重要分支^[6]。国外研究主要从土地景观格局角度对生态安全进行评价^[7-9],而国内研究主要集中于生态健康评价、生态系统服务价值评价、生态承载力评价、生态风险评价等方面^[10-13]。张家其等^[14]基于压力—状态—响应(PSR)模型,从社会经济、环境、政策等关系入手,构建了土地生态安

全评价指标体系,刘焱序等^[15]从“潜力—连通度—恢复力”多维度构建土地生态安全评价指标体系,为土地生态安全评价提供了综合化思路。总体来看,已有研究主要集中于对区域过去及当前土地生态安全的评价,对土地生态安全与土地利用格局预测相结合的研究相对较少。随着研究的深入,土地生态安全评价逐渐由单一的静态评价转变为动静结合的“评价—预测—调控”一体化发展趋势^[16-17]。张利、何玲等^[2,18]将生态安全格局作为限制因素,通过土地利用模拟的方法预测未来的土地利用格局,但在土地利用演变的影响因素选择上不够全面,权重设置主观性较强。土地生态安全评价是土地资源优化配置的基础,而土地利用模拟是土地利用变化趋势预测的方法,在顾及土地生态安全格局的基础上科学预测土地利用演变趋势,可以为土地利用空间格局优化提供重要参考依据。

目前,许多研究着重于土地利用模拟及预测,主要方法有元胞自动机模型^[19]、马尔科夫链模型^[20]、系统动力学模型^[21]、神经网络模型^[22]、CLUE-S模型^[23]以及它们的综合模型^[24-25]等。从研究内容上看,土地利用模拟预测也逐渐从单一的城镇用地扩展模拟转变为多地类模拟。而CA-Markov模型是一个能有效预测土地利用时空动态变化的综合模型,结合了CA模型模拟复杂系统的空间变化能力和Mar-

kov的长期预测优势,有利于提高模拟精度,因此该模型在多地类模拟研究中得到了广泛的应用^[26]。

环鄱阳湖城市群作为长江中游城市群的组成之一,从1983年的“山江湖工程”开始,江西省就十分重视鄱阳湖流域的生态文明建设。《长江中游城市群发展规划》^[27](2015年)、《环鄱阳湖生态城市群规划(2015—2030)》^[28]致力于将环鄱阳湖城市群打造成国家绿色城镇化先行示范区。在环鄱阳湖城市群土地利用过程中,应注重社会经济与生态环境协调发展,保持良好的区域发展优势^[29]。因此,本文以环鄱阳湖城市群作为研究区域,评价其2005、2010和2015年土地生态安全。根据土地生态安全评价结果,设置自然发展情景和生态保护情景,预测2种情景下2030年的土地利用格局并进行对比分析。其结果可为环鄱阳湖城市群土地利用规划和生态保护提供依据。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

环鄱阳湖城市群位于江西省北部、长江中下游,113°34'E—118°28'E,26°57'N—30°04'N,包括南昌市、景德镇市、萍乡市、九江市、新余市、鹰潭市、宜春市、上饶市全部行政辖区和抚州市的临川区、东乡县、金溪县、崇仁县,吉安市的新干县、峡江县,共10个地级市,56个区县(包括县、区、市区、县级市),总面积9.2万km²。

2.2 数据来源

土地利用数据、DEM数据和道路数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。其中土地利用数据为土地利用现状遥感监测数据库提供的2005、2010和2015年3期30 m×30 m土地利用栅格数据集^[30],将土地利用类型划分成8类,分别为耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用和未利用土地(图1)。DEM数据为2015年1000 m×1000 m的栅格数据^[31],道路数据为2015年矢量数据。GDP空间数据、人口空间数据分别来源于《中国公里网格GDP分布数据集》^[32]、《中国公里网格人口分布数据集》^[33]2005年和2010年1000 m×1000 m的栅格数据。地级市GDP、从业人员数等面板数据来自于2006年和2011年《江西统计年鉴》^[34-35],用于计算城市流强度。为在模拟时保持栅格尺度一致,将栅格数据分辨率全部重采样成30 m×30 m。

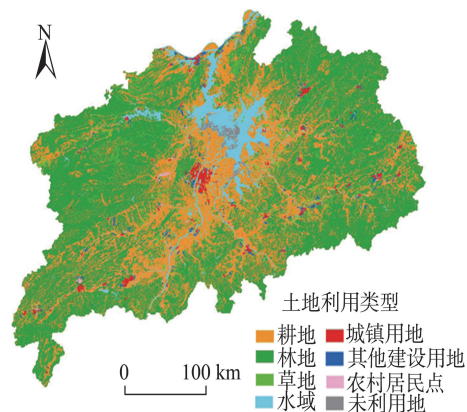


图1 环鄱阳湖城市群区位图及土地利用现状
Fig. 1 Land use status of the city clusters around Poyang Lake

3 研究方法

以2005、2010和2015年的土地利用现状图为基础,从生态景观结构、生态功能、生态弹性和生态干扰度4个方面构建土地生态安全评价指标体系,对环鄱阳湖城市群土地生态安全进行评价并分析其变化。在此基础上设置自然发展情景和生态保护情景,通过CA-Markov模型预测环鄱阳湖城市群2030年的土地利用格局。具体流程见图2。

3.1 土地生态安全评价

根据相关文献^{[36]–[37]}以及研究区范围和斑块平均面积,将研究区域划分为6 km×6 km的网格,作为土地生态安全评价单元,共计2744个网格,并从生态景观结构、生态功能、生态弹性和生态干扰度4个方面构建了环鄱阳湖城市群土地生态安全评价指标体系,计算每个网格内的土地生态安全评价价值。

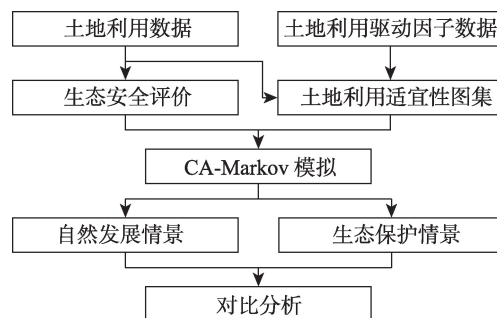


图2 环鄱阳湖城市群土地利用情景模拟技术流程
Fig. 2 Technical flowchart of land use simulation in the city clusters around Poyang Lake

生态景观结构是生态系统稳定性的直接表现,合理的景观结构与区域的可持续发展密切相关。本文选取景观形状指数、蔓延度指数、分离度指数和香农均匀度指数来表征景观结构。景观指数的值在Fragstats 4.0软件中进行计算。生态功能是指生态系统调节环境以及提供资源的能力,可以用生态系统服务价值来表示。生态系统服务价值的计算采用谢高地等制定的中国生态系统单位面积生态系统服务价值当量表^[38],得到耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用地和未利用地的生态系统服务价值当量分别为7.90、28.12、11.67、50.06、1.39、1.39、1.39、1.39,根据各类用地的面积计算得到每个网格内的生态系统服务价值。生态干扰度是人类活动影响生态系统的强度,采用每个网格内的建设用地面积来表示。生态恢复力反映了生态系统自我调节和自我维持的能力,可用生态弹性度表示。生态弹性度的计算参考相关文献^[39-40],分别将单位面积耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用地和未利用地的生态弹性分值设为0.7、0.9、0.3、0.8、0.2、0.2、0.2和0.1,根据各类用地的面积计算得到每个网格内的生态弹性度。

项目层采用层次分析法计算权重,生态景观结构的4个指标层采用熵权法计算权重。参考相关文献[5]、[41],层次分析法判断矩阵设置如表1所示,检验系数 $CR=0.0076<0.1$,判断矩阵通过一致性检验。熵权法通过MATLAB实现。最终土地生态安全指标体系及权重如表2所示。通过加权求和得到每个网格的生态安全值,公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^7 E_i W_i \quad (1)$$

式中: V 为生态安全值; E_i 为标准化后的生态安全指标值; W_i 为指标权重。

表1 环鄱阳湖城市群土地生态安全评价指标
层次分析法判断矩阵

Tab.1 Analytic hierarchy process judgment matrix of land ecological security assessment index in the city clusters around Poyang Lake

因素	生态景观结构	生态功能	生态干扰度	生态恢复力
生态景观结构	1	1	2	2
生态功能	1	1	3	3
生态干扰度	1/2	1/3	1	1
生态恢复力	1/2	1/3	1	1

表2 环鄱阳湖城市群土地生态安全评价指标体系

Tab.2 Land ecological security assessment index in the city clusters around Poyang Lake

目标层	项目层	指标层	正/负向	权重
土地生态安全	生态景观结构	景观形状指数	正	0.167
		蔓延度指数	正	0.032
		分离度指数	负	0.018
		香农均匀度指数	正	0.103
	生态功能	生态系统服务价值	正	0.391
	生态干扰度	建设用地面积	负	0.144
	生态恢复力	生态弹性度	正	0.144

3.2 土地利用演变模拟

基于2005、2010和2015年环鄱阳湖城市群土地利用现状图,构建CA-Markov模型,预测2030年自然发展情景下和生态保护情景下土地利用格局,数据分辨率均为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。自然发展情景下不设置生态安全区保护条件,而生态保护情景下限制城镇用地和其他建设用地向高生态安全区扩展。

3.2.1 多分类Logistic回归

多分类Logistic回归方法是对多分类因变量进行回归分析,筛选出对事件发生具有显著影响的因素,并生成显著因素的回归系数以及事件发生的概率,能有效表示土地利用变化和驱动因素之间的关系^[42]。公式如下:

$$Y_k = \ln \left[\frac{p(y=k|x)}{p(y=0|x)} \right] = \beta_{0k} + \beta_{1k}x_1 + \beta_{2k}x_2 + \dots + \beta_{pk}x_p \quad (2)$$

式中: y 为因变量; x 为自变量。设因变量有 m 个, $y=0$ 为参照组,则 $k=0,1,2,\dots,m-1$ 。 $p(y=k|x)$ 为 y 的条件概率; β 是多分类Logistic回归方程的系数,表示自变量与因变量的相关程度。

因此本文采用多分类Logistic回归分析2005—2010年、2010—2015年环鄱阳湖城市群8类用地变化的驱动力。在ArcGIS 10.2平台中,提取8类用地不变的区域和变化的区域,随机生成样本点,样本点个数为各自区域栅格个数的1%,分别赋值为0~8,作为因变量,其中不变的区域为参照组。基于数据的可获得性,从社会经济因素、自然因素和邻域因素3个方面选取9个驱动因子,作为自变量(表3),将标准化后9个驱动因子数据提取到样本点中。其中,在驱动力指标中纳入城市流强度,反映城市群内部社会经济相互作用的强度,增强模型的可靠性^[43-45]。城市流强度的计算参考何春阳等提出的重力场模型^[43]。将因变量和自变量导入SPSS软件中,经多重共线性检验,得到方差膨胀系数VIF均小于4,说明

表3 环鄱阳湖城市群土地利用变化驱动因子

Tab. 3 Potential driving factors of land use change in the city clusters around Poyang Lake

变量类型	变量	说明
社会经济因素	地均GDP	期初GDP空间数据
	人口	期初人口空间数据
	城市流强度	期初城市流强度,根据参考文献公式及统计数据计算
自然因素	DEM	—
	坡度	根据DEM数据进行计算
邻域因素	距道路距离	距道路的最近距离
	距城镇距离	距期初城镇用地的最近距离
	距农村距离	距期初农村居民点的最近距离
	距水域距离	距期初水域的最近距离

各因子之间不存在多重共线性^[46],可进行多分类Logistic回归分析。

3.2.2 多标准评价方法(MCE)

多标准评价方法(Multi-Criteria Evaluation, MCE)提供了一种在多重因素、多重标准,甚至互相冲突的因素影响下,评估一系列可供选择的方案和决策中找出最优决策的分析方法^[47]。利用IDRISI软件中MCE模块,评价各类用地的适宜性。适宜性评价标准包括限制因子和约束因子。对第 k 类用地来说,限制因子为基期第 k 类用地、水域和城镇用地,约束因子为多分类Logistic回归中的自变量。限制因子不可转化为第 k 类用地,赋值为0,其他区域可转化为第 k 类用地,赋值为1。生态保护情景下,对于城镇用地和其他建设用地,在限制因子中增加2015年高生态安全区,限制城镇用地和其他建设用地向高生态安全区扩展,将2015年高生态安全区赋值为0,其他区域赋值为1,并转为分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的栅格数据。根据多分类Logistic回归中自变量的显著性水平确定各类用地的约束因子,非显著相关的不纳入约束因子中。通过模糊隶属函数对各约束因子进行标准化,根据系数的正负确定标准化的方法为单调递增或单调递减,使其分布在0~255区间。根据系数的绝对值大小确定权重,使各类用地的约束因子权重之和为1。通过加权线性合并法叠加限制因子和约束因子,得到各类用地的适宜性图像,公式如下:

$$S_k = \prod_{i=1}^m a_{ik} \times \sum_{p=1}^n (b_{pk} \times w_{pk}) \quad (3)$$

式中: S_k 为第 k 类用地适宜性($k=1, 2, \dots, 8$); S_k 值越高,表示该区域越容易转化为第 k 类用地; a_{ik} 为限制因子($i=1, 2, \dots, m$); b_{pk} 为约束因子($p=1, 2, \dots, n$);

w_{pk} 为约束因子权重。

最后,利用COLLECTION EDIT工具将各类用地的适宜性图像打包成土地利用适宜性图集。

3.2.3 CA-Markov模型

元胞自动机是一种时间、空间、状态都离散的模式,能够模拟具有时空特征的复杂动态系统^[48]。元胞是元胞自动机最基本的组成部分,一个元胞在在下一时刻的状态取决于自身和邻域元胞状态以及转换规则。其公式如下:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (4)$$

式中: S_t, S_{t+1} 为 $t, t+1$ 时刻的元胞状态集; f 为转换规则; N 为元胞邻域。

Markov模型是一种预测事件发生的概率的方法,根据事件的目前状况预测其将来各个时刻变动状况,给出未来每一种结果出现的概率,常用于具有无后效性特征地理事件的预测^[49]。其公式为:

$$S_{t+1} = S_t \times P \quad (5)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}, \begin{cases} 0 \leq P_{ij} \leq 1 & (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 & (i, j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_t, S_{t+1} 为 $t, t+1$ 时刻的土地利用状态; P 为状态转移概率矩阵。

CA-Markov模型综合了CA和Markov模型的优势,可以纳入经济、人口、地形、交通等影响因素,可用于多地类土地利用模拟,提高了模拟的精度。CA-Markov模型以基期土地利用数据为起始状态,以元胞邻域、土地利用适宜性图集、过去土地利用转移概率为依据,以Markov链预测的土地利用面积为迭代终止条件,对土地利用类型进行重新分配。在IDRISI软件Markov模块中,影像时间间隔设为5年,比例误差设为0.15,向前预测的周期分别设为5年和15年,得到2005—2010年和2010—2015年的Markov转移矩阵。在CA-Markov模块中,以2010年影像作为起始影像,输入2005—2010年土地利用适宜性图集和Markov转移矩阵,CA循环次数设为5,CA滤波器设为 5×5 ,模拟2015年土地利用格局。将2015年模拟图像与真实图像对比,采用Kappa系数对土地利用模拟结果进行检验,公式如下:

$$Kappa = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \quad (7)$$

$$p_0 = \frac{\sum_{i=1}^s x_{ii}}{n} \quad (8)$$

$$p_e = \frac{\sum_{i=1}^8 (a_i \times b_i)}{n^2} \quad (9)$$

式中： p_0 为观测一致率； p_e 为期望一致率； x_{ii} 为各类用地模拟正确的栅格数量； a_i 为各类用地真实的栅格数量； b_i 为各类用地模拟的栅格数量； n 为研究区栅格总数。

在精度满足要求的基础上，以2015年影像作为起始影像，结合2010—2015年土地利用适宜性图集和Markov转移矩阵，CA循环次数设为15，预测2030年不同情景下的土地利用格局。

4 结果与分析

4.1 土地生态安全评价

4.1.1 土地生态安全格局

参考相关文献[50]—[52]并根据研究区土地生态安全值分布规律，在自然断点法分级的基础上进行微调，以便于不同年份之间的比较，将环鄱阳湖城市群土地生态安全分为5个等级：低生态安全（小于0.35），较低生态安全（0.35~0.45），中等生态安全（0.45~0.55），较高生态安全（0.55~0.65），高生态安全（大于0.65）。2005—2015年不同级别土地生态安全面积如表4所示，土地生态安全空间格局如图3所示。

2005—2015年，环鄱阳湖城市群整体生态安全值逐渐减小，网格平均生态安全值分别为0.574、0.573和0.571。总体来看，2005—2015年，较高生态安全区面积最大，超过72%，其次为中等生态安全区。2005—2010年，低生态安全区和较低生态安全区面积分别增加11.48%和7.05%，其他级别生态安全区面积变化率均小于3%，2010—2015年各级别生态安全区面积变化幅度增大，其中低生态安全

表4 2005、2010和2015年环鄱阳湖城市群各级别土地生态安全区域面积

Tab. 4 The areas of each land ecological security level in the city clusters around Poyang Lake in 2005, 2010, and 2015 (km²)

生态安全级别	2005年	2010年	2015年
低生态安全	627.13	699.13	773.12
较低生态安全	2042.50	2186.50	2393.39
中等生态安全	13 679.37	13 771.99	14 599.22
较高生态安全	67 120.29	66 994.62	65 992.50
高生态安全	8421.97	8239.01	8133.03

区、较低生态安全区和中等生态安全区面积分别增加10.58%、9.46%和6.01%，而较高生态安全区面积和高生态安全区面积分别减少1.50%和1.29%。说明高生态安全区和较高生态安全区逐渐向中低生态安全发展，快速城市化过程与生态安全的矛盾日益凸显。

从空间分布上看，2005—2015年，环鄱阳湖城市群总体生态安全水平呈现“中部低、东西高”的特征。南昌市市区生态安全评价价值始终处于低或较低生态安全水平，市区周围多为中等生态安全水平，主要原因是南昌市城市化水平高，建设用地面积大，生态用地面积相对较小。城市群东部和西部主要为较高生态安全水平，主要是因为这些区域以林地为主，建设用地面积小且不集中。上饶市、南昌市和九江市交界处以及北部九江市、南部新余市和吉安市部分地区处于高生态安全水平，这些区域均靠近水域，说明水域对土地生态安全具有重要影响。

4.1.2 土地生态安全变化

根据各时期网格生态安全值变化的特征，在自然断点法分级的基础上进行调整，将环鄱阳湖城市群土地生态安全变化程度分为4个等级：明显减少

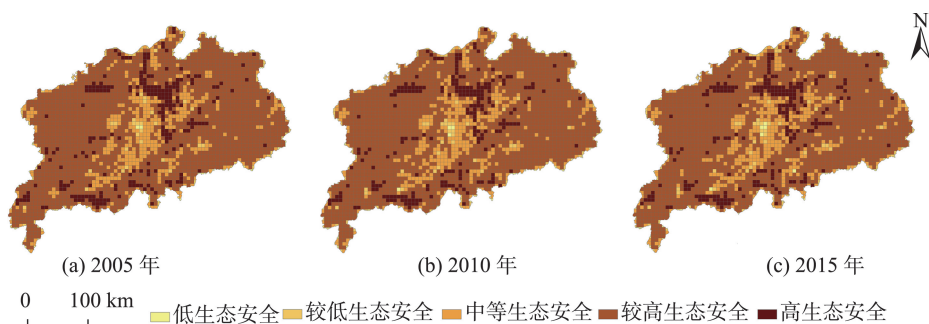


图3 2005、2010和2015年环鄱阳湖城市群土地生态安全格局

Fig. 3 Land ecological security patterns in the city clusters around Poyang Lake in 2005, 2010 and 2015

(小于-0.075),减少(-0.075~0),增加(0~0.075),明显增加(大于0.075)。各时期的变化如图4所示。

总体来看,2005—2010年生态安全值减少的区域面积占比为80.36%,增加的区域分布较为均匀,面积占比为18.22%,明显减少和明显增加的区域呈零星分布。这一时期网格生态安全值减少主要是由于水域转为未利用地和耕地,而增加主要是由于其他用地类型转为耕地和水域。2010—2015年生

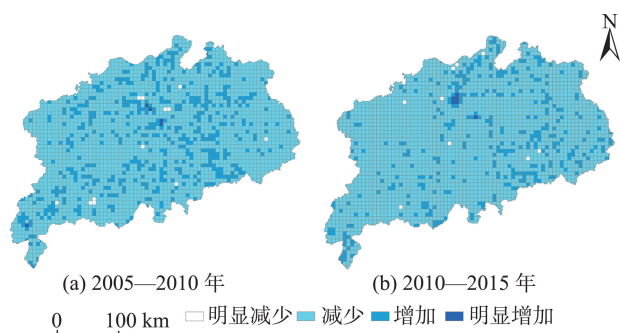


图4 2005—2015年环鄱阳湖城市群土地生态安全变化
Fig. 4 Changes of the land ecological security patterns in the city clusters around Poyang Lake from 2005 to 2015

态安全值减少的区域面积占比86.25%,增加的区域主要分布在城市群东部及西南部,明显增加的区域集中在上饶市、南昌市和九江市交界处,明显减少的区域呈零星分布。这一时期生态安全值减少主要是由于耕地、林地转为其他建设用地,而增加主要是由于未利用地转为水域。

4.2 土地利用多情景模拟

4.2.1 土地利用适宜性结果

通过多分类Logistic回归确定各类用地的约束因子和权重(表5和表6)。2005—2010年和2010—2015年各类用地的适宜性图集,如图5和图6所示。生态保护情景下,城镇用地和其他建设用地的适宜性图如图7所示。

4.2.2 土地利用模拟结果及精度

通过CA-Markov模型得到2015年土地利用模拟结果,如图8所示。将模拟结果与2015年实际土地利用现状图进行对比,计算得到总体精度为0.9737,Kappa系数为0.8784。根据Cohen提出的Kappa系数分类评价标准^[53],Kappa系数超过0.8,

表5 2005—2010年环鄱阳湖城市群土地利用约束因子和权重

Tab. 5 Land use driving factors and weights in the city clusters around Poyang Lake from 2005 to 2010

约束因子/用地类型	耕地	林地	草地	水域	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
地均GDP	—	0.22(+)	0.23(+)	—	—	0.11(+)	—	—
人口	—	0.53(-)	0.25(-)	—	0.03(+)	0.10(-)	0.05(+)	0.21(-)
城市流强度	0.20(+)	0.11(+)	0.04(+)	—	0.03(+)	0.03(+)	0.15(-)	—
DEM	0.08(-)	0.05(+)	0.24(-)	0.54(-)	0.07(+)	—	0.13(-)	0.21(-)
坡度	0.24(-)	—	—	0.04(-)	0.02(-)	0.23(-)	0.15(-)	—
距道路距离	0.10(+)	—	0.05(+)	0.02(+)	0.09(-)	0.20(-)	0.31(-)	0.01(+)
距城镇距离	0.13(-)	0.03(-)	0.04(-)	0.01(+)	0.63(-)	0.11(-)	0.10(-)	0.01(+)
距农村距离	0.06(-)	0.02(+)	0.04(+)	0.05(+)	0.07(-)	0.18(-)	0.04(+)	0.02(+)
距水域距离	0.19(-)	0.04(-)	0.11(+)	0.34(-)	0.06(-)	0.04(+)	0.07(-)	0.54(-)

注:“—”表示非显著相关,不纳入约束因子中;“-”表示负相关;“+”表示正相关。

表6 2010—2015年环鄱阳湖城市群土地利用约束因子和权重

Tab. 6 Land use driving factors and weights in the city clusters around Poyang Lake from 2010 to 2015

约束因子/用地类型	耕地	林地	草地	水域	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
地均GDP	0.06(+)	0.06(+)	—	0.03(+)	0.06(+)	—	0.10(+)	0.11(-)
人口	0.05(-)	—	0.83(-)	0.05(-)	0.01(-)	—	0.09(-)	0.09(-)
城市流强度	0.08(-)	0.46(-)	0.10(-)	0.07(-)	0.02(-)	0.16(-)	0.01(-)	0.23(-)
DEM	0.34(-)	0.11(-)	—	0.50(-)	—	—	0.08(-)	0.39(-)
坡度	—	0.08(+)	0.03(-)	0.02(+)	0.04(-)	—	0.06(-)	0.03(-)
距道路距离	0.09(+)	—	0.03(-)	—	0.41(-)	0.21(-)	0.26(-)	0.03(-)
距城镇距离	0.16(-)	0.23(-)	—	0.17(-)	0.12(-)	—	0.14(-)	0.12(-)
距农村距离	0.11(-)	0.06(-)	0.01(-)	0.05(-)	0.32(-)	0.17(-)	0.22(-)	—
距水域距离	0.11(-)	—	—	0.11(+)	0.02(-)	0.46(-)	0.04(-)	—

注:“—”表示非显著相关,不纳入约束因子中;“-”表示负相关;“+”表示正相关。

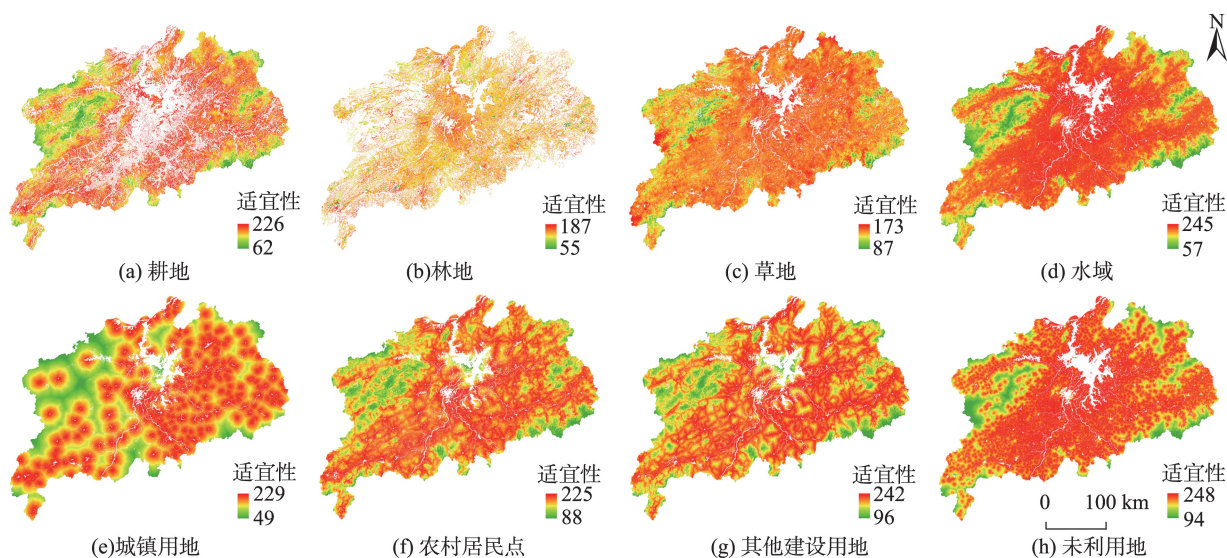


图5 2005—2010年环鄱阳湖城市群各类用地适宜性

Fig. 5 Suitability of each land use type in the city clusters around Poyang Lake from 2005 to 2010

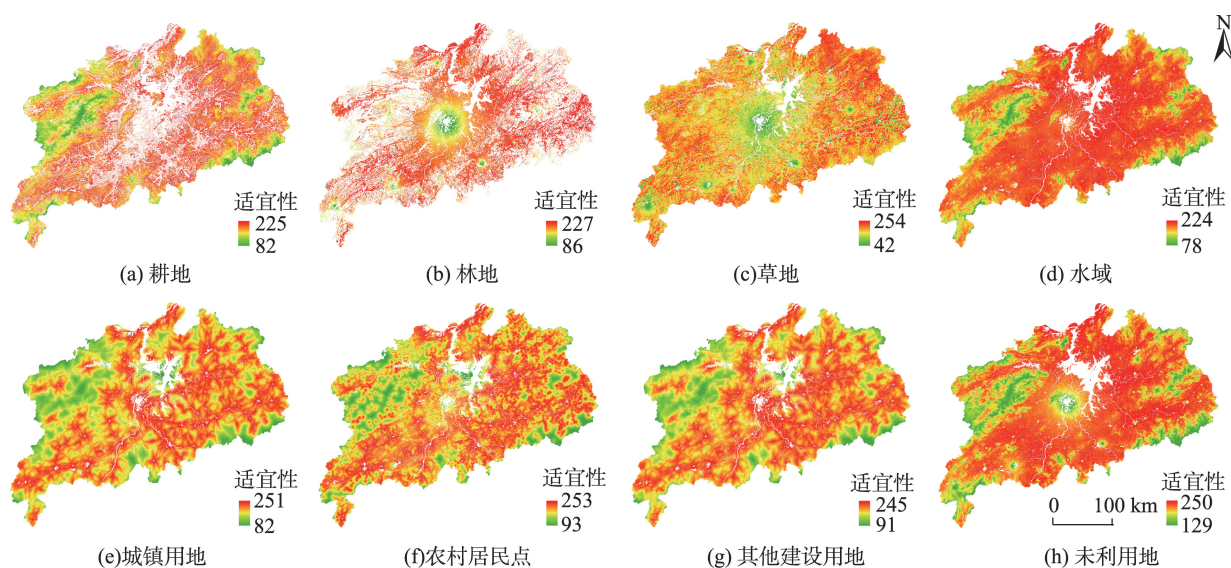


图6 2010—2015年环鄱阳湖城市群各类用地适宜性

Fig. 6 Suitability of each land use type in the city clusters around Poyang Lake from 2010 to 2015

模拟精度属于最佳,所构建的CA-Markov模型可以达到土地利用模拟的效果。

4.2.3 土地利用多情景预测

2030年环鄱阳湖城市群在自然发展情景和生态保护情景下,土地利用预测结果如表7和图9所示。由于模拟时未对各类用地的数量进行约束,因此从整体来看,2种情景下各类用地面积一致,但土地利用布局不同。

从数量上看,预测2015—2030年,耕地和林地面积明显减少,其中耕地面积减少2703.71 km²;林地面积减少3125.32 km²;草地面积增加了10.35%,

主要由林地转化而来;水域面积减少了0.97%;未利用地面积减少了7.57%。城镇用地扩展明显,面积增加了171.64%,主要来源于耕地和林地。农村居民点面积减少,主要转化为城镇用地。其他建设用地面积增加了441.77%,主要占用耕地和林地。

从空间布局上看,预测2015—2030年,环鄱阳湖城市群城镇用地在原有城镇用地周围呈现外延式和内填式增长,东北部区域出现跳跃式增长,部分分散的城镇用地向集中连片趋势发展。自然发展情景下,新增城镇用地主要位于城市群北部、东部和中部,九江市、上饶市和南昌市新增城镇用地

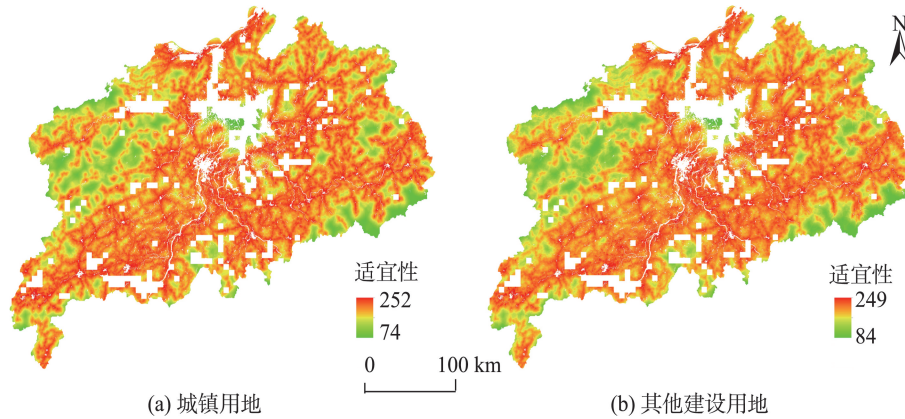


图7 2010—2015年环鄱阳湖城市群生态保护情景下城镇用地和其他建设用地图适宜性

Fig. 7 Suitability of the lands for constructing towns and other construction purposes under the ecological protection scenario in the city clusters around Poyang Lake from 2010 to 2015

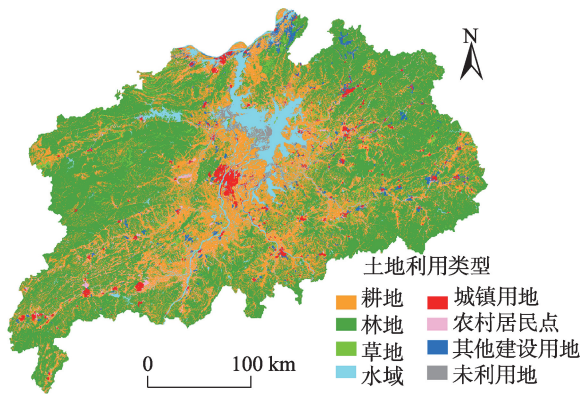


图8 2015年环鄱阳湖城市群土地利用模拟结果

Fig. 8 Land use simulation result in the city clusters around Poyang Lake in 2015

面积明显大于其他城市,分别占新增城镇用地总面积的24.1%、23.8%和13.9%,九江市新增城镇用地沿城市群边界呈带状分布。新增其他建设用地主要分布在原有城镇用地和其他建设用地周围。生态保护情景下,城镇用地和其他建设用地扩展更加集中,九江市新增城镇用地主要集中在东北角,其他建设用地主要由城市群中部向东北方向扩展。

4.3 2种情景下土地生态安全格局对比

生态保护情景与自然发展情景相比,低生态安全区面积一致,较低生态安全区和中等生态安全区面积略多,较高生态安全区面积少4.12%,而高生态安全区面积多39.42%,结果如表8、图10—图12所

表7 2015年和2030年环鄱阳湖城市群土地利用面积

Tab. 7 Land use areas in the city clusters around Poyang Lake in 2015 and 2030 (km²)

年份	耕地	林地	草地	水域	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
2015	29 436.48	49 326.36	2862.00	6163.59	987.81	1628.94	954.76	531.31
2030(预测)	26 732.77	46 201.04	3158.22	6103.61	2683.32	1348.62	5172.59	491.08

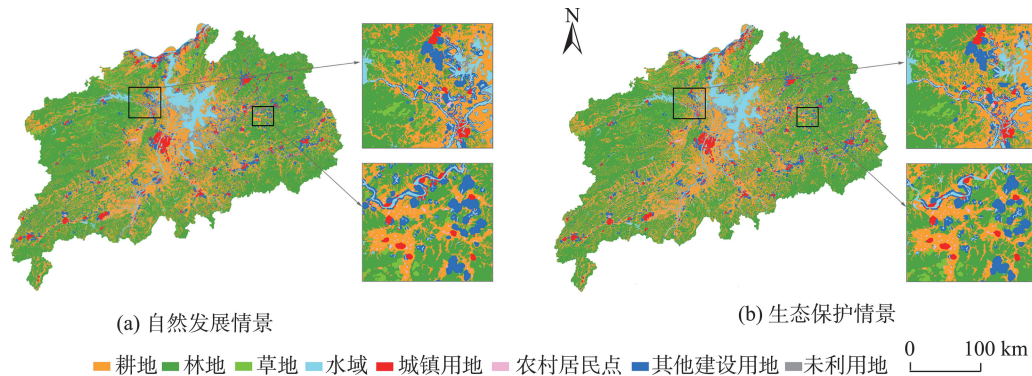


图9 2030年2种情景下环鄱阳湖城市群土地利用预测结果

Fig. 9 Land use simulations of the city clusters around Poyang Lake in 2030 under the two scenarios

表8 2030年2种情景下环鄱阳湖城市群各级别土地生态安全面积

Tab. 8 The areas of land in all ecological security levels under the two scenarios in the city clusters around Poyang Lake in 2030 (km²)

生态安全级别	自然发展情景	生态保护情景
低生态安全	2137.83	2137.83
较低生态安全	5219.69	5543.69
中等生态安全	21 196.60	21 412.60
较高生态安全	58 588.10	56 176.11
高生态安全	4749.04	6621.03

示。结果表明,生态保护情景对高生态安全区起到了有效的保护,减弱了生态安全水平降低的趋势。从空间分布上看,自然发展情景和生态保护情景下,高生态安全区都集中在上饶市、南昌市和九江市交界处、九江市中部以及新余市和吉安市。自然

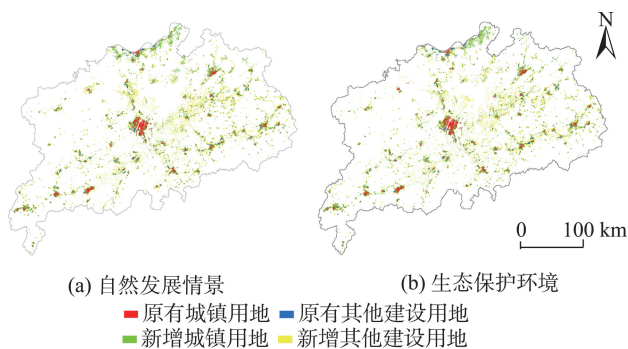


图10 2030年2种情景下环鄱阳湖城市群城镇用地和其他建设用地变化

Fig. 10 Changes of the lands for constructing towns and other construction purposes in the city clusters around Poyang Lake in 2030 under the two scenarios

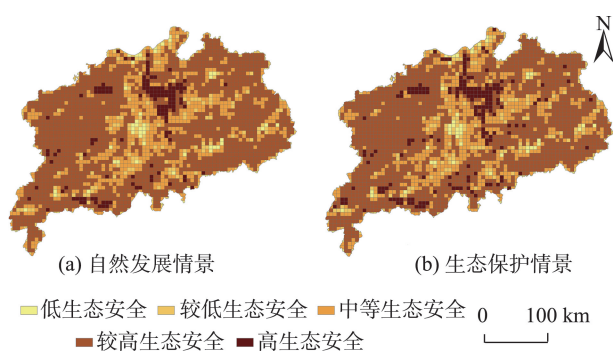


图11 2030年2种情景下环鄱阳湖城市群土地生态安全格局

Fig. 11 Land ecological security patterns under the two scenarios in the city clusters around Poyang Lake in 2030

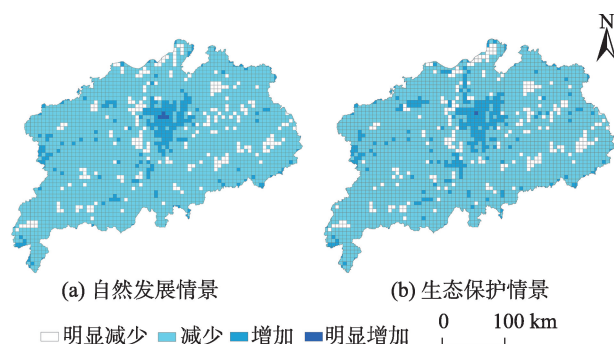


图12 2015—2030年2种情景下环鄱阳湖城市群土地生态安全变化

Fig. 12 Changes of land ecological security patterns under the two scenarios in the city clusters around Poyang Lake from 2015 to 2030

发展情景下,城市群东部几乎没有高生态安全区,而生态保护情景下,城市群东部部分区域呈现高生态安全水平。

自然发展情景下,2015—2030年生态安全值减少的区域面积占83.26%,增加的区域面积占7.60%,主要分布在中部鄱阳湖及周边生态区域,而明显减少和明显增加的面积分别占比8.98%和0.16%。相较于自然发展情景,生态安全情景下,2015—2030年生态安全值减少的区域面积占81.71%,增加的区域面积占9.46%,比自然发展情景多24.55%,中部鄱阳湖及周边、南昌市和宜春市交界处以及北部九江市均有成片区域生态安全值增加。

5 结论与建议

5.1 结论

本文以2005年、2010年和2015年土地利用数据为基础,在土地生态安全评价的基础上,利用CA-Markov模型,预测2030年环鄱阳湖城市群自然发展情景和生态保护情景下的土地利用格局,并对2种情景下的土地生态安全格局进行了对比分析。主要得出以下结论:

(1)2005—2015年,环鄱阳湖城市群网格平均生态安全值分别为0.574、0.573和0.571,较高生态安全区面积均超过72%,空间布局上呈现“中部低、东西高”的特征。上饶市、南昌市和九江市交界处以及北部九江市、南部新余市和吉安市部分地区处于高生态安全水平。2005—2010年和2010—2015年2个时期,均以生态安全值减少的区域为主,占比分别为80.36%和86.25%,而网格生态安全值增加

的主要原因是其他用地类型转为耕地或水域。

(2)多分类Logistic回归、MCE方法和CA-Markov模型相结合,进行土地利用模拟,精度为0.8784,说明该方法能有效模拟土地利用变化。预测2030年,城镇用地和其他建设用地面积分别增加171.64%和441.77%。自然发展情景下,新增城镇用地主要位于九江市、上饶市和南昌市,分别占新增城镇用地总面积的24.1%、23.8%和13.9%;生态保护情景下,限制城镇用地和其他建设用地向高生态安全区扩展,模拟结果表明城镇用地和其他建设用地扩展更加集中,九江市新增城镇用地主要集中在东北角。

(3)相较于自然发展情景,生态保护情景下,高生态安全区面积多39.42%且分布更加均匀,主要包括鄱阳湖周边区域、九江市中部以及新余市和吉安市,并且生态安全值增加的区域面积多24.55%。说明生态保护情景下,研究区土地生态安全得到了有效保护,尤其是高生态安全区。

5.2 建议

针对以上结论,对环鄱阳湖城市群土地利用规划提出以下建议:

(1)在土地利用的过程中,需要提高建设用地集约节约利用水平,控制建设用地占用耕地、林地和水域。而未利用地转为耕地、林地和水域能有效提高生态安全值,因此可以考虑合理开发未利用地,使其转为耕地、林地或水域,改善土地生态安全状况。

(2)环鄱阳湖城市群土地利用过程中需要重点关注九江市、上饶市和南昌市,有效控制建设用地的扩展速度和扩展方向,加强城市内部土地挖潜。

(3)设置生态安全保护区域,主要包括鄱阳湖周边、九江市中部及新余市和吉安市南部,限制建设用地向这些区域扩展,转而向生态安全低值区扩展。

参考文献(References):

[1] 刘纪远,张增祥,庄大方,等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].地理研究,2003,22(1):1-12. [Liu J Y, Zhang Z X, Zhuang D F, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s[J]. Geographical Research, 2003,22(1):1-12.]

[2] 张利,周亚鹏,门明新,等.基于不同种类生态安全的土地利用情景模拟[J].农业工程学报,2015,31(5):308-316. [Zhang L, Zhou Y P, Men M X, et al. Land use scenario simulation with different types of ecological security[J].

Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(5):308-316.]

- [3] 文雅,龚建周,胡银根,等.基于生态安全导向的城市空间扩展模拟与分析[J].地理研究,2017,36(3):518-528. [Wen Y, Gong J Z, Hu Y G, et al. Simulation and analysis of urban land expansion conducted by ecological security[J]. Geographical Research, 2017,36(3):518-528.]
- [4] 刘菁华,李伟峰,周伟奇,等.京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测[J].生态学报,2018,38(5):1650-1660. [Liu J H, Li W F, Zhou W Q, et al. Prediction of expansion pattern and impact on regional ecological security of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(5):1650-1660.]
- [5] 朱卫红,苗承玉,郑小军,等.基于3S技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J].生态学报,2014,34(6):1379-1390. [Zhu W H, Miao C Y, Zheng X J, et al. Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(6):1379-1390.]
- [6] 秦晓楠,卢小丽,武春友.国内生态安全研究知识图谱——基于Citespace的计量分析[J].生态学报,2014,34(13):3693-3703. [Qin X N, Lu X L, Wu C Y. The knowledge mapping of domestic ecological security research: Bibliometric analysis based on Citespace[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(13):3693-3703.]
- [7] Becker A, Körner C, Brun J J, et al. Ecological and land use studies along elevational gradients[J]. Mountain Research & Development, 2007,27(1):58-65.
- [8] Ruth D F, Andrew H, Turner B L, et al. Land use change around protected areas: management to balance human needs and ecological function[J]. Ecological Applications, 2007,17(4):1031-1038.
- [9] King R S, Whigham D F, Weller D E, et al. Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams[J]. Ecological Applications, 2005,15(1):137-153.
- [10] 徐浩田,周林飞,成遣.基于PSR模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究[J].生态学报,2017,37(24):8264-8274. [Xu H T, Zhou L F, Cheng Q. Study on ecosystem health evaluation and risk assessment for Linghekou wetlands based on a PSR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(24):8264-8274.]
- [11] 魏慧,赵文武,张骁,等.基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例[J].生态学报,2017,37(11):3830-3839. [Wei H, Zhao W W, Zhang X, et al. Regional ecosystem service value evaluation based on land use changes: A case study in Dezhou, Shandong Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37

- (11):3830-3839.]
- [12] 熊建新,陈端吕,谢雪梅.基于状态空间法的洞庭湖区生态承载力综合评价研究[J].经济地理,2012,32(11):138-142. [Xiong J X, Chen D L, Xie X M. Comprehensive evaluation on ecological carrying capacity based on state-space techniques in Dongting Lake Region[J]. Economic Geography,2012,32(11):138-142.]
- [13] 彭文君,舒英格.基于GIS的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J].水土保持研究,2018,25(1):342-348. [Peng W J, Shu Y G. Assessment one cological risk of land use spatial change at county level in rocky desert if ication mountains area based on GIS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(1):342-348.]
- [14] 张家其,葛咏,吴宜进,等.武陵山区生态安全格局演变分析[J].地球信息科学学报,2016,18(3):315-324. [Zhang J Q, Ge Y, Wu Y J, et al. Analysis on the evolution of ecological security pattern in Wuling Mountain[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(3):315-324.]
- [15] 刘焱序,王仰麟,彭建,等.基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J].地理学报,2015,70(7):1052-1067. [Liu Y X, Wang Y L, Peng J, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the 3D framework of adaptive cycle[J]. ActaGeographicaSinica, 2015,70(7):1052-1067.]
- [16] 熊建华.土地生态安全评价研究回顾、难点与思考[J].地理与地理信息科学,2018,34(6):71-76. [Xiong J H. Review, difficulties and thinking of land ecological security evaluation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018,34(6):71-76.]
- [17] Bundy A, Gomez C, Cook A M. Scrupulous proxies: Defining and applying a rigorous framework for the selection and evaluation of a suite of ecological indicators[J]. Ecological Indicators, 2019,104:737-754.
- [18] 何玲,贾启建,李超,等.基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J].农业工程学报,2016,32(3):275-284. [He L, Jia Q J, Li C, et al. Land use pattern simulation based on ecosystem service value and ecological security pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(3):275-284.]
- [19] Aburas M M, Ho Y M, Ramli M F, et al. The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016,52:380-389.
- [20] 殷少美,周寅康,濮励杰,等.马尔科夫链在预测土地利用结构中的应用——以湖南娄底万宝镇为例[J].经济地理, 2006,26(S1):120-123. [Yin S M, Zhou Y K, Pu L J, et al. Markov process applied to predicting land use structure: Example for Wanbao town in Loudi city, Hunan[J]. Economic Geography, 2006,26(S1):120-123.]
- [21] 田贺,梁迅,黎夏,等.基于SD模型的中国2010—2050年土地利用变化情景模拟[J].热带地理,2017,37(4):547-561. [Tian H, Liang X, Li X, et al. Simulating multiple land use scenarios in china during 2010-2050 based on system dynamic model[J]. Tropical geography, 2017,37(4):547-561.]
- [22] 徐颖,吕斌.基于GIS与ANN的土地转化模型在城市空间扩展研究中的应用——以北京市为例[J].北京大学学报(自然科学版),2008,44(2):262-270. [Xu Y, Lv B. Application of land transformation model based on GIS and ANN: A case study of Beijing, China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008,44(2):262-270.]
- [23] 陈功勋.基于CLUE-S模型和GIS的土地利用变化模拟研究[D].南京:南京大学,2012. [Chen G X. Simulation of land use change based on CLUE-S model and GIS[D]. Nanjing: Nanjing University,2012.]
- [24] 杜萌,赵冬玲,杨建宇,等.基于元胞自动机复合模型的土地利用演化模拟——以北京市海淀区为例[J].测绘学报,2015,44(S0):68-74. [Du M, Zhao D L, Yang J Y, et al. Simulation of land use change in Haidian District of Beijing City based on CA compound model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2015,44(S0):68-74.]
- [25] 徐昔保,杨桂山,张建明.基于神经网络CA的兰州城市土地利用变化情景模拟[J].地理与地理信息科学,2008,24(6):80-83. [Xu X B, Yang G S, Zhang J M. Scenario modeling of urban land use changes in Lanzhou with ANN-CA[J]. Geography and Geo-Information Science, 2008,24(6):80-83.]
- [26] 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. [Xu X J, Liu H Y, Lin Z S, et al. Scenario analysis of land use change in Jiangsu coast based in CA-Markov model[J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(1):213-218.]
- [27] 国家发展改革委.长江中游城市群发展规划 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-04/16/content_2848120.htm,2015-04-16. [National Development and Reform Commission. Development planning of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-04/16/content_2848120.htm, 2015-04-16.]
- [28] 江西省住房和城乡建设厅.环鄱阳湖生态城市群规划(2015-2030)[EB/OL].http://www.jiangxi.gov.cn/art/2016/8/10/art_5141_266068.html, 2016-08-10. [Department of Housing and Urban Rural Development of Jiangxi

- Province. Planning of ecological city clusters around Poyang Lake(2015-2030)[EB/OL].http://www.jiangxi.gov.cn/art/2016/8/10/art_5141_266068.html, 2016-08-10.]
- [29] 卢新海,陈丹玲,匡兵.区域一体化背景下城市土地利用效率指标体系设计及区域差异——以长江中游城市群为例[J].中国人口·资源与环境,2018,28(7):102-110. [Lu X H, Chen D L, Kuang B. Indicator system design and regional difference of urban land use efficiency under the background of regional integration:a case of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(7):102-110.]
- [30] 资源环境数据云平台.中国土地利用现状遥感监测数据(2005年、2010年和2015年)[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=99>、<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=184>. [Resource and Environment Data Cloud Platform.Remote sensing monitoring data of land use status in China (2005,2010 and 2015)[DB/OL].<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=99>、<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=184>.]
- [31] 资源环境数据云平台.全国DEM1km数据[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123>. [Resource and Environment Data Cloud Platform.DEM data with resolution of 1 km in China[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123>.]
- [32] 黄耀欢,江东,付晶莹.中国公里网格GDP分布数据集[DB/OL].全球变化科学研究数据出版系统,2014.<http://www.geodoi.ac.cn/doi.aspx?doi=10.3974/geodb.2014.01.07.v1>. [Huang Y H, Jiang D, Fu J Y. China's kilometer grid GDP distribution data set[DB/OL].Global Change Research Data Publishing & Repository, 2014.<http://www.geodoi.ac.cn/doi.aspx?doi=10.3974/geodb.2014.01.07.v1>.]
- [33] 付晶莹,江东,黄耀欢.中国公里网格人口分布数据集[DB/OL].全球变化科学研究数据出版系统,2014.<http://www.geodoi.ac.cn/doi.aspx?doi=10.3974/geodb.2014.01.06.v1>. [Fu J Y, Jiang D, Huang Y H. China's kilometer grid population distribution data set[DB/OL].Global Change Research Data Publishing & Repository, 2014.<http://www.geodoi.ac.cn/doi.aspx?doi=10.3974/geodb.2014.01.06.v1>.]
- [34] 江西省统计局.江西统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2006. [Jiangxi Statistical Bureau. Jiangxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2006.]
- [35] 江西省统计局.江西统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011. [Jiangxi Statistical Bureau. Jiangxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2011.]
- [36] 谢小平,陈芝聪,王芳,等.基于景观格局的太湖流域生态风险评估[J].应用生态学报,2017,28(10):3369-3377. [Xie X P, Chen Z C, Wang F, et al. Ecological risk assessment of Taihu Lake basin based on landscape pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(10):3369-3377.]
- [37] 刘世梁,刘琦,张兆苓,等.云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析[J].生态学报,2014,34(13):3728-3734. [Liu S L, Liu Q, Zhang Z L, et al. Landscape ecological risk and driving force analysis in Red River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(13):3728-3734.]
- [38] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919. [Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008,23(5):911-919.]
- [39] 戴兰,王海军,高娟,等.快速城市化背景下景观生态安全时空动态分析——以南昌市区为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2015,49(2):267-273. [Dai L, Wang H J, Gao J, et al. Spatial-temporal dynamic analysis of landscape ecological security in the context of rapid urbanization: A case study of Nanchang City proper[J]. Journal of Central China Normal University, 2015,49(2):267-273.]
- [40] 徐明德,李静,彭静,等.基于RS和GIS的生态系统健康评价[J].生态环境学报,2010,19(8):1809-1814. [Xu M D, Li J, Peng J, et al. Ecosystem health assessment based on RS and GIS[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(8):1809-1814.]
- [41] 张洪,王安琦,宋贝扬.基于OWA的大理市土地生态安全评价研究[J].地理科学,2017,37(11):1778-1784. [Zhang H, Wang A Q, Song B Y. Evaluation of land ecological security in Dali City based on OWA[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(11):1778-1784.]
- [42] 许月卿,田媛,孙丕苓.基于Logistic回归模型的张家口市土地利用变化驱动力及建设用地增加空间模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(5):955-964. [Xu Y Q, Tian Y, Sun P L. Study on driving forces and spatial simulation of land use change in Zhangjiakou City based on logistic regression model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015,51(5):955-964.]
- [43] He C Y, Zhao Y Y, Tian J, et al. Modeling the urban landscape dynamics in a megalopolitan cluster area by incorporating a gravitational field model with cellular automata [J]. Landscape & Urban Planning, 2013,113(113):78-89.]
- [44] 何力,刘耀林.基于城市流模型的城市群扩张模拟——以武汉城市圈为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(2):224-230. [He L, Liu Y L. Simulation urban cooperative expansion in the metropolitan region based on improved CA model: A case study of Wuhan Urban Agglomeration, China[J]. Journal of Central China Nor-

- mal University (Nat.Sci.), 2017,51(2):224-230.]
- [45] 柯新利,丁璐,马才学.城市间相互作用力对城市建设用地利用效率影响研究——以武汉城市圈为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2014,48(5):761-767. [Ke X L, Ding L, Ma C X. The impact of the interactions of cities on the land use efficiency in urban constructions: A case of Wuhan Metropolitan Area[J]. Journal of Central China Normal University, 2014,48(5):761-767.]
- [46] Mustafa A, Heppenstall A, Omrani H, et al. Modelling built-up expansion and densification with multinomial logistic regression, cellular automata and genetic algorithm[J]. Computers Environment & Urban Systems, 2018,67:147-156.
- [47] 方芳,梁旭,李灿,等.空间多准则决策研究概述[J].测绘科学,2014,39(7):9-12. [Fang F, Liang X, Li C, et al. Review of spatial multi-criteria decision making[J]. Science Of Surveying and Mapping, 2014,39(7):9-12.]
- [48] 赵莉,杨俊,李闯,等.地理元胞自动机模型研究进展[J].地理科学,2016,36(8):1190-1196. [Zhao L, Yang J, Li C, et al. Progress on Geographic Cellular Automata Model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(8):1190-1196.]
- [49] 张晓娟,周启刚,王兆林,等.基于MCE-CA-Markov的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J].农业工程学报, 2017,33(19):268-277. [Zhang X J, Zhou Q G, Wang Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in three gorges reservoir area based on MCE-CA-Markov [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(19):268-277.]
- [50] 何珍珍,王宏卫,杨胜天,等.渭干河——库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化[J].生态学报,2019,39(15):1-10. [He Z Z, Wang H W, Yang S T, et al. Spatial-temporal differentiation and pattern optimization of landscape ecological security in the Ugan-Kuqariveroasis[J]. ActaEcologicaSinica,2019,39(15):1-10.]
- [51] 李悦,袁若愚,刘洋,等.基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价[J].生态学杂志,2019,38(3):847-855. [Li Y, Yuan R Y, Liu Y, et al. Ecological security evaluation of wetlands in Qingdao based on the comprehensive weighting method[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(3): 847-855.]
- [52] 王振波,梁龙武,方创琳,等.京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素[J].生态学报,2018,38(12):4132-4144. [Wang Z B, Liang L W, Fang C L, et al. Study of the evolution and factors influencing ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4132-4144.]
- [53] Feinstein A R, Cicchetti D V. High agreement but low kappa: I. The problems of two paradoxes[J]. Journal of Clinical Epidemiology, 1990,43(6):543.