

基于 Markov-DLS 模型的江西省多情景下 土地利用时空演变分析

田益多, 梅 昀, 陈银蓉

(华中农业大学 公共管理学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: [目的] 研究不同情景下未来土地利用结构数量和空间格局变化特征, 为实现区域国土空间格局优化和生态环境保护提供决策参考。[方法] 基于 Markov-DLS 模型, 在土地利用转移参数设置过程引入土地利用生产、生活和生态功能评价结果, 分析江西省 2030 年均衡发展情景、粮食安全情景和生态优先情景下国土空间结构和格局变化特征。[结果] ① 利用 Markov-DLS 模型模拟预测的 2015 年土地利用结构精度在 90% 以上, 空间布局模拟精度达到了 96%, kappa 系数高达 92% 以上; ② 耕地仅在粮食安全情景下有所增长, 增幅为 0.48%。建设用地在 3 类情景下均处于增长态势, 均衡发展情景下增长最快, 增速为 1.15%。林地、草地、水域和未利用地等生态用地在 3 类情景中整体上呈现下降趋势, 生态优先情景下降速最慢, 仅为 -0.36%; ③ 东、南、西部山区林地、草地空间格局相对稳定, 而建设用地均呈现出沿江岸线, 沿湖岸线发展的趋势, 尤其是赣江沿岸和鄱阳湖北岸以及长江沿岸区域最为显著; ④ 整体而言, 生态优先情景下以林地、草地、水域和未利用地为核心的生态空间用地面积占比最大, 相对下降速度最小。[结论] ① Markov-DLS 模型对省级尺度未来土地利用变化预测模拟方面具有较好的适用性。② 江西省 2030 年国土空间土地利用结构变化在均衡发展情景, 粮食安全情景和生态优先情景下呈现出明显的差异性。③ 江西省 2030 年 3 类发展情景下国土空间格局呈现出明显的整体一致性和局部差异性特征。

关键词: 土地利用变化; 情景; Markov-DLS 模型; “三生”空间; 江西省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)03-0218-10

中图分类号: F301.2

文献参数: 田益多, 梅昀, 陈银蓉. 基于 Markov-DLS 模型的江西省多情景下土地利用时空演变分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 218-227. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.030; Tian Yiduo, Mei Yun, Chen Yinrong. Analysis of spatio-temporal evolution of land use in multiple scenarios based on Markov-DLS model in Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 218-227.

Analysis of Spatio-temporal Evolution of Land Use in Multiple Scenarios Based on Markov-DLS Model in Jiangxi Province

Tian Yiduo, Mei Yun, Chen Yinrong

(College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of future land use structure and spatial patterns under different scenarios were studied in order to provide a decision-making reference for the realization of optimal utilization of regional land spatial pattern and protection of ecology and environment. [Methods] Based on the Markov-DLS model and referring to the evaluation results of production-living-ecological functions of different land use, the characteristics of land use structure and spatial patterns under a balanced development scenario, a food security scenario, and an ecological priority scenario in Jiangxi Province in 2030 were analyzed. [Results] ① The accuracy of land use structure predicted by the Markov-DLS model in 2015 was more than 90%, and the accuracy of the spatial layout simulation was 96%. In addition, the kappa coefficient was more than 92%. ② Cultivated land increased only under the food security scenario, with an increase of 0.48%.

收稿日期: 2020-12-14

修回日期: 2021-02-24

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划资助项目“生计资本视角下农地流转行为决策机理、绩效评估与改进研究”(20YJAZH015)。

第一作者: 田益多(1994—), 男(土家族), 湖北省恩施市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与信息技术。Email: 403916765@qq.com。

通讯作者: 梅昀(1964—), 男(汉族), 江西省湖口市人, 教授, 主要从事土地经济与管理研究。Email: meiyun@mail.hzau.edu.cn。

Construction land showed a growth trend under the three scenarios, and the growth rate was the fastest in the balanced development scenario, reaching 1.15%. Ecological land (such as forest land, grassland, water area, and unused land) showed an overall downward trend in all three scenarios, but the decline was the smallest in the ecological priority scenario (only -0.36%). ③ The spatial patterns of forest land and grassland in the eastern, southern, and western mountainous areas of Jiangxi Province were relatively stable, while construction land showed a trend of development along shorelines of rivers and lakes, especially along the Ganjiang River, the Yangtze River, and the north bank of Poyang Lake. ④ On the whole, under the ecological priority scenario, the ecological space land (forest land, grassland, water area, and unused land) were protected, the area proportion was the largest of all the scenarios, and the relative decline rate was the smallest. [Conclusion] ① The Markov-DLS model has good applicability for predicting and simulating future land use changes at the provincial scale. ② Changes in land use structure in Jiangxi Province in 2030 under the balanced development scenario, the food security scenario, and the ecological priority scenario show obvious differences. ③ The spatial pattern of the land under the three development scenarios for Jiangxi Province in 2030 shows obvious characteristics of overall consistency and local differences.

Keywords: land use change; scenario; Markov-DLS model; “production-living-ecological” spaces; Jiangxi Province

改革开放以来,中国社会经济和自然生态环境长期处于非均衡发展状态,快速的经济增长伴随严重的环境问题^[1-2]。为了实现经济与生态的可持续发展,确保在经济平稳发展的同时维持生态空间安全,科学、合理优化空间开发保护格局以减小土地利用的剧烈变化带来的消极影响。政府的十八大、十九大将优化国土空间开发格局作为生态文明建设的重要抓手,提出了要像“对待生命一样对待生态环境”。可见,在当前生态文明建设上升为国家战略及严格的生态环境保护背景下,如何科学合理地优化国土空间开发格局,维护生态空间的稳定性,实现经济与生态的可持续发展具有重要意义。

优化国土空间开发格局,维护生态空间的稳定性首先要以城镇扩张为主导的土地利用变化过程中减少林地、草地和水域等主要生态用地的占用,从根本上维护生态空间的稳定性^[3-4]。中国许多城市在城镇化的发展道路上出现了建设用地侵占耕地和林地等其他土地类型的现象。随着城镇化的发展,中国的耕地保护政策措施也越来越严格,被建设用地侵占的耕地数量通常会得到对应的补偿^[5]。在这样的背景下,生态用地成为了城镇扩张过程中最大损失者。合理调控城镇空间扩张,优化国土空间开发利用格局,维护生态空间安全一直是土地利用变化研究中的热点问题。而如何在用地需求基础上结合区域自然地理和社会经济条件以及各项政策要求,合理安排不同土地利用类型的空间配置,从而优化国土空间开发利用格局则是研究的重点。

数量结构预测和空间布局分析一直是土地利用变化研究的两大主题。在当前土地利用变化研究中,主要聚焦于在预期社会经济效益驱动下,对传统土地利用数量结构的再分配和空间格局的重塑。包括不同时空尺度下的动态模拟和预测^[6-9],以及基于社会、经济、环境和制度等角度的研究。同时研究模型方法丰富,常用的土地利用需求预测模型有马尔科夫(Markov)^[10-12]、系统动力学(system dynamics, SD)^[13-15]、灰色预测模型(grey model, GM)^[16]、可计算一般均衡模型(computable general equilibrium of land use change, CGELUC)等^[17-18]。常用的土地空间布局模拟模型有元胞自动机(cellular automata, CA)^[10,12,19]、多智能体模型(agent based model, ABM)^[20-21]、小尺度土地利用变化及其空间效应模型(conversion of land use and its effects at small region extent, CLUE-S)^[22-24]和土地系统动态模拟模型(dynamics of land system, DLS)等^[17-18,25]。不同的模型方法通常具有各自的适用性和特点,土地利用结构预测方面,Markov方法对无后效性地理事件模拟较好,且擅长预测短期土地利用数量变化^[26-27]。元胞自动机马尔科夫模型^[28]结合了元胞自动机(CA)模型模拟复杂系统空间变化的能力和马尔科夫模型的长期预测;在空间布局模拟方面,DLS模型与CLUE-S方法类似,分析社会经济条件和自然地理条件的综合影响,并充分考虑政策因素对空间布局的作用,具有全面性和合理性等优点,而DLS模型相对CLUE-S模型更简洁,操作方便^[29]。此外,二者对土地利用进行空间配置过程中一个关键因素是土地利用转移规则,

其大小通常是研究人员根据研究内容和一般经验进行调试设置^[25,30]。

在全球范围内,社会经济和政治成分被认为是影响土地利用变化的主要因素^[31]。在不同的发展阶段中,基于不同目标下的经济活动和发展政策对具有不同功能的土地利用需求是有差异的。土地利用按照功能可划分为生产用地、生活用地和生态用地三大类,即“三生用地”。生产用地是指进行农业、工业和商业活动获取产品和供给功能的用地^[32],即作为直接获取的劳作对象或载体的土地,具有原材料生产功能、能源矿产生产功能、生存与健康物质供给功能及间接生产功能。生活用地是提供承载和物质、精神保障人居功能的用地,而生态用地则是以调节、维持和保障生态安全功能为主的用地^[32]。生态、生产、生活用地三者之间相互影响,相互制约,不可分割。具体体现在:①生态用地是基础,为其他两者提供保障;②生产用地是根本,对其他两者的存在状态起着决定性作用;③而优化三者之间的空间、数量关系的最终目的是使生活用地得到优化从而提高生活质量。在当前生态环境保护日趋重要的背景下,具有更高生态功能的土地利用类型成为了国土空间生态保护的重点对象,在土地利用变化过程中应具有更高的稳定性。目前土地利用结构变化和空间格局优化相关模型研究则较少能反映出土地利用变化过程中的政策差异的影响。

基于上述内容,本文采用 Markov-DLS 模型,综合考虑不同土地利用生产、生活和生态功能差异,并结合区域发展的可能性趋势,以城市发展,耕地保护和生态环境保护“三元”关系为依据,设置均衡发展,粮食安全和生态优先等 3 种政策情景,讨论不同政策情景下区域土地利用结构和空间格局变化差异,从而为区域国土空间优化利用和生态文明建设提供决策支持。

江西省是中国主要粮食生产大省之一,同时具有

大量的森林和湖泊资源,生态功能潜力巨大。近年来,快速城镇化导致其生态环境恶化趋势加重,面临生态空间持续萎缩,自然灾害频发等现实问题。本文选取江西省作为研究区域,分析江西省未来一定时期不同情景下国土空间结构和格局变化特征,有效识别其土地利用变化热点区和生态脆弱区,提出空间格局优化建议,从而为江西省国土空间规划和生态文明建设提供决策支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

江西省位于中国长江中下游南岸地区,省域 97.7% 的面积属于长江流域,东接浙江、福建,南连广东,西靠湖南,北临湖北、安徽而共襄长江。省内东、西、南三面环山,中间为鄱阳湖平原(图 1)。全省自然生态资源丰富,其中森林覆盖率高达 63.1%,水资源比较丰富,境内河流、湖泊众多,具有极高的生态功能潜力。全省 2019 年耕地 3.00×10^6 hm²,林地 1.08×10^7 hm²,建设用地 1.20×10^6 hm²。2019 年全省常住人口 4.67×10^7 人,其中,城镇常住人口 2.68×10^7 人,占总人口的比例(常住人口城镇化率)为 57.4%。户籍人口城镇化率为 40.7%。此外,江西省也是中国重要的产粮大省,2019 年粮食产量达 2.16×10^{10} kg,连续 7 a 稳定在 2.15×10^{10} kg 以上,是保障粮食安全的“稳定器”。除了极其丰富的生态资源和优越的农业生产条件,江西省近年来社会经济发展也极其迅速。2019 年江西省生产总值 2.48×10^{12} 元,比上年增长 8.0%,增长率居全国第 4,中部第 1。然而随着经济快速发展,人口的增加和城镇的扩张导致了建设用地不断侵占周边耕地、林地、草地和水域等,生态空间用地不断缩减(表 1),从而造成生态环境质量和功能的持续下降,使得江西省保障粮食生产和生态环境保护的压力持续增加,这样的社会经济发展是不可持续的。

表 1 2005—2015 年江西省土地利用数量结构和变化趋势

“三生”用地分类	土地利用类型	面积/km ²			2005—2015 年面积变化/km ²	2005—2015 空间变化/%
		2005 年	2010 年	2015 年		
生产用地	耕地	45 181.01	45 031.27	44 602.31	-579.30	-1.28
	林地	103 698.23	103 857.25	103 083.15	-614.92	
生态用地	草地	7 075.78	6 881.65	7 221.32	145.54	-0.35
	水域	7 040.58	6 990.44	7 051.59	11.01	
	未利用地	629.07	695.45	670.72	41.65	
生活用地	建设用地	3 249.67	3 418.34	4 245.54	996.13	30.66

注:江西省未利用地基本为沼泽地。

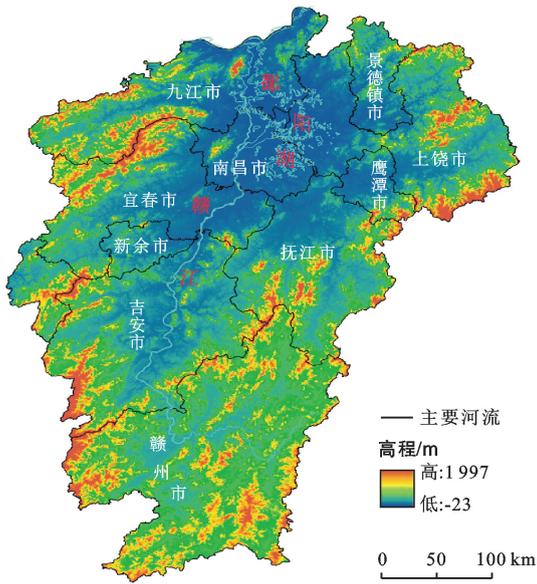


图 1 江西省地形图

1.2 数据来源与处理

所涉及的数据主要包含自然地理信息数据和社会经济数据两大部分。根据已有土地利用变化的相关研究和数据的可获取性,本文选取的自然地理信息数据包含土地利用、高程 DEM、坡度、土壤侵蚀、土壤质地、气温、降水、河流等;社会经济数据主要包括单位面积国内生产总值(GDP)、人口和道路分布等^[30,33-34]。其中,所有数据均处理为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的栅格数据,部分不符合标准的栅格数据通过 ArcGIS 进行重采样处理。坡度数据通过 ArcGIS 空间分析获得,距离河流距离、距离主要道路距离数据均通过多缓冲区分析获得。初始土地利用数据包括二级分类,为了便于后续研究,通过重分类将其整理为以耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地为主分类形式。建设用地整体精度 85% 以上,其他精度 75% 以上。土地利用空间格局模拟过程中需将土地利用数据和各驱动因子数据(高程 DEM、坡度、土壤侵蚀、土壤质地、降水、距离河流距离、国内生产总值(GDP)、人口、距离主要道路距离)采样为 ASCII 格式。基础数据主要有国土空间数量结构的土地利用数据和模拟土地空间布局的驱动因子数据,详细信息见表 2。

1.3 研究方法

本文主要采用 Markov-DLS 综合模型对江西省 2030 年国土空间土地数量结构预测和空间布局模拟。

1.3.1 土地利用数量变化预测方法

马尔科夫(Markov)模型是当前土地利用变化研究中常用的模型之一,因其简单、有效常被用来模拟土地利用规模的变化。Markov 模型主要通过分析初始土地利用状

态下的转移矩阵和转移概率,由此来推测后续土地利用的变化趋势^[10]。该模型的公式可写成:

$$S_{(t+1)} = W^n \times S_{(t)} \quad (1)$$

式中: $S_{(t+1)}$, $S_{(t)}$ 为 $t+1$ 和 t 时期土地利用状态; W 为土地利用转移概率矩阵; n 为时间间隔。另外,用 W_0 代表初期土地利用转移矩阵,该矩阵一般可通过两期历史土地利用数据获得。

表 2 数据来源与格式

基础数据	数据名称	时间	来源	
自然地理因子	土地利用数据		中国科学院资源环境科学数据库 (http://www.resdc.cn)	
	DEM 数据			
	河网数据			
	土壤质地			
	土壤侵蚀	2005, 2010, 2015 年		
	年平均温度			
	积温			
	年均降水量			
	坡度			由 DEM 数据获得
	社会经济因子	GDP		
人口密度		2010 年	中国科学院资源环境科学数据库	
路网数据			(http://www.resdc.cn)	

由于 Markov 模型在短期模拟预测精度较优,本文将时间间隔设置为 5 a,即将 2005 年与 2010 年设为初始土地利用状态,预测 2015 年土地利用状态,并将 2015 年实际土地利用与之对比检验。通过检验后的转移概率矩阵逐步预测 2030 年多情景下土地利用状态。

1.3.2 土地利用布局模拟方法

土地系统动态模型(DLS)以区域土地系统为研究对象,综合考虑土地空间格局的外部环境和内部反馈作用,系统地探测、表征土地系统演化的时空过程,实现区域土地系统结构变化与演替格局的动态模拟^[21],主要步骤为:①输入土地利用数量结构;②通过 Logistics 回归遴选影响土地利用变化的驱动因子;③设置土地利用转移规则;④模型进行空间配置结果输出。在 DLS 模型中,栅格尺度用地类型分布的驱动模块是土地利用布局模拟的核心模块,限于篇幅,本文主要介绍这一模块。开展栅格尺度用地类型分布及其驱动因子的分析可分为线性模型和非线性模型,前者由于模型限制条件多且适用区域尺度范围小,因此,本研究选择非线性模型作为土地系统格局演替模拟模型^[35]。假设栅格 i 为第 k 种土地利用类型的概率为 $p_i^k = P(y_i^k = 1 | X_i, \hat{y}_i^k)$,条件概率以 Logistic 函数形式表示为,公式如下:

$$\begin{aligned}
 p_i^k &= \frac{1}{1 + \exp[-(\alpha_0^k + \alpha_1^k x_{i1} + \alpha_2^k x_{i2} + \dots + \alpha_l^k x_{il} + r y_i^k)]} \\
 &= \frac{1}{1 + \exp[-(\alpha_0^k + \alpha^k X_i + r y_i^k)]}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中： p_i^k 为栅格 i 出现 k 种土地利用类型的概率； $\alpha^k = (\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_l^k)$ 为驱动因子系数组成的向量； r 为空间自相关因子系数； y_i^k 为空间自相关因子，依据公式(2)求出栅格 i 为 k 种土地利用类型的似然比，并经过对数变换得出驱动模型，公式如下，

$$\begin{aligned}
 \text{lgit}(t) &= \ln(p_i^k / (1 - p_i^k)) \\
 &= \ln[\exp(\alpha_0^k + \alpha_1^k x_{i1} + \alpha_2^k x_{i2} + \dots + \\
 &\quad \alpha_l^k x_{il} + \dots + \alpha_l^k x_{il} + r y_i^k)] \\
 &= \alpha_0^k + \alpha^k X_i + r y_i^k
 \end{aligned} \tag{3}$$

通过栅格尺度用地类型分布驱动非线性模型可以得出区域不同土地利用类型的空间分布概率^[29]，在区域土地利用转换规则和土地利用数量结构约束下可进行土地利用空间供需平衡分析，最终得出区域土地利用的空间格局。

2 不同情景设置及土地利用转换规则

2.1 不同情景设定

基于江西省的实际情况和国家政策导向，城市发展、生态保护和粮食安全是江西省未来社会经济发展过程中需考虑的主要因素。本文从社会经济等角度出发，综合考虑设置江西省 2030 年土地利用变化的粮食安全情景、生态保护情景和均衡发展情景这 3 种情景假设。粮食安全情景主要基于耕地保护政策和“宜耕则耕”原则，结合江西省是中国重要的粮食生产基地这一实际情况，从耕地数量和质量的“双保障”出发对土地利用变化模拟预测进行约束。在此情景下，未来土地利用变化首先满足耕地需求，耕地保护政策对于影响土地利用变化的权重将高于城镇化和生态保护政策；生态优先情景主要按照持续发展的要求，立足于当前生态文明建设需要，以土地作为自然资源的本质属性及其功能为基础，强调林地、草地和水域等土地利用类型对于生态保护的重要性。在此情景下，生态用地将得到最大程度的保护；均衡发展情景一方面是基于平等竞争原则，另一方面是作为前两种情景的对照组，将经济发展过程中城市、农业和生态等相关政策条件置于统一权重下，各项政策对土地利用变化的影响整体通过现状土地利用变化进行反馈，即均衡发展情景是以当前的社会经济发展趋势来推测未来土地利用变化，从一般性出发设置模型参数进

行土地利用变化模拟预测。

2.2 多情景下土地利用转移条件

土地利用发生转移的条件基于不同发展情景而具有较大差异。某一情景下土地利用转移首先基于各类土地利用的需求，当某类用地类型需求未满足时，其他所有可能发生转移的用地类型均能向该类土地发生转移，其次在土地利用转移过程中模型通过相关驱动因子的影响确定发生土地转移的具体空间位置。具体而言，粮食安全情景假设政府严格执行耕地保护政策，包括占用耕地补偿制度、永久基本农田保护制度以及土地整理制度，坚守“严保严管、节约优先、统筹协调、改革创新”原则的情形下，在初始转移概率基础上，耕地向其他土地利用类型的转移概率整体下降，其他用地向耕地转移情况不变；生态优先情景条件为依照划定的生态保红线，通过生态退耕，生态空间管控、治理和修复等政策的进一步实施，并严格限制城镇空间占用生态用地，在初始转移概率基础上，林地、草地、水域和未利用地等生态空间用地向耕地和建设用地的转移概率整体降低，耕地向林地、草地、水域和未利用地的转移状况保持不变；均衡发展情景是在当前农业生产、城镇建设和生态保护发展条件不变下，基于初始土地利用转移概率矩阵，通过模型迭代分析直接得出耕地、林地、草地、水域、建设用地的规模。在确定各情景下土地利用的需求后，在驱动因子影响下通过模型对每一类土地利用类型进行空间配置。

2.3 不同情景下土地利用转换规则

当前土地利用转换规则并没有统一的标准，大都是基于研究者的经验和研究内容进行的主观设置。转移规则默认设置在 $[0, 1]$ 之间，0 代表着该类型土地基本不能发生转移，1 代表着该类型全部栅格可以发生转移，0 到 1 之间由小到大表示转移难度由大变小。本文主要参考刘继来等^[36]建立的三生用地分类与评价体系，该体系基于土地利用二级分类国家标准和“自下而上，功能分级”原则，可为空间分类规划和优化决策提供参考，并结合江西省实际情况对其进行归纳总结，得出不同土地一级分类的生产(农业)、生活和生态功能评分(表 3)，从而对不同情景下土地转移规则设置提供参考。土地利用某类功能越强，其在对应的情景政策下发生转移的难度越大，例如在粮食

安全情景下,生产功能评分高的耕地其转移难度最大,转移规则设置应接近 0。此外,对于建设用地等特殊土地利用类型,借鉴已有研究和一般经验对其转移规则进行特殊化处理。

表 3 江西省土地利用“三生”功能评分

土地功能	生产用地		生态用地			生活用地
	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
生产	5	1	1	0	0	0
生活	0	0	0	0	0	5
生态	3	5	5	5	5	0

注:0—5 分别表示功能由小到大。

在借鉴已有研究经验基础上^[25,36-37],均衡发展情景综合考虑土地利用的生产、生活和生态功能,并结合当前土地利用变化实际情况,即建设用地主要占用周边耕地、林地、草地和未利用地进行扩张,因而耕地、林地、草地和未利用地发生转移的可能性较高,而建设用地和开发难度较大的水域状态相对稳定,其发生转移的可能性则较低。粮食安全情景在均衡发展情景基础上优先考虑耕地保护,因此具有最高粮食生产功能的耕地其转移难度将变得最大。在此情景下,土地利用变化过程中除建设用地扩张外,耕地扩张也具有较大可能性,但综合考虑耕地的适宜条件,林地和草地在粮食安全情景的转移难度相较于均衡发展

情景将有所上升,而水域的转移难度则有所下降,其他土地利用类型则保持不变。生态优先情景在均衡发展情景基础上进一步突出了土地利用生态功能的作用。由表 3 可知林地、草地、水域和未利用地具有最高生态功能,耕地次之,建设用地最小,因此在生态优先情景下,林地、草地、水域和未利用地等发生转移的难度将高于其他两类情景,耕地的转移难度将大于均衡发展情景而小于粮食安全情景。结合土地利用“三生”功能大小和已有研究经验,分别设置 3 类发展情景下土地利用的转换规则(详见表 4)。最终通过 DLS 模型分别模拟出不同发展情景下国土空间土地利用格局。

表 4 不同情景下土地利用转移规则

情景类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
均衡发展	0.6	0.7	0.7	0.1	0.1	0.8
粮食安全	0.1	0.5	0.5	0.3	0.1	0.8
生态优先	0.5	0.2	0.2	0	0.1	0.1

3 模拟结果与分析

3.1 Markov-DLS 模型模拟精度分析

在进行 Markov-DLS 模拟预测 2030 年土地利用变化前,首先利用 2005 年和 2010 年数据对 2015 年土地利用进行模拟检验(表 5)。

表 5 江西省 2015 年 Markov-DLS 模型土地利用结构预测精度

项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2015 年实际值	44 602.31	103 083.15	7 221.32	7 051.59	4 245.72	670.54
2015 年预测值	44 725.21	104 163.19	6 504.47	6 898.56	3 757.12	825.65
预测误差/%	0.28	1.05	9.93	2.17	11.50	23.13

由表 5 可知,2015 年 Markov 模型预测值与实际值之间的误差较小,预测结果基本符合实际情况(图 2)。

其中耕地、林地、草地和水域面积的预测精度均在 90% 以上,建设用地预测精度近似 90%。未利用地由于基数较小,预测精度相对较低,接近 80%。此外在空间布局模拟上,对模拟结果采取 kappa 指数进行精度验证。kappa 指数公式为:

$$\text{kappa} = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (4)$$

式中: P_o 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况下期望的正确模拟比例; P_p 为理想分类情况下正确模拟的比例。kappa 系数的判定标准为:如果两土地利用/覆盖(land use/land cover, LULC)图像完全一样,则 $\text{kappa}=1$; 当 $\text{kappa} \geq 0.75$ 时,表明一致性较高,误差较小; 当 $\text{kappa} \leq 0.4$ 时,一致性较差, LULC 模拟误差较大^[26]。DLS 模型模拟的 2015 年各类土地利用布局与实际空间格局的整体精度达到了

a 土地利用现状实际

b 土地利用现状模拟

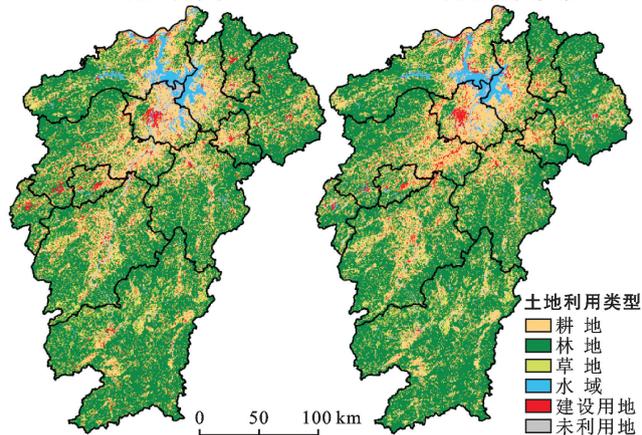


图 2 江西省 2015 年土地利用现状实际与模拟

96.21%, kappa 系数为 92.95%。由此可知, Markov-DLS 模型模拟预测整体精度较高, 能满足下一步研究的需要。

3.2 不同情景下土地利用变化模拟结果

由模拟预测结果(表 6)可知, 与 2015 年相比, 江西省 2030 年以耕地为主的生产用地面积仅在粮食安全情景下有所增长, 增幅为 0.48%, 在均衡发展情景和生态优先情景下分别下降 0.66% 和 0.75%; 以建设用地为主的生活空间面积在 2030 年 3 类发展情景下均处于增长趋势, 其中均衡发展情景下增幅最大, 为 1.15%, 在粮食安全情景下增幅最小, 为 1.10%; 与生活空间相反, 生态空间占比在 3 类情景下均处于下降

趋势, 但生态优先情景下降幅最小, 为 -0.36%。其中, 林地 在 3 类情景中均处于下降趋势, 且是导致生态用地整体面积下降的主要因素。江西省 2030 年 3 类情景下生活空间不断扩张而生态空间不断下降, 这表明在社会经济发展过程中生态用地(特别是林地)具有最大的脆弱性, 生态用地最易成为土地利用变化中的被侵占对象。这种国土空间变化趋势整体与我国当前社会经济的发展阶段以及江西省独特的自然地理条件相吻合。城镇化快速发展在我国中西部地区仍十分明显, 特别是在长江经济带发展战略驱动下, 中西部地区迎来了新的发展机遇, 同时也导致建设用地在未来时期仍处于强势扩张阶段。

表 6 江西省 2015 年和 2030 年多情景下土地利用数量结构

土地类型	2015 年国土空间结构		2030 年均衡发展情景		2030 年粮食安全情景		2030 年生态优先情景	
	面积/km ²	比例/%						
耕地	44 602.31	26.73	43 502.33	26.07	45 402.31	27.21	43 349.22	25.98
林地	103 083.15	61.77	101 887.42	61.06	100 318.63	60.12	102 077.12	61.17
草地	7 221.32	4.33	7 493.21	4.49	7 378.54	4.41	7 507.11	4.50
水域	7 051.59	4.23	7 087.56	4.25	6 978.55	4.18	7 100.54	4.25
建设用地	4 245.72	2.54	6 162.55	3.69	6 067.12	3.64	6 096.34	3.65
未利用地	670.54	0.40	741.76	0.44	729.13	0.44	743.32	0.45
生产用地	44 602.31	26.73	43 502.33	26.07	45 402.31	27.21	43 349.22	25.98
生活用地	4 245.72	2.54	6 162.55	3.69	6 067.12	3.61	6 096.34	3.65
生态用地	118 025.57	70.73	117 208.66	70.24	115 403.43	69.15	117 427.66	70.37

3.3 DLS 模型国土空间格局模拟结果

3.3.1 不同情景下各类用地、三生用地数量变化特征

国土空间格局是国土空间土地利用结构变化后的空间形态, 本文综合考虑土地变化驱动因素, 结合“三生”

功能评价设置不同情景的转换规则, 运用 DLS 模型分别模拟江西省均衡发展情景、粮食安全和生态优先情景下国土空间格局特征, 3 类政策情景下, 2030 年相较于 2015 年国土空间土地利用数量变化特征见图 3。

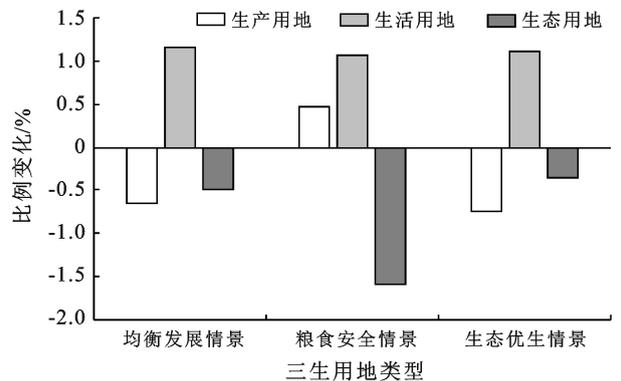
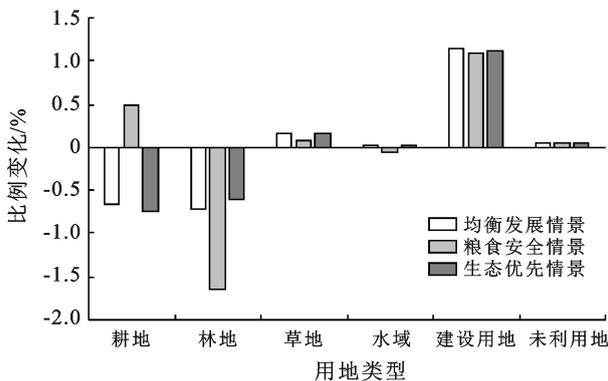


图 3 江西省土地利用数量变化

由表 6 和图 3 可知, 均衡发展情景、粮食安全情景和生态优先情景在空间格局演变上表现出一致性和差异性特征。一致性表现为城市周边建设用地向外围扩张, 并呈现出沿长江、赣江、抚河(主要在抚州境内)、鄱阳湖岸线发展的空间特征, 其重要原因在于

江西省多山地丘陵, 平原面积小且主要分布在河谷和鄱阳湖平原的自然地理特征, 而社会经济和人口的快速发展最终导致平原地区耕地和水域逐渐向建设用地转变。同时表明在未来一段时期里, 城镇化发展仍是江西省社会经济发展的主要特征, 建设用地扩张是

土地利用变化的主要趋势,而建设用地向河谷、冲击和堆积平原地区耕地和水域扩张是其主要发展方向。局部差异性不同情景下国土空间土地利用结构和空间格局主要特点所在,反映了3类政策情景对国土空间土地利用的影响。

3.3.2 不同情景下各类用地、三生用地空间变化特征

(1) 均衡发展情景下,耕地增加主要发生在九江市、南昌市、宜春市和吉安市,主要沿着鄱阳湖和赣江沿岸地区集聚和扩张。上饶市、抚州市、赣州市等耕地、林地、草地、水域和未利用地变化幅度相对较小,空间格局变化特征并不显著。城市化和经济水平发达的南昌市和条件优越的九江市城镇空间进一步扩张的趋势将更加明显,这也说明了社会发展中城镇经济发展相对于农业生产和生态保护对国土空间格局变化具有更强的吸引力。此外,该情景下建设用地占用其他用地的条件相对宽松,其他用地向建设用地的转换的操作难度较小,这也导致了建设用地对耕地和林地等土地利用类型的侵占(图4)。

(2) 粮食安全情景下,耕地的强势增长导致空间

上鄱阳湖水域面积大幅缩减,东南部水域基本转化成了耕地,而其他区域水域面积仅出现“零星”式增长。鄱阳湖地区由于“围湖造田”运动曾出现过部分水域转化为耕地的现象,当前社会经济发展中粮食安全情景下鄱阳湖的极端变化虽难以实现,但这种变化具有一定的可能性和合理性。

主要原因在于粮食安全情景下耕地空间得到最大程度的保护,林地、草地、水域和未利用地向耕地转化的难度变低;其次江西省自然地理条件也是导致耕地向鄱阳湖水域扩张的主要驱动因素之一,主要在于鄱阳湖地区地势平坦,水源充足,农业耕作条件十分优越,是理想的粮食生产区。另外,但建设用地空间集聚性特征进一步加强,集聚区主要分布在九江市鄱阳湖沿岸和长江沿岸,这也导致了江西省其他城市,特别是西南部宜春市、新余市、萍乡市和吉安市的建设用地密度有所下降。表明过度强化耕地保护一方面会迫使耕地占用其他生态用地,另一方面也会刺激建设用地对生态用地的侵占,最终影响生态空间格局的稳定(图4)。

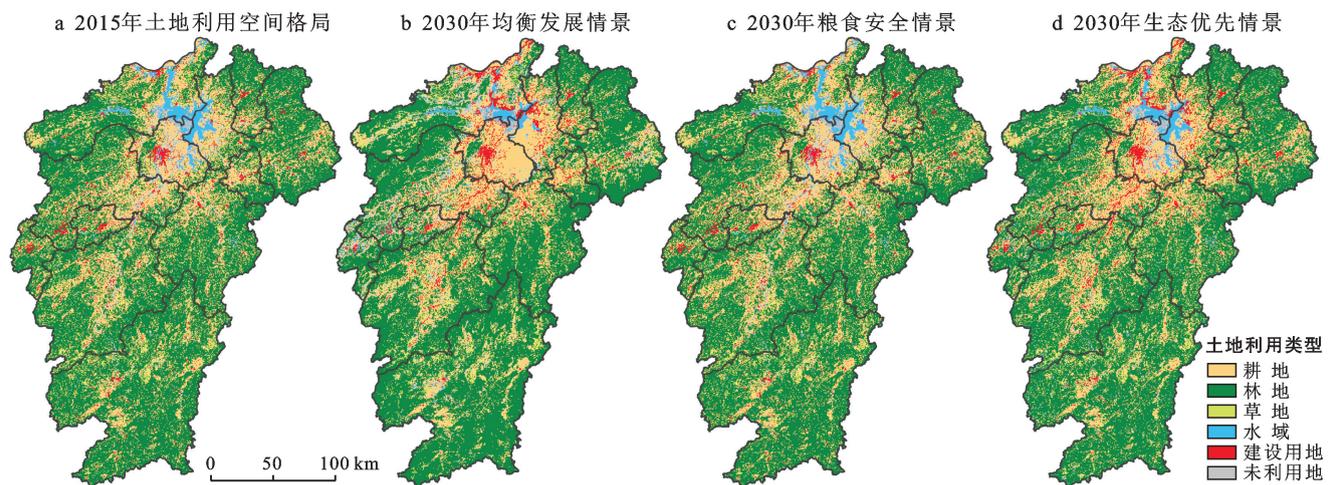


图4 江西省2030年3种情景下国土空间格局

(3) 生态优先情景土地空间格局与均衡发展情景类似,但建设用地空间集聚性更弱,鄱阳湖北岸水域空间得到了更好的保护。而与2015年土地利用空间格局相比,生态优先情景下建设用地以城市为中心,呈环状扩张的趋势仍有所加强,如南昌市、吉安市、萍乡市和九江市,并以“线状”沿赣江由北向南延伸,而东部和南部山区的建设用地密度有所下降。这主要因为城市化持续发展,而生态优先情景下生态用地得到了较好的保护,建设用地扩张的压力向耕地和水域转移,导致耕地和水域集中的河谷和平原地区建设用地扩张现象明显,林地和草地丰富的东部、南部

以及西部山区建设用地比例有所下降。2030年水域空间相较于2015年在鄱阳湖和赣江等大型水域的集聚性有所下降而西部山区水域的分散性加强,主要是一方面传统的鄱阳湖和赣江等广阔水域空间由于建设用地和耕地扩张而向中心收缩,水面收缩导致边缘水域逐渐向沼泽和滩涂等未利用地转变;另一方面山区林地和草地等生态空间得到了有效保护,使其水源的涵养能力得到提升。相较于粮食安全情景,生态优先情景下土地空间格局特征突显的变化是耕地没有表现出明显的“侵略性”,鄱阳湖水域以及周边山区林地和草地并未大面积地向耕地转变。同时,建设用地

的扩张性也得到了限制,鄱阳湖北部衔接长江的水域以及长江沿岸耕地得到了有效保护,避免了被建设用地侵占。整体而言,在 3 类发展情景中,生态优先情景下以林地、草地、水域和未利用地为核心的生态空间得到了有效的保护,整体面积占比相对最大,下降速度最小,建设用地的扩张得到了有效限制。这表明生态退耕和限制城镇无序扩张等生态优先政策措施对于江西省保护生态用地的数量,维护生态安全格局稳定具有积极作用。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) Markov-DLS 模型对省级尺度未来土地利用变化预测模拟方面具有较好的适用性。本文通过历史土地利用变化数据和社会经济与自然驱动因子模拟预测了江西省 2015 年土地利用结构和格局,其中数量结构预测准确度基本在 90% 以上,空间布局模拟精度达到了 96%,kappa 系数高达 92% 以上,表明该模型适用于短期土地利用变化研究。

(2) 江西省 2030 年国土空间土地利用结构变化在均衡发展情景、粮食安全情景和生态优先情景下呈现出明显的差异性。以耕地为主的生产空间仅在粮食安全情景下有所增长,增幅为 0.48%。以建设用地为主的生活空间在 3 类情景下均处于增长趋势,均衡发展情景下增长最快,增幅高达 1.15%。以林地、草地、水域和未利用地为核心的生态空间在 3 类情景中均呈现下降趋势,在生态优先情景下的占比高达 70.37%,相较于均衡发展情景和粮食安全情景空间面积损失最小。

(3) 江西省 2030 年 3 类发展情景下国土空间格局呈现出明显的整体一致性和局部差异性特征。3 类发展情景下江西省东、南、西部山区林地、草地空间格局相对稳定,而建设用地均呈现出沿江岸线,沿湖岸线通过占用水域及其周边耕地发展的趋势,主要集中在南昌市和宜春市赣江沿岸和九江市鄱阳湖北岸以及长江沿岸区域,但这种趋势在生态优先情景下得到了抑制。这在一定程度上揭示了江西省在新一轮快速城镇化过程中面临的城镇发展,粮食安全和生态保护的国土空间“三元博弈”的压力中心,也表明了生态优先情景政策对于生态环境保护的积极作用。均衡发展情景和生态优先情景下耕地和水域空间格局相对稳定,而在粮食安全情景下发生了激烈变化,这种变化主要发生在江西省耕地和水域集中分布的鄱阳湖平原地区,其中耕地空间大面积侵占了鄱阳湖东南部水域空间,这中激进的变化在一定程度上也反映

了江西省山多平原少耕地更少的地理特征和发展局限性。

4.2 建议

当前,生态文明建设和粮食安全是中国的重大国家发展战略,科学预测和厘清土地利用数量结构变化和空间格局特征对于实现这一发展战略具有重要决策参考价值。根据本研究结果,从优化江西省国土空间利用和促进生态文明建设出发,提出以下两点讨论意见:

(1) 在协调发展城市化,农业生产和生态保护的基础上,强化生态空间保护和耕地保护措施,制定合理的土地利用规划,科学划定“三区三线”,加强生态空间管控,从结构和空间上对生产用地、生活用地和生态用地进行严格的双向约束和管理。

(2) 着重关注土地利用变化热点区域和生态脆弱区域,尤其关注鄱阳湖平原和赣江流域生态空间安全。江西省基本自然地理特征决定了狭小平原地区成为土地利用变化频发区,大量城市建设用地、耕地和水域集中分布在狭小的平原地区导致城镇化、耕地保护和生态保护三者之间矛盾集中且剧烈。应重点关注土地利用变化的热点区域和生态脆弱区,抓住主要矛盾的主要方面,严格控制建设用增长,提高土地集约节约利用程度,才能最终实现绿色经济,实现生态文明建设和保障粮食安全。

本文虽然对不同情景下未来土地利用结构和空间格局特征进行了研究。但依然存在以下不足之处:本文在多情景土地利用预测和模拟过程中主要考虑基于历史时期的土地利用变化结果并综合考虑自然—社会经济等 11 个驱动因子的影响,虽然预测和模拟精度满足研究需要,但较少考虑现实土地利用规划中各类土地利用类型的需求,对地质条件等要素的作用也考虑不足。因此,在今后的研究中应综合考虑研究区的发展规划,以及自然、地质、社会经济等要素的影响,完善数据和模型精度,提升研究结果的科学性和适用性。

[参 考 文 献]

- [1] 王林辉,王辉,董直庆.经济增长和环境质量相容性政策条件:环境技术进步方向视角下的政策偏向效应检验[J].管理世界,2020,36(3):39-60.
- [2] 关伟,金一.中国能源利用、经济增长演进对生态环境的脉冲响应[J].经济地理,2020,40(2):31-40.
- [3] 彭建,汪安,刘焱序,等.城市生态用地需求测算研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(2):333-346.
- [4] 杨露,颜耀文,宗乐丽,等.基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J].地球信息

- 科学学报,2020,22(3):568-579.
- [5] 蒋瑜,濮励杰,朱明,等.中国耕地占补平衡研究进展与述评[J].资源科学,2019,41(12):2342-2355.
- [6] Fu Xin, Wang Xinhao, Yang Jeffrey. Deriving suitability factors for CA-Markov land use simulation model based on local historical data [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018,206:10-19.
- [7] Hu Xiaoli, Li Xin, Lu Ling. Modeling the land use change in an arid oasis constrained by water resources and environmental policy change using cellular automata models [J]. *Sustainability*, 2018,10(8):2879.
- [8] Jiao Mengyu, Hu Mengmeng, Xia Beicheng. Spatiotemporal dynamic simulation of land-use and landscape-pattern in the Pearl River Delta, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,49:101581.
- [9] Dewan A, Corner R. Monitoring and prediction of land-use and land-cover (LULC) change [M]. Springer Netherlands, 2014.
- [10] 孟成,卢新海,彭明军,等.基于 Markov-C 5.0 的 CA 城市用地布局模拟预测方法[J].中国土地科学,2015,29(6):82-88,97.
- [11] 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.
- [12] 成超男,胡杨,冯尧,等.基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究:以晋中主城区为例[J].生态学报,2020,40(4):1455-1462.
- [13] 宋蕾,曹银贵,周伟,等.基于 SD 模型的三峡库区快速城镇化地区耕地利用模拟研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):818-827.
- [14] 熊鹰,陈云,李静芝,等.基于土地集约利用的长株潭城市群建设用地供需仿真模拟[J].地理学报,2018,73(3):562-577.
- [15] 杨春梅,徐小峰,齐琪,等.城乡融合发展背景下上海市农村宅基地利用变化仿真与模拟[J].中国土地科学,2019,33(9):56-65.
- [16] 李正,王军,白中科,等.贵州省土地利用及其生态系统服务价值与灰色预测[J].地理科学进展,2012,31(5):577-583.
- [17] 张洪,李中元,李彦.基于生态安全的山地城镇土地可持续利用模式研究:以云南大理市为例[J].地理研究,2019,38(11):2681-2694.
- [18] Jin Gui, Chen Kun, Wang Pei, et al. Trade-offs in land-use competition and sustainable land development in the North China Plain [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2019,141(C):36-46.
- [19] 杨小艳,凌宇,李龙,等.基于最坏情景理论的连云港土地利用变化情景模拟[J].资源科学,2019,41(6):1082-1092.
- [20] 戴尔阜,马良,杨微石,等.土地系统多主体模型的理论与应用[J].地理学报,2019,74(11):2260-2272.
- [21] 田光进,邬建国.基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展[J].生态学报,2008(9):4451-4459.
- [22] 赵旭,汤峰,张蓬涛,等.基于 CLUE-S 模型的县域生产—生活—生态空间冲突动态模拟及特征分析[J].生态学报,2019,39(16):5897-5908.
- [23] 郝晓敬,张红,徐小明,等.晋北地区土地利用覆被格局的演变与模拟[J].生态学报,2020,40(1):257-265.
- [24] 马冰滢,黄姣,李双成.基于生态—经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置[J].地理科学进展,2019,38(1):26-37.
- [25] 吴健生,冯喆,高阳,等.基于 DLS 模型的城市土地政策生态效应研究:以深圳市为例[J].地理学报,2014,69(11):1673-1682.
- [26] 何丹,周璟,高伟,郭怀成,等.基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(06):1095-1105.
- [27] 王旭,马博文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].自然资源学报,2020,35(1):230-242.
- [28] Kang Junfeng, Fang Lei, Li Shuang, et al. Parallel cellular automata Markov model for land use change prediction over Mapreduce framework [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019,8(10):454.
- [29] 邓祥征,林英志,黄河清.土地系统动态模拟方法研究进展[J].生态学报,2009,28(10):2123-2129.
- [30] 邓华,邵景安,王金亮,等.多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J].地理学报,2016,71(11):1979-1997.
- [31] Hishe S, Bewket W, Nyssen J, et al. Analysing past land use land cover change and CA-Markov-based future modelling in the Middle Suluh Valley, Northern Ethiopia [J]. *Geocarto International*, 2020,35(3):225-255.
- [32] 张红旗,许尔琪,朱会议.中国“三生用地”分类及其空间格局[J].资源科学,2015,37(7):1332-1338.
- [33] 张佰发,苗长虹.黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J].资源科学,2020,42(3):460-473.
- [34] 袁磊,杨昆.土地利用变化驱动力多尺度因素的定量影响分析[J].中国土地科学,2016,30(12):63-70.
- [35] Feng Yongjiu, Yang Qianqian, Tong Xiaohua, et al. Evaluating land ecological security and examining its relationships with driving factors using GIS and generalized additive model [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,633:1469-1479.
- [36] 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.
- [37] Luo Geping, Yin Changying, Chen Xi, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China [J]. *Ecological Complexity*, 2010,7(2):198-207.