

引用格式:杨露,颀耀文,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. [Yang L, Xie Y W, Zong L L, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agro-pastoral ecotone in Northwest China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):568-579.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190531

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

杨露, 颀耀文*, 宗乐丽, 邱天, 焦继宗

兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

Land Use Optimization Configuration based on Multi-Objective Genetic Algorithm and FLUS Model of Agro-pastoral Ecotone in Northwest China

YANG Lu, XIE Yaowen*, ZONG Leli, QIU Tian, JIAO Jizong

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The ecological environment of the agro-pastoral ecotone in Northwest China is extremely fragile. Due to global warming, the frequent droughts in this region have seriously affected agriculture and animal husbandry, which is not conducive to the sustainable socio-economic development of the agro-pastoral ecotone there. It is the special location and ecological value that determine the region has an important strategic significance in socio-economic development and ecological environment protection in China. The usage of land resources plays an important role in not only the ecological environment, but the socio-economy. Therefore, the purpose of this paper is to achieve ecological environmental protection and economic development by optimizing the allocation of limited land resources in the region. The application of multi-objective genetic algorithm and FLUS model can improve the land use optimization configuration from many aspects (i.e., quantitative structure, spatial distribution, comprehensive benefits). In addition, the combination of the genetic algorithm and multi-objective programming model can provide more alternative options for it. In this paper, the multi-objective genetic algorithm and FLUS model are used to simulate the land use change of the region in 2025. By setting up four scenarios (i.e., natural development, ecological protection priority, economic development priority and economic equilibrium), we explore how to optimize land use allocation on the condition of considering both the protection of ecological environment and the development of social economy. The results suggest that the economic equilibrium optimization scheme shows great advantages in both the quantitative structure and spatial distribution of land use types, and its comprehensive benefits are superior to the other three scenarios. On the premise of reasonably limiting the speed of economic development, this scenario has enabled the ecological construction to develop at stable speed. Its economic benefits have increased by 8.96% compared with those

收稿日期:2019-09-19;修回日期:2019-12-05.

基金项目:国家自然科学基金项目(41530752、41471163、41601064);国家科技基础资源调查项目(2017FY101003). [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41530752, 41471163, 41601064; National Science and Technology Basic Resources Investigation Special Project of China, No.2017FY101003.]

作者简介:杨露(1995—),女,云南昆明人,硕士生,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: yanglu18@lzu.edu.cn

*通讯作者:颀耀文(1969—),男,甘肃天水人,博士,教授,主要从事3S技术与干旱区环境变化研究。

E-mail: xieyw@lzu.edu.cn

under the ecological protection priority scenario, and its ecological benefits have increased by 0.77% compared with those under the economic development priority scenario. The scenario achieves the coordination between ecological protection and economic development. The eco-economic equilibrium optimization scheme has shown great potential in many aspects, such as promoting the development of unused land, assisting in the adjustment of land use structure, and driving the optimization of industrial structure. The optimal allocation of land use provides decision-making assistance for the future ecological environment construction and economic development planning of the agro-pastoral ecotone in this region. In addition, to solve the contradiction between economic development and ecological construction in the agro-pastoral ecotone, the government should strictly co-ordinate arrangements for various types of land, while enhancing the comprehensive utilization of land resources.

Key words: land use optimization; multi-objective genetic algorithm; FLUS model; Markov Chain; GM(1,1) Model; ecological environment protection; eco-economic equilibrium; agro-pastoral ecotone

*Corresponding author: XIE Yaowen, E-mail: xieyw@lzu.edu.cn

摘要:西北农牧交错带生态环境脆弱,区位特殊性和生态重要性使其在我国社会经济发展和生态环境保护方面具有重要战略意义。通过对该区域进行土地利用优化配置,使有限的土地资源支撑起生态环境保护和经济发展的重任是本文的出发点。多目标遗传算法和FLUS模型的应用可以从多方面(数量结构、空间布局、综合效益)完善土地利用优化配置,为土地利用优化配置提供更多的选择方案。本文选用多目标遗传算法和FLUS模型对该区域进行2025年的土地利用变化模拟,通过设置自然发展、生态保护优先、经济发展优先、生态-经济均衡4种情景,探讨了如何在兼顾生态环境保护与社会经济发展的情况下进行土地利用的优化配置。结果表明,基于生态-经济均衡情景下的优化方案,土地利用类型的数量结构和空间布局更为合理,其综合效益优于另外3种情景。该情景在合理限制经济发展速度的前提下,使生态建设获得稳定发展,其经济效益较生态保护优先情景下增长了8.96%,生态效益较经济发展优先情景下增长了0.77%,在生态保护与经济发展2种目标之间达到平衡,为西北农牧交错带的土地利用规划提供了决策辅助。

关键词:土地利用优化;多目标遗传算法;FLUS模型;Markov Chain;GM(1,1)模型;生态环境保护;生态-经济均衡;西北农牧交错带

1 引言

土地是不可再生资源,其利用方式的变化会对区域的生态环境和社会经济产生直接或间接的影响。土地利用优化配置是在兼顾生态环境保护与土地利用综合效益下,通过合理地安排区域内各种土地利用类型的数量结构和空间布局,来实现土地资源的可持续利用^[1-2]。当前,在土地资源较为匮乏的西北干旱、半干旱地区,开展土地利用优化配置研究具有重要的科学意义和现实指导意义^[3]。我国的西北农牧交错带是典型的生态脆弱带,前后被纳入国家“三北”防护林工程建设、“天然林资源保护”工程,承载着生态环境保护的重任^[4-5]。在全球变暖的气候背景下,该区域干旱灾害频发,社会经济与农牧业可持续发展均受到严重的影响^[6]。因此,通过对该区域进行土地利用优化配置,使有限的土地资源支撑起生态环境保护和经济发展的重任是十分必要的。

模型模拟和情景变化分析是实现土地利用优化配置的重要工具^[1-3]。国内外学者对土地利用变化

模拟已开展了大量研究,探索了一系列模型在土地利用优化配置中的应用前景。数量预测模型有马尔科夫(Markov)模型^[7]、系统动力学(SD)模型^[8]、灰色模型(GM)^[9]、多目标规划(MOP)模型^[10-11]等;空间格局预测模型有元胞自动机(CA)模型^[12-13]、多智能体(ABM/MAS)模型^[14]、CLUE-S模型^[1,15]、FLUS模型^[16]等;混合模型有CA-Markov模型^[17-19]、SD-CLUE-S模型^[20]、SD-CA模型^[21-22]、GM-CA模型^[23-24]、MOP-CA模型^[25]等。

由于混合模型集成了数量预测模型和空间格局预测模型,可同时对土地利用的数量结构和空间格局进行优化配置,因此被广泛应用于土地利用优化配置研究中。其中数量预测模型里,SD模型能模拟土地利用变化与多种驱动力之间循环反馈的关系,但其要求对土地利用系统的内部机制十分了解,模型的构建较为复杂^[8];Markov模型、GM模型是基于数理统计的方法来进行数量预测,未结合驱动因素的作用^[7,9];而MOP模型不仅具有SD模型的正反馈特征,而且突破了目标函数一维性的限制,

可以在兼顾经济效益和生态效益的基础上进行土地利用优化配置,并且其模型的构建比SD模型简单^[26]。关于空间格局预测模型,ABM模型在多类土地利用变化模拟研究中尚不成熟^[27];ANN-CA、CLUE-S等忽略了各地类间的竞争及相互作用,排除了土地网格转换为小概率地类的可能性,而2017年提出的FLUS模型,其对传统CA进行了改进,引入了自适应惯性系数和轮盘竞争机制,轮盘竞争机制的随机性使FLUS模型能够更好地反映现实情景下土地利用变化过程中的不确定性,能够有效预测多情景下的未来土地利用情形,其模拟精度高于CLUE-S和CA等模型,具有较大的推广价值^[16,28]。

另有研究表明,遗传算法最适合于多目标优化问题,其不仅作用于整个种群,同时强调个体的整合,遗传算法的内在并行机制和全局优化特性有利于解决土地利用类型的数量结构优化^[29]。由此,本文拟选择耦合多目标遗传算法和FLUS模型对我国西北农牧交错带开展2025年的土地利用优化配置研究,并分别设置自然发展、生态保护优先、经济发展优先、生态-经济均衡4种情景,致力于探讨如何在保护生态环境的同时,推进该地区经济良性发展和产业结构优化,实现生态效益与经济效益的最大化。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本文的研究区属于西北农牧交错带核心区(图1),位于鄂尔多斯高原及毛乌素沙地(105°35'E—110°54'E,36°49'N—40°11'N),东部与南部邻接陕北黄土高原,北接库布齐沙漠,西以黄河为界,是我国典型的农牧交错区^[4]。该区域地处干旱与半干旱区,降雨少且不稳定,雨季主要集中在7—9月,年均蒸发量(1300~2000 mm)远高于年均降水量(232~441 mm),以致使该区域干旱频发、多风沙,为典型的温带半干旱大陆性季风气候。该地区的水资源主要来源于降水,且由于蒸散发作用和下渗作用较强,故地表水系不发达^[5]。研究区总面积达8万多km²,包括内蒙古鄂尔多斯市的鄂托克旗、鄂托克前旗、乌审旗,陕西省榆林市的榆阳区、神木县、定边县、靖边县、横山县,宁夏吴忠市的盐池县以及银川市的灵武县10个县级行政单位。

2.2 数据来源及处理

(1)土地利用数据^[30]来源于中国科学院资源环

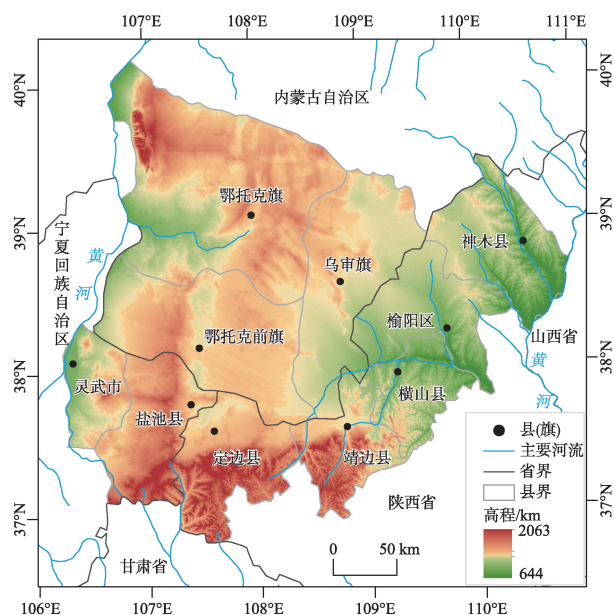


图1 西北农牧交错带核心区位置及行政区划

Fig. 1 Location and administrative division of the study area

境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的1:10万中国土地利用现状遥感监测数据,年份为2005—2015年,每5年一期,在使用前结合野外实地考察及谷歌历史影像进行了修正,修正后二级类综合精度为91.2%,达到模拟要求,将其重采样至1 km分辨率。

(2)高程数据(ASTER GDEM V2)^[31]来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),并基于该数据提取了坡度和坡向数据。

(3)水系、道路等基础地理数据^[32]来源于国家基础地理信息中心的全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/>)。

(4)社会经济数据有中国GDP和人口空间分布公里网格数据集^[33-34](2005年和2015年),来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),相关的统计数据来源于《鄂尔多斯统计年鉴(2011—2016)》^[35]、《榆林统计年鉴(2010—2015)》^[36]、《宁夏统计年鉴(2011—2016)》^[37]。另外,有关于该区域土地利用规划的政策参阅了研究区内各县(旗)自然资源局官方网站所公布的土地利用总体规划文本及相关资料。

3 研究方法

3.1 技术路线

本文利用多目标遗传算法和FLUS模型对该区

域进行土地利用优化配置,技术路线(图2)可分为数量模块和空间模块。数量模块是用于计算多情景下的土地利用需求,首先利用Markov Chain与历史土地利用数据,预测得到自然发展情景下的土地利用需求数据;在此基础上,根据规划文本、2010—2015年土地利用变化速度及不同情景的内涵,构建各土地利用类型的面积约束条件,然后利用多目标遗传算法求解其余3种情景下的土地利用需求。空间模块则是基于FLUS模型模拟多情景下的土地利用分布格局。

3.2 多目标遗传算法

遗传算法借鉴了生物界的自然选择和遗传机制,具有高度并行、随机、自适应的特点^[29],该算法并行的种群搜索机制以及初始搜索时无需先验知识或导数信息的特点有利于解决多目标优化问题^[38]。将其引入到多目标优化中,可以在一次优化过程中产生一组Pareto解,进而选择最优解。

本文选择多目标遗传算法对研究区土地利用的数量结构进行优化,考虑到西北农牧交错带的特殊性,建立的多目标函数主要考虑经济效益和生态效益,而关于政策文件对各种土地利用类型的限制或保护,则转化为土地利用规划的约束条件^[26]。

3.2.1 多目标函数的构建

(1)经济效益目标

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^n B_i x_i \quad (1)$$

式中: F_1 为经济效益/万元; x_i 为各类土地利用类型的面积/ km^2 ; B_i 为各类土地利用类型的经济效益系数/(万元/ km^2),即土地利用类型*i*所产出的单位面积GDP。

通过2010—2015年研究区各个县(旗)的经济数据计算各土地利用类型对应的产值与其面积之比,得到逐年的经济效益系数,再利用GM(1,1)灰色预测模型求得2025年研究区的经济效益系数 B_i (表1)。GM(1,1)模型是通过部分已知的、不完整的原始数据进行处理,生成有较强规律性的数据序列,弱化原始数据的随机性,然后建立灰色微分预测模型来预测未知的内容。

(2)生态效益目标

$$\max F_2 = \sum_{i=1}^n C_i x_i \quad (2)$$

式中: F_2 为生态效益/万元; x_i 为各类土地利用类型的面积/ km^2 ; C_i 为各类土地利用类型的生态系统服务价值系数/(万元/ km^2)。

本文采用谢高地^[39]的中国生态系统服务价值当量因子表来进行生态效益的估算。以2010—2015年研究区的平均粮食单产 $4586.6(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 为基准,粮食单价依据2002—2010年国家退耕还林第一阶段的补贴标准1.4元/kg,并明确在没有人力投入的前提下,一个自然生态系统贡献的经济价值量等于研究区平均粮食单产市场价值的1/7,最终得到研究区的生态价值系数 C_i (表1)。由于建设用地的

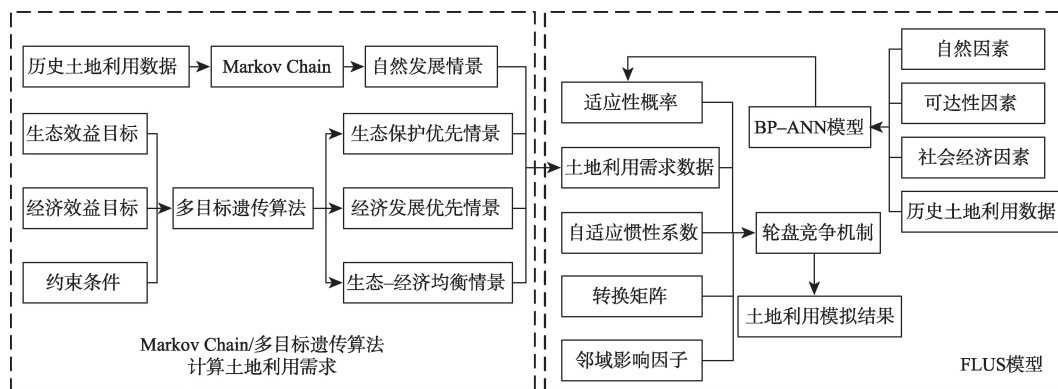


图2 西北农牧交错带土地利用优化配置的技术路线

Fig. 2 The technical route of the optimized configuration of the land use in the agro-pastoral ecotone in Northwest China

表1 西北农牧交错带土地利用类型对应的经济效益系数、生态价值系数

Tab. 1 Economic profit coefficients and ecological value coefficients of land use types in the agro-pastoral ecotone in Northwest China

| | (万元/ km^2) | | | | | |
|--------------|----------------------|--------|-------|--------|---------|------|
| | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
| 经济效益系数 B_i | 191.36 | 58.79 | 42.33 | 173.11 | 9369.04 | 0 |
| 生态价值系数 C_i | 63.39 | 200.43 | 66.41 | 421.69 | 0 | 3.85 |

生态系统服务价值较低,故文中不予考虑。

3.2.2 发展情景的设定及约束条件

(1)发展情景的描述及要求

根据西北农牧交错带的区域特殊性和生态重要性,本文分自然发展、生态保护优先、经济发展优先、生态-经济均衡4种发展目标进行情景设定,相应的情景描述及发展要求如表2。其中,生态效益目标和经济效益目标在不同情景下的所占权重是采用德尔菲法并综合专家意见进行确定的。

(2)约束条件

为了保证多情景下的未来土地利用变化符合自然发展规律和政府的规划预期,本文利用各县(旗)的土地利用规划文本、2025年自然发展情景下

的土地利用需求数据以及2010—2015年的土地利用变化速度来构建约束条件(表3)。

3.3 FLUS模型

3.3.1 FLUS模型的介绍及原理

FLUS模型在CA模型的基础上进行了改进,引入了人工神经网络(ANN)模型用于训练和估计特定网格上每种土地利用类型的适宜性概率,ANN模型适用于复杂非线性问题的求解,可有效解决多类空间变量复杂的权重分配问题^[12]。同时FLUS模型利用自适应惯性竞争机制以表达动态模拟中不同土地利用类型之间的竞争和相互作用。结合上述2个步骤,FLUS模型可以估计每个特定网格上所有土地利用类型的总体转换概率,然后在CA迭代期

表2 西北农牧交错带的土地利用发展情景设定

Tab. 2 The content settings of development scenarios of land use in the agro-pastoral ecotone in Northwest China

| 情景类型 | 情景描述 | 地类转换要求/限制 |
|---------|--|--|
| 自然发展 | 遵循土地利用类型的自然演变规律 | 不对地类间的转换设置限制 |
| 生态保护优先 | 加强对生态用地的保护,保持生态功能稳定,以生态效益的增长为主要优化目标,生态效益目标与经济效益目标的权重分别为0.8和0.2 | 禁止林地和水域向其他地类转换;草地和耕地可向生态价值更高的地类转换,以获取更高的生态效益;禁止占用生态用地来开发耕地;大力开发未利用地向生态用地转换 |
| 经济发展优先 | 加强城乡建设,进一步推进该区域城镇化,带动基础设施建设和产业结构优化,以经济效益的增长为主要优化目标,生态效益目标与经济效益目标的权重分别为0.2和0.8 | 各地类可向经济产出价值更高的地类转换,以获取更高的经济效益;加速建设用地面积的扩张;推进未利用地的开发 |
| 生态-经济均衡 | 加强对土地资源的综合利用程度,在保障生态环境可持续发展和生态建设稳速进行的前提下,促进经济建设快速发展,生态效益目标与经济效益目标的权重分别为0.5和0.5 | 严格保护林地和水域等生态用地,禁止林地和水域向其他地类转换;大力推进未利用地的开发,向生态用地和经济用地转换 |

表3 土地利用类型的面积约束

Tab. 3 Area constraints of various land use types

| 约束类型 | 约束条件/km ² | 说明 |
|-------------------|-----------------------------------|---|
| 土地总面积约束 | $A = \sum_{i=1}^6 x_i$ | 各类土地利用类型的规划面积(x_i)总和应等于研究区的总面积A |
| 耕地保有量约束(x_1) | $13\ 906 \geq x_1 \geq 13\ 236$ | 耕地的最小规模不得低于2015年耕地面积现状13 236 km ² 以及2020年的耕地保有量7780.57 km ² (基于对粮食安全和耕地保护政策的考虑);最大规模以2010—2015年耕地的增长速度来设定 |
| 林地规模(x_2) | $2739 \geq x_2 \geq 2332$ | 林地的最小规模以2010—2015年的退化速度来设定;最大规模设置为自然发展情景下的林地需求数据上调10% |
| 水域面积约束(x_4) | $883 \geq x_4 \geq 865$ | 水域的最小规模以2010—2015年的退化速度来设定;由于该区域地处于旱与半旱区,降雨少,水域面积在1990—2015年持续呈负增长,故将水域的最大规模设为2015年水域面积883 km ² |
| 建设用地规模控制(x_5) | $2677 \geq x_5 \geq 2113$ | 建设用地的最小规模不低于2020年的建设用地规模的控制量;最大规模设置为自然发展情景下的建设用地需求数据上调10% |
| 未利用地规模控制(x_6) | $18\ 076 \geq x_6 \geq 16\ 174$ | 未利用地的最小规模以2010—2015年的开发速度来设定;最大规模不得高于2015年的未利用地面积18 076 km ² |
| 草地面积约束(x_3) | $51\ 062 \geq x_3 \geq 50\ 050$ | 草地面积的变化不仅受人类活动影响,而且受降雨影响也较大,将其面积变化范围设定为在自然发展情景下草地面积的基础上 $\pm 1\%$ |
| 生态环境保护约束 | $x_i \geq 2496$ $x_i \geq 883$ | 仅约束“生态保护优先”及“生态-经济均衡”情景,设定林地、水域等生态用地面积不可再减少 |
| 决策量非负约束 | $x_i \geq 0, i=1,2,3,4,5,6$ | 在模型中,各约束变量要求为非负值 |

间利用轮盘竞争机制来确定土地利用类型的转换方式^[16,40]。

(1) 基于神经网络的适宜性概率计算

FLUS模型中的BP-ANN由一个输入层、一个或多个隐藏层、一个输出层构成。其中输入层的神经元与土地利用变化的驱动因子相对应,输出层的神经元与土地利用类型对应。

$$p(p,k,t) = \sum_j w_{j,k} \times \text{sigmoid}(net_j(p,t)) \quad (3)$$

$$= \sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-net_j(p,t)}}$$

式中: $p(p,k,t)$ 为第 k 种土地利用类型在栅格 p 、时间 t 上的适应性概率; $w_{j,k}$ 是隐藏层与输出层间的权值; sigmoid 是隐藏层到输出层的激活函数; $net_j(p,t)$ 表示在时间 t 上第 j 个隐藏层栅格 p 所接收到的信号。另外,由BP-ANN得到的各种土地利用类型的适宜性概率 $p(p,k,t)$,其总和恒为1,即:

$$\sum_k p(p,k,t) = 1 \quad (4)$$

(2) 基于自适应惯性竞争机制的元胞自动机模块

自适应惯性竞争机制的核心是自适应惯性系数,各地类的惯性系数由当前各类用地的实际数量与土地利用需求之间的差异决定,然后在迭代中进行自适应调整,使各种土地利用类型的数量向目标发展。第 k 类用地在 t 时刻的自适应惯性系数 $Inertia'_k$ 为:

$$Inertia'_k = \begin{cases} Inertia'_k & |D_k^{t-1}| \leq |D_k^{t-2}| \\ Inertia'_k \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0 \\ Inertia'_k \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & 0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_k^{t-1} 、 D_k^{t-2} 分别为第 k 类用地在 $t-1$ 、 $t-2$ 时刻的土地需求数量与其所分配面积之差。

土地利用转化概率受多个因素影响,包括BP-ANN输出的适宜性概率、邻域作用、惯性系数、转换成本和地类竞争等。综合考虑以上因素,可计算得到各个栅格的总体转换概率,结合轮盘竞争机制在CA中迭代,将各类用地分配至栅格中。栅格 p 在 t 时刻转化为 k 类用地的总体转换概率 $TProb'_{p,k}$ 可表示为:

$$TProb'_{p,k} = p(p,k,t) \times \Omega'_{p,k} \times Inertia'_k \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (6)$$

式中: $sc_{c \rightarrow k}$ 为 c 类用地转换为 k 类用地的成本; $1 - sc_{c \rightarrow k}$ 表示发生转化的难易程度; $\Omega'_{p,k}$ 为邻域作用,公式为:

$$\Omega'_{p,k} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (7)$$

式中: $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示 k 类用地在上一次迭代结束后,在 $N \times N$ 的Moore邻域窗口中的栅格总数,本文中取 $N=5$; w_k 为各类用地邻域作用强度的权重。

3.3.2 FLUS模型的土地利用模拟过程

利用FLUS模型对土地利用的空间布局进行模拟,首先需要对土地利用数据和驱动因子数据进行随机采样,获取研究区的训练样本集,利用神经网络模型对训练样本集进行训练。然后将得到的土地利用类型适宜性概率,结合元胞邻域影响因子、自适应惯性系数、转换矩阵的共同作用,计算出各个元胞单元的土地利用总体转换概率,最终采用轮盘竞争机制以确定元胞单元向哪种土地利用类型发生转换^[16,41]。为了更好地避免误差传递,本文所采用的FLUS模型仅从一期土地利用数据和驱动因子数据中采样。

4 结果与分析

4.1 FLUS模型的精度验证

本文以2005年的土地利用数据为基础,通过FLUS模型模拟得到2015年的土地利用情形,并利用2015年的真实土地利用情形进行验证,得到的Kappa系数为0.85,总体精度为91.04%,由此可知FLUS模型的模拟精度较高。二者对比来看(图3),仅建设用地精度略低,主要原因是2005年的西北农牧交错带建设用地较少,尚处在发展初期,未形成稳定的空间分布格局,后续发展中受到较多的政府政策干预和人类活动影响,而该类用地在模拟时,其空间分布受初始状况的影响较大。由于2015年研究区的建设用地有了较大的扩张和发展,其宏观上的空间分布格局已相对稳定,故可以使用该模型及相应的模型参数对2025年的土地利用情形进行模拟和优化。

4.2 多情景下的土地利用数量结构方案

基于马尔科夫链和多目标遗传算法得到多情景下的土地利用结构方案(表4)。4种方案中,土地利用类型的数量结构差异明显,其中,林地、草地、建设用地和未利用地由于对生态效益和经济效益具有直接且显著的影响,因此相较于2015年的土地利用数据变化较为明显。

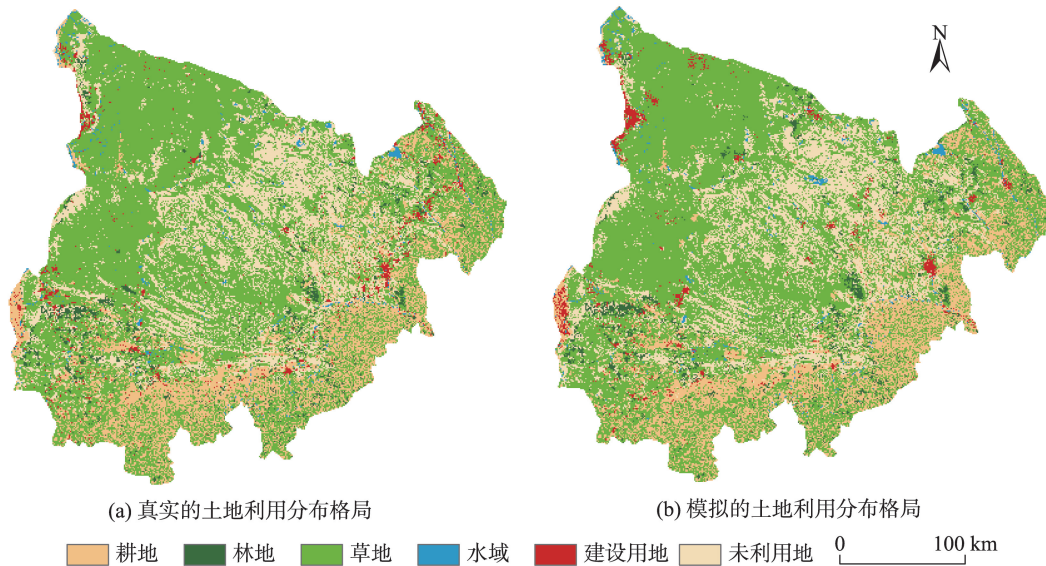


图3 2015年西北农牧交错带土地利用模拟与真实情况对比

Fig. 3 Simulated situation of land use is compared with the real one in the agro-pastoral ecotone in 2015

表4 西北农牧交错带不同模拟情景下土地利用面积、变化面积及变化比例的对比分析

Tab. 4 Comparative analysis of land use area, change in area and change in proportion under different scenarios in the agro-pastoral ecotone in Northwest China (km²,%)

| 类型 | 2015年 面积 | 2025年 | | | | | | | | | | | |
|------|-------------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|---------|----------|----------|
| | | 自然发展 | | | 生态保护优先 | | | 经济发展优先 | | | 生态-经济均衡 | | |
| | | 面积 | 变化 面积 | 变化 比例 | 面积 | 变化 面积 | 变化 比例 | 面积 | 变化 面积 | 变化 比例 | 面积 | 变化 面积 | 变化 比例 |
| 耕地 | 13 236 | 13 509 | 273 | 2.06 | 13 237 | 1 | 0.00 | 13 388 | 152 | 1.15 | 13 311 | 75 | 0.57 |
| 林地 | 2496 | 2490 | -6 | -0.24 | 2712 | 216 | 8.65 | 2411 | -85 | -3.41 | 2675 | 179 | 7.17 |
| 草地 | 50 035 | 50 556 | 521 | 1.04 | 50 781 | 746 | 1.49 | 50 660 | 625 | 1.25 | 50495 | 460 | 0.92 |
| 水域 | 883 | 876 | -7 | -0.79 | 883 | 0 | 0.00 | 878 | -5 | -0.57 | 883 | 0 | 0.00 |
| 建设用地 | 1567 | 2433 | 866 | 55.26 | 2325 | 758 | 48.37 | 2675 | 1108 | 70.71 | 2581 | 1014 | 64.71 |
| 未利用地 | 18 076 | 16 429 | -1647 | -9.11 | 16 355 | -1721 | -9.52 | 16 281 | -1795 | -9.93 | 16 348 | -1728 | -9.56 |

从表4可以看出,自然发展情景下,研究区的林地减少了6 km²,草地增加了521 km²,水域减少了7 km²。生态用地面积虽总体上呈增长趋势,但其中林地和水域面积呈减少趋势,变化比例分别为-0.24%和-0.79%。对于干旱与半干旱区而言,林地和水域的生态价值极高,其面积的减少不利于生态建设与保护。此外,该情景下耕地面积增加了273 km²,建设用地增加了866 km²,经济用地显著增加。

生态保护优先情景下,研究区的林地增加了216 km²,草地增加了746 km²,该情景下生态用地大量增加,并且水域不再呈持续减少趋势,这有利于该区域的生态环境建设。同时,由于严格保护生态用地,禁止耕地占用生态用地,该情景下耕地面积则几乎不变;但建设用地的扩张速度因禁止过度开

发而减缓,相较于2015年的建设用地规模,该类用地仅增长了758 km²,经济用地增幅相对较小。

经济发展优先情景下,研究区的林地减少了85 km²,草地增加了625 km²,水域减少了5 km²,水域和林地的减少对该区域环境的可持续发展具有不利影响。但其耕地面积增加了152 km²,农业产值将随之增加;建设用地增加了1108 km²,经济用地增幅明显。

生态-经济均衡情景下,林地增加了179 km²,草地增加了460 km²,水域面积未减少,生态用地增幅较大,生态效益改善显著。同时,耕地增加了75 km²,建设用地增加了1014 km²,经济用地面积也显著增加。该情景下土地利用类型的数量结构较为合理,能同时兼顾到生态效益和经济效益。

由上述分析可知,基于生态-经济均衡情景所提出的优化方案,其生态用地和经济用地面积均显著增加,在严格保护生态用地的同时,推进了未利用地向生态用地和经济用地转换,避免了因经济快速发展而导致生态用地直接向经济用地转换,保证了该区域的生态与经济平衡发展。

4.3 多情景下的土地利用空间分布格局

通过FLUS模型得到2025年不同情景下研究区的土地利用分布格局(图4)。可以看出,水域在空间分布上几乎无变化,仅在自然发展和经济发展优先情景中出现零星的消退现象。耕地、林地、草地、建设用地和未利用地在4种情景下,空间布局都

发生了相对明显的变化,其中未利用地在4种情景中均为消退现象。未利用地的减少是以向其他经济用地或生态用地转换的方式进行的,意味着另一种或几种地类的增长。

(1)耕地在自然发展、经济发展优先、生态-经济均衡情景下,主要在东部、南部及东南部出现增长,其中在生态-经济均衡情景下,东部耕地出现部分消退,向建设用地等转换。在生态保护优先情景下则几乎无变化,仅在东部及东南部出现零星增长与消退。

(2)林地在自然发展情景下,空间分布无明显变化,仅出现零星增长和消退;在经济发展优先情景下,出现明显消退;在生态保护优先和生态-经济

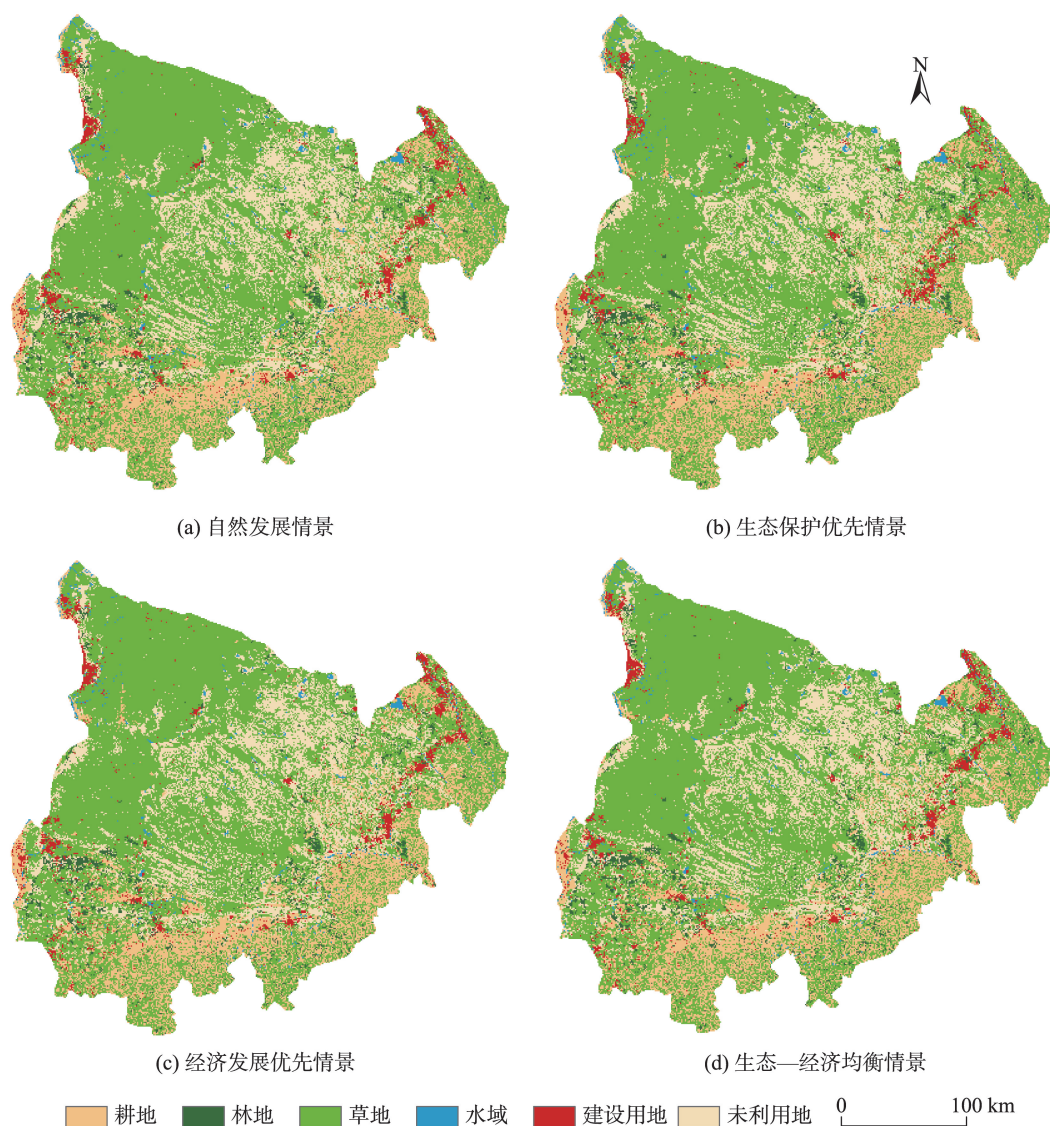


图4 2025年西北农牧交错带不同模拟情景下的土地利用分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use under different scenarios in the agro-pastoral ecotone in 2025

均衡情景下,由于其受到严格的保护,未向其他土地利用类型转换,而是在已有林地周围呈边缘式扩张,其中在生态保护优先情景下,林地的扩张更为明显。

(3)草地在4种发展情景下,均在研究区西北部和中部出现显著增长,东北部次之,主要增长方式为边缘式和填充式。生态保护优先情景下,草地在空间布局上无明显消退现象;而在自然发展、经济发展优先和生态-经济均衡情景下,草地在不同区域均有细微的增长和消退现象,总体上增长多于消退,在西南及东部出现草地向耕地、建设用地、林地等的转变。

(4)建设用地面积在4种情景下,均有所扩张,主要扩张方式为填充式和边缘式。其中,研究区南部黄土丘陵地区的农村建设用地,增速相对缓慢。在生态保护优先情景下,由于对生态用地的严格保护,建设用地只能由未利用地转入,其分布较为分散,而在另外3种情景下,建设用地较为聚集,布局紧凑。

综上所述,可知研究区在生态-经济均衡情景下,土地利用类型的空间布局更为合理。该情景下,林地无消退现象,主要呈边缘式扩张,利于生态保护;耕地和草地也呈多方位增长,部分耕地和草地向生态价值更高的林地、经济价值更高的建设用地等转换,更利于综合效益;此外,与生态保护优先情景相比较,生态-经济均衡情景下的建设用地布局更紧凑,分布更为合理。

4.4 多情景下的土地利用方案效益分析

基于经济效益目标和生态效益目标得到4种情景下2025年研究区的经济效益值与生态效益值(表5),比较分析不同情景的效益。

由表5可知,生态保护优先情景下,生态效益最高,达519.03亿元,但经济效益在4种情景中是最低的,为2677.79亿元,该情景优化方案仅利于该区域的生态建设,不利于经济发展,将致使该区域的经济落后情况加剧。经济发展优先情景下的土地利

用结构大力推进了该地的经济发展,经济效益显著增加,至2025年将高达3006.23亿元,而生态建设速度却随之放缓,生态效益值仅为512.92亿元,是4种情景中最低的。因此,生态保护优先和经济发展优先情景都将会致使该区域的发展失衡,不利于该区域的生态环境建设和社会经济发展。自然发展情景下,经济效益和生态效益相对平衡,但相比较生态-经济均衡情景而言,其未能实现效益最大化。与生态保护优先情景下的经济效益相比较,自然发展情景下的经济效益增加了3.88%,而生态-经济均衡情景下增加了8.96%,增幅显著。同时又与经济发展优先情景下生态效益相比较,自然发展情景下的生态效益仅增加了0.32%,生态-经济均衡情景下增加了0.77%。

生态-经济均衡优化方案在合理限制经济发展速度下,保障了该区域的生态建设稳速推进,尽可能将效益最大化,探索到可持续发展方案。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文通过设定的4种情景,模拟了多情景下西北农牧交错带2025年的土地利用结构及空间分布格局,主要得到以下结论:

(1)结合多目标遗传算法和FLUS模型进行土地利用优化配置,在方法的组合上具有一定的创新性,简单有效地针对不同发展目标进行了优化配置,是该领域极具潜力的工具。该方法能够充分考虑到西北农牧交错带的区位特殊性和重要性,具有较好的适用性。其中多目标遗传算法可综合考虑西北农牧交错带的多方效益,获得多个土地利用数量结构的优化方案,供决策者结合实际需求和规划目标进一步选择;而FLUS模型在土地利用分布格局的模拟中,更好地反映了西北农牧交错带土地利用变化过程中的不确定性,有效预测了多情景下的未来土地利用情形,且模拟精度较高。

表5 多情景效益对比分析

Tab. 5 Comparative analysis of benefits based multi-scenarios

| | 自然发展 | 生态保护优先 | 经济发展优先 | 生态-经济均衡 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 经济效益/亿元 | 2781.80 | 2677.79 | 3006.23 | 2917.63 |
| 生态效益/亿元 | 514.55 | 519.03 | 512.92 | 516.86 |
| 经济效益变化比例(以生态保护优先情景为基准)/% | 3.88 | 0.00 | 12.27 | 8.96 |
| 生态效益变化比例(以经济发展优先情景为基准)/% | 0.32 | 1.19 | 0.00 | 0.77 |

(2)从数量结构、空间布局、综合效益3方面对4种情景下的土地利用情形进行比较分析,可知生态-经济均衡情景在权衡生态效益与经济效益下提供的优化配置方案中,西北农牧交错带土地利用类型的数量结构和空间布局更为合理。同时在兼顾经济发展的前提下,该区域的生态建设获得稳定发展,至2025年,其经济效益较生态保护优先情景下增长了8.96%,生态效益较经济发展优先情景下增长了0.77%,综合效益优于另外3种情景。该方案为西北农牧交错带未来的生态环境建设、经济发展规划以及土地资源配提供了决策辅助,可带动该地区的产业结构优化。

(3)国内该方面的研究,如马冰滢等^[1]探索生态保护与经济发展的权衡关系,并基于该权衡关系开展土地利用优化配置^[1],本文与该研究得到的结论一致,即生态效益与经济效益间存在权衡关系,基于该权衡关系进行土地利用优化配置对政府决策具有更大的参考价值。相较于该团队选用的CLUE-S模型,本文采用的FLUS模型因其引入了自惯性系数和轮盘竞争机制,可以更好地模拟出西北农牧交错带土地利用变化过程中的不确定性。

5.2 讨论

西北农牧交错带属于典型的生态脆弱带,处理其经济发展与生态建设之间的矛盾,应严格统筹安排各类用地,禁止开发可能造成生态破坏的区域;加强西北农牧交错带“三北”防护林工程建设、“天然林资源保护”工程的实施,保护和增加林草地等生态用地;大力加强对水资源的保护,避免水域面积的退化;严格实施耕地保护政策,增强耕地的可利用程度,对建设用地占用耕地的比例严加控制;加强土地利用的规划,推进未利用地向林地、建设用地等土地利用类型转变。

本文针对西北农牧交错带提出了生态-经济均衡的土地利用优化配置方案,但仍有不足之处:由于搜集到的土地利用规划文本中数据有限,无法完全满足所有约束条件的构建,导致在计算土地利用数量结构方案时,以自然发展情况下的土地利用演变趋势进行了条件约束,从而引入了少量的主观判断。如何在土地利用需求计算模块中考虑影响土地利用变化的空间因素,从而对未来土地利用需求进行更加客观科学的计算,将是今后土地利用优化配置的研究重点。

参考文献(References):

- [1] 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. [Ma B Y, Huang J, Li S C. Optimal allocation of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on ecological and economic benefits trade-offs [J]. Progress in Geography, 2019,38(1):26-37.]
- [2] 陆军辉,梅志雄,赵书芳,等.土地利用配置的混沌蚁群优化算法研究[J].地球信息科学学报,2017,19(8):1026-1035. [Lu J H, Mei Z X, Zhao S F, et al. Land use optimization allocation based on chaos ant colony algorithm[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(8):1026-1035.]
- [3] 魏伟,颜耀文,魏晓旭,等.基于CLUE-S模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置[J].武汉大学学报·信息科学版,2017,42(9):1306-1315. [Wei W, Xie Y W, Wei X X, et al. Land use optimization based on CLUE-S model and ecological security scenario in Shiyang River Basin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(9):1306-1315.]
- [4] 穆亚超.基于Landsat影像的西北农牧交错带地区植被信息提取[D].兰州:兰州大学,2017. [Mu Y C. Vegetation information extraction in the agriculture and pasturage interlaced zone of northwest China based on landsat image[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]
- [5] 曾晟轩,顾娟,贺缠生.西北农牧交错带中部气候变化特征及其持续性[J].水土保持研究,2018,25(4):356-364. [Zeng S X, Gu J, He C S. Variability and persistence of climate in the agricultural-pastoral transitional zone in the central part of the northwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(4):356-364.]
- [6] 杜华明,延军平,王鹏涛.北方农牧交错带干旱灾害及其对暖干气候的响应[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):124-128. [Du H M, Yan J P, Wang P T. The drought disaster and its response to the warming-drying climate in the farming-pastoral ecotones in northern China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(1):124-128.]
- [7] 刘家福,王平,李京,等.基于Markov模型的长岭县土地利用时空变化研究[J].水土保持研究,2009,16(3):16-19. [Liu J F, Wang P, Li J, et al. Spatial-temporal changes of land use based on Markov model in Changling County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009,16(3):16-19.]
- [8] 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.]
- [9] 耿红,王泽民.基于灰色线性规划的土地利用结构优化研

- 究[J].武汉测绘科技大学学报,2000,25(2):167-171,182. [Geng H, Wang Z M. Research on optimization of land use structure based on gray linear programming[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000,25(2):167-171,182.]
- [10] 刘欣,赵艳霞,冯晓森,等.基于CLUE-S模型的多目标土地利用格局模拟与优化——以河北省廊坊市北三县为例[J].地理与地理信息科学,2018,34(5):92-98. [Liu X, Zhao Y X, Feng X M, et al. Simulation and optimization of multi-objective land use pattern based on the CLUE-S model: A case study of the three northern counties of Langfang in Hebei Province[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018,34(5):92-98.]
- [11] Zhang H H, Zeng Y N, Jin X B, et al. Simulating multi-objective land use optimization allocation using Multi-agent system: A case study in Changsha, China[J]. Ecological Modelling,2016,320:334-347.
- [12] 黎夏,叶嘉安.基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J].地理研究,2005,24(1):19-27. [Li X, Yeh A G O. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks[J]. Geographical Research, 2005,24(1):19-27.]
- [13] 张美美,张荣群,郝晋珉,等.基于ANN-CA的银川平原湿地景观演化驱动力情景模拟分析[J].地球信息科学学报,2014,16(3):418-425. [Zhang M M, Zhang R Q, Hao J M, et al. The scenarios simulation analysis of driving forces of wetland landscape evolution using ANN-CA in Yinchuan Plain[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(3):418-425.]
- [14] 刘小平,黎夏,艾彬,等.基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J].地理学报,2006,61(10):1101-1112. [Liu X P, Li X, Ai B, et al. Multi-agent systems for simulating and planning land use development[J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(10):1101-1112.]
- [15] 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. [Deng H, Shao J A, Wang J L, et al. Land use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir Area using CLUE-S model[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(11):1979-1997.]
- [16] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [17] 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. [Hu B S, Zhang H Y. Simulation of land-use change in Poyang Lake Region based on CA-Markov model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(6):1207-1219.]
- [18] 岳东霞,杨超,江宝骅,等.基于CA-Markov模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J].生态学报,2019,39(6):1993-2003. [Yue D X, Yang C, Jiang B H, et al. Spatio-temporal pattern prediction of the biocapacity in the Shiyang River Basin on the basis of the CA-Markov model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(6):1993-2003.]
- [19] Liu D F, Tang W W, Liu Y L, et al. Optimal rural land use allocation in central China: Linking the effect of spatio-temporal patterns and policy interventions[J]. Applied Geography, 2017,86:165-182.
- [20] Wu M, Ren X Y, Che Y, et al. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: A case study in Baoshan district, Shanghai, China[J]. Environmental management,2015,56(2):402-419.
- [21] Lauf S, Haase D, Hostert P, et al. Uncovering land-use dynamics driven by human decision-making - A combined model approach using cellular automata and system dynamics[J]. Environmental Modelling & Software,2012,27-28:71-82.
- [22] Xu X M, Du Z Q, Zhang H. Integrating the system dynamic and cellular automata models to predict land use and land cover change[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2016,52:568-579.
- [23] 柯新利,孟芬,马才学.基于粮食安全与经济发展区域差异的土地资源优化配置——以武汉城市圈为例[J].资源科学,2014,36(8):1572-1578. [Ke X L, Meng F, Ma C X. Optimizing land resource allocation based on food security and regional difference in economic development: A case study in Wuhan metropolitan[J]. Resources Science, 2014,36(8):1572-1578.]
- [24] 王丽萍,金晓斌,杜心栋,等.基于灰色模型—元胞自动机模型的佛山市土地利用情景模拟分析[J].农业工程学报,2012,28(3):237-242. [Wang L P, Jin X B, Du X D, et al. Land use scenarios simulation of Foshan city based on gray model and cellular automata model[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(3):237-242.]
- [25] 王汉花,刘艳芳.基于MOP-CA整合模型的土地利用优化研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2009,34(2):174-177,247. [Wang H H, Liu Y F. Optimal allocation of land resources based on MOP-CA[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(2):174-177,247.]
- [26] 刘菁华,李伟峰,周伟奇,等.权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析[J].生态学报,2018,38(12):4341-4350. [Liu J H, Li W F, Zhou W Q, et al. Scenario simulation balancing multiple

- objectives for optimal land use allocation of the Beijing-Tianjin- Hebei megaregion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(12):4341-4350.]
- [27] 李少英,刘小平,黎夏,等.土地利用变化模拟模型及应用研究进展[J].*遥感学报*,2017,21(3):329-340. [Li S Y, Liu X P, Li X, et al.Simulation model of land use dynamics and application: Progress and prospects[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017,21(3):329-340.]
- [28] Li X, Chen G Z, Liu X P, et al. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5):1040-1059.
- [29] 黄海.土地利用结构多目标优化遗传算法[J].*山地学报*, 2011,29(6):695-700. [Huang H. Multi-objective genetics algorithm for land use structure optimization[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011,29(6):695-700.]
- [30] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆盖遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54,2019-06-15>. [Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, et al. China's Multi-period land use land cover remote sensing monitoring data set (CNLUCC) [DB/OL]. <http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54,2019-06-15>.]
- [31] 地理空间数据云平台.ASTER GDEM V2[DB/OL].<http://www.gscloud.cn/,2019-06-15>. [Geospatial Data Cloud. ASTER GDEM V2[DB/OL]. <http://www.gscloud.cn/,2019-06-15>.]
- [32] 全国地理信息资源目录服务系统. 1:25万全国基础地理数据[DB/OL]. <http://www.webmap.cn/,2019-06-15>. [National Catalogue Service for Geographic Information. 1: 250000 national basic geographic data[DB/OL]. <http://www.webmap.cn/,2019-06-15>.]
- [33] 徐新良.中国GDP空间分布公里网格数据集[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=33,2019-06-15>. [Xu X L. Spatial distribution of GDP kilometer grid dataset in China[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=33,2019-06-15>.]
- [34] 徐新良.中国人口空间分布公里网格数据集[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=251,2019-06-15>. [Xu X L. Spatial distribution of population kilometer grid dataset in China[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=251,2019-06-15>.]
- [35] 鄂尔多斯市统计局.鄂尔多斯统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011-2016. [Ordos municipal bureau of statistics. Ordos statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2016.]
- [36] 榆林市统计局.榆林统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2010-2015. [Yulin municipal bureau of statistics. Yulin statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010-2015.]
- [37] 宁夏回族自治区统计局,国家统计局宁夏调查总队.宁夏统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011-2016. [Ningxia hui autonomous region bureau of statistics, Ningxia investigation corps of the national bureau of statistics. Ningxia statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2016.]
- [38] 董品杰,赖红松.基于多目标遗传算法的土地利用空间结构优化配置[J].*地理与地理信息科学*,2003,19(6):52-55. [Dong P J, Lai H S. A method of optimization allocation of land use spatial structure based on multi-objective genetic algorithm[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2003,19(6):52-55.]
- [39] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].*自然资源学报*,2003,18(2):189-196. [Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003,18(2):189-196.]
- [40] 吴欣昕,刘小平,梁迅,等.FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J].*地球信息科学学报*,2018,20(4):532-542. [Wu X X, Liu X P, Liang X, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(4):532-542.]
- [41] 曹帅,金晓斌,杨绪红,等.耦合MOP与GeoSOS-FLUS模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J].*自然资源学报*,2019,34(6):1171-1185. [Cao S, Jin X B, Yang X H, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(6): 1171-1185.]