

生态红线约束下万州区土地利用情景模拟及生态价值评估

陈兵飞¹, 廖铁军¹, 张莉坤²

(1.西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2.河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450002)

摘 要:为研究在生态红线划定之后对区域生态环境价值的影响,以重庆市万州区为例,通过 FLUS 模型模拟 2025 年自然发展情景和生态保护情景下土地利用的变化情况,通过改进的万州区生态价值系数并结合土地利用变化情况计算出生态系统服务总价值,最后分析了不同地类价值系数和面积变化对总价值的影响。结果表明:(1)选取 3 个方面的 8 个驱动因子适合对于研究区的土地利用模拟且 FLUS 模型 Kappa 值大于 0.8 表明利用 FLUS 模型对研究区的模拟适应性较好;(2)通过计算万州区 2017 年现状、2025 年自然发展情景和生态保护情境下的生态系统服务总价值分别为 41.06 亿元、40.83 亿元和 41.00 亿元,在设定的情境下只有林地的生态系统服务总价值都表现为增长的现象;(3)由万州各土地类型的敏感性都小于 1 表明万州区的生态系统服务价值对于生态价值系数变化缺乏弹性,结果可信;在生态变化度分析中,林地的变化度指数最大说明林地的面积变化对生态系统服务总价值的影响最大;(4)在 2025 年设定的两种情景模拟中,生态保护情景与自然发展情景林地的生态系统服务价值相比有一定程度的增加,建设用地的生态系统服务价值则下降,表明生态红线的划定对于新增建设用地的蔓延扩张有一定的限制作用。

关键词:生态保护红线;生态系统服务价值;FLUS 模型;万州区

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0349-09

Simulation of Land Use Situation and Ecological Value Assessment in Wanzhou District Under the Constraints of Ecological Red Line

CHEN Bingfei¹, LIAO Tiejun¹, ZHANG Likun²

(1.School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.School of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to study the impact on the ecological value of the region after the delineation of the ecological red line, Wanzhou District of Chongqing City was used as an example to simulate the land use change in the natural development scenario and ecological protection scenario in 2025 through the FLUS model. The total value of ecosystem services was calculated based on the ecological value coefficient of land and land use changes. Finally, the impact of changes in the value coefficient and area of different land types on the total value was analyzed. The results show that: (1) 8 driving factors selected from the three aspects are suitable for the simulation of land use in the study area, and the FLUS model Kappa value is greater than 0.8, which indicates that the simulation of the study area with the FLUS model has good adaptability; (2) by calculating the current status of Wanzhou District in 2017, natural development scenarios in 2025, and the total value of ecosystem services in the context of ecological protection, the total values of ecosystem services are 4.106×10^9 yuan, 4.083×10^9 yuan, and 4.100×10^9 yuan, respectively; in the set scenario, only the total value of ecosystem services of forestland is a phenomenon of growth; (3) the sensitivity of each land type in Wanzhou is less than 1, indicating that the ecosystem service value of Wanzhou District is inelastic to the change of the ecological value coefficient, and the results are credible; in the analysis of the degree of ecological change, the change index of the forest land is the largest, which shows that the change in the area of

收稿日期:2019-11-11

修回日期:2019-12-05

资助项目:教育部人文规划基金(15XJA790002);国家自然科学基金重点项目(41530855)

第一作者:陈兵飞(1994—),男,河南鲁山人,硕士研究生,研究方向为土地资源利用与规划。E-mail:578591589@qq.com

通信作者:廖铁军(1961—),男,重庆合川人,教授,硕士生导师,主要从事土地资源利用与规划研究。E-mail:ltjhy-007@163.com

forestland has the greatest impact on the total value of ecosystem services; (4) in the two scenarios set up in 2025, the ecological protection scenario will have increased to a certain extent compared with the ecosystem service value of natural development scenarios; the value of ecosystem services for construction land will be decreasing, indicating that the delineation of the ecological red line for new construction land spread expansion will have certain restrictions.

Keywords: ecological protection red line; ecosystem service value; FLUS model; Wanzhou District

近年来,随着经济的快速发展生态环境也遭受到一定程度的破坏,对于如何处理好经济发展和生态环境之间的关系是国内外的一个热点议题,我国对于此也提出了相关政策。在十三届全国人大二次会议上习近平总书记强调不能因为经济发展遇到一点困难,就开始动铺摊子上项目、以牺牲环境换取经济增长的念头,甚至想方设法突破生态保护红线。在新修订的《环境保护法》和《国家安全法》中,均对“划定生态保护红线并实施严格保护”作出了明确规定。十八大以来,党中央、国务院先后出台了一系列重要文件推进生态文明建设^[1]。以上说明我国十分重视生态环境问题,通过划定生态红线对事关国家生态安全的重要生态区域实施严格监督和管理,提高生态保护与管理成效,实现一条红线管控重要生态空间^[2-3]。目前,在我国范围内的生态保护红线划定工作尚不完善,有待进一步核定。那么如何将生态保护红线的划定成果运用到实际的研究工作中?如何衡量生态保护红线划定在生态保护方面的价值?生态红线对于区域建设用地的快速扩张有怎样的约束作用?这些都是生态红线划定后的热点和急切需要解决的问题。本文的研究以此为切入点,尝试研究解决上述存在的问题^[4]。

土地利用变化是一个复杂的、多因素影响的过程,为了探究其内在的机制,一般都会运用一定的模型。当前国内外在研究中应用的比较常见的土地利用变化模型主要有 CLUE-S 模型、系统动力学(SD)模型、Markov 模型、元胞自动机(CA)模型、FLUS 模型等^[5-13]。其中由黎夏、刘小平^[14-16]等提出的 FLUS 模型能够较好地处理各驱动因子之间的关系,能够较准确地模拟出在自然环境和人为活动的作用下土地利用类型发生转化的情况,可以在很大程度上提高模拟的准确度并且能得出与实际的土地利用现状布局相一致的结果。土地利用变化模型基本上都是基于研究区的宏观政策调控、人口和经济自然增长、长期发展规划等约束条件进行模拟,将生态保护红线最新的划定成果作为土地利用空间优化限制要素加入到 FLUS 模型中,在目标年的两种情景模式下对比分析各种土地种类的数量结构和空间分布变化情况,为研究区的可持续发展提供一

定的参考。生态系统的服务总价值在一定程度上可以反映区域的生态情况和生态红线划定的生态价值,国内外很多学者都对生态系统服务价值问题做过研究,如国外学者 Costanza 等^[17]在全球的尺度范围内估算了生态系统服务价值,并提出了一套系统的服务价值系数;国内学者谢高地等^[18]在全国的尺度上估算了生态系统服务价值并根据我国的实际情况对生态价值系数进行了优化。本文在借鉴以上研究的基础上,根据万州的实际情况结合咨询相关学者的建议对万州区目标地类的价值系数进行优化。根据优化之后的价值系数对总体价值进行估算,由于总价值的变化受土地类型的面积和生态价值系数的影响,再对不同类型土地价值系数和面积变化对总价值的影响度进行分析^[19],以此验证计算结果的可靠程度,并对影响因素进行深入分析,以期为研究区土地布局空间规划、生态服务系统价值评估、政府系统的决策等提供依据,有力推进万州区“面上保护,点上开发”的生态文明建设的实施。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

三峡库区山脉分布众多且地势险峻,人均占地少,人地之间的矛盾十分尖锐,库区内大型植被分布少,水土流失严重,是典型的生态敏感脆弱区和长江中下游的重要生态保护屏障,对于维护长江中下游的生态安全具有重要的作用^[20]。而本文选择的万州区位于 30°23′32″—31°0′20″N, 107°52′22″—108°53′25″E,地处三峡库区的腹心位置,东邻云阳,南接石柱、湖北利川,西连梁平、忠县、北临开县和四川省开江县,区域大小为 3 456.38 km²,包括 12 个乡、29 个镇、11 个街道办事处。区内主要包括平坝区、丘陵区、低山区、中山区 4 种地形地貌,全区土地地形分布零碎,不成规模;万州区属亚热带湿润性季风气候,四季分明,全区年平均气温 19.4℃;万州区森林面积 1 650 km²,森林覆盖率达 50.1%,天然保护林面积有 128 867 hm²;万州区作为重庆的第二大城市是重庆 40 个区县中人口最多的一个大区,在重庆乃至西南地区都占据重要地位,2016 年,全区户籍人口 176.05 万人,国内生产总值达到

897.39 亿元。但随着近年来工业的快速发展和城市化率的提高,万州区大量农用地被占情况严重,人地矛盾日益突出,生态环境遭到破坏,为了实现“面上保护,点上开发”以及和公共利益配置之间的平衡,因此有必要进行土地利用布局优化及区域的生态价值评估的研究。研究区位置图见图 1。

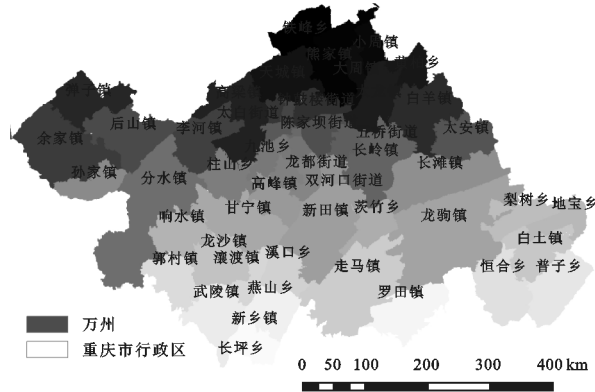


图 1 研究区位置

1.2 数据来源

该研究所使用的土地利用类型数据和生态保护区生态红线数据、社会经济数据均是来源于万州区自然资源局相关部门和万州区统计年鉴,DEM 数据(30 m×30 m)在地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)下载。依据研究区的实际情况和专家的建议结合全国第二次土地调查的标准将区域内的土地分为耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域、其他土地等大类。为了使数据可计算,首先统一数据的范围与格式为 30 m×30 m 栅格,然后将矢量数据基于土地利用现状图进行配准并转换为栅格,最后通过坐标配准、投影转换、重采样等方法对 DEM 数据进行处理;利用空间分析中欧式距离计算不同地类到城镇中心、高速公路、主干道以及铁路的距离;用空间分析方法对生态保护区的要素进行提取。

2 研究方法

本文利用 2009 年、2017 年两期土地利用数据为依据,采用 FLUS 模型对重庆万州区 2025 年的土地利用状况进行有无生态保护红线约束的情景模拟,并对模拟结果与现状进行了生态服务价值评估对比。

2.1 Morkov(马尔科夫)模型

Markov 模型在分析土地利用变化过程中的应用效果良好,能够准确地预测区域中各种地类数量变化,Markov 模型的特点是具有无后效性和时效性,转移过程与转移前的时间无关,只与转移的初始状态和转移步数相关,本文以 8 a 为一个步长来计算^[21]。其表达式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P 为某种地类变化前后的移概率矩阵; m 和 n 为研究区域内的土地类型数; P_{ij} 表示地类 i 变化为地类 j 的概率。

2.2 FLUS 模型及输入要素

2.2.1 FLUS 模型介绍 FLUS 模型是由中山大学黎夏教授团队开发的是用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型,具有很强的时空动态模拟能力,是在其前身——地理模拟与优化系统 GeoSOS 的基础上的发展与传承,该软件在处理地理空间模拟、土地空间布局优化等方面有着良好的效果。该模型首先采用神经网络算法(ANN)通过土地利用现状数据、驱动因子等来计算各类用地类型在研究范围内的适宜性概率,然后通过耦合系统动力学模型(SD)和元胞自动机(CA)模型以提高模型的适用性,可以减少误差传递的发生,并能有效处理非线性关系^[22-23]。主要的计算步骤如下:

基于神经网络的适宜性概率计算模块计算公式为:

$$\begin{aligned} sp(p, k, t) &= \sum_j \omega_{j,k} \times \text{sigmoid}(\text{net}_j(p, t)) \\ &= \sum_j \omega_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $sp(p, k, t)$ 为 k 类型用地在时间 t 、栅格 p 下的适宜性概率; $\omega_{j,k}$ 是输出层与隐藏层之间的权重; $\text{sigmoid}()$ 是隐藏层到输出层的激励函数; $\text{net}_j(p, t)$ 表示第 j 个隐藏层栅格 p 在时间 t 上所接到的信号。

基于自适应惯性机制的元胞自动机模块:

FLUS 模型中,最终的土地之间的转化概率不仅取决于上述神经网络输出的分布概率,还受到邻域密度、惯性系数、转换成本、以及土地之间的竞争所影响。自适应惯性系数是该机制的重要内容,根据各种土地类型与需求数量之间的差距决定各自的惯性系数并在迭代中自适应调整,使得各类用地的数量在模拟过程中向目标数量逐渐接近^[24],其公式为:

$$\text{Intertia}_k^t = \begin{cases} \text{Interia}_k^{t-1}, & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ \text{Interia}_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}}, & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ \text{Interia}_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}}, & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Interia_k^t 表示第 k 种用地在代时间 t 上的惯性系数; D_k^{t-1} 、 D_k^{t-2} 分别表示上一次、上两次迭代时第 k 种土地利用类型的栅格数量与需求量之间的差距。

在 FLUS 模型的验证方面主要参考 OA, ROC

及 Kappa 等 3 个参数,值越接近 1,模拟准确度越高。

2.2.2 驱动因子选取及回归分析 土地利用类型发生转化与驱动因子有着密切的关系,因此在选取驱动因子时要尽量可能地选取与研究区域关联密切的因素。本文通过阅读相关文献再结合研究区的实际情况根据

数据的可获取性和一致性、驱动因子的可量化性、地域分异性等原则^[25]共选取区位、自然、社会经济 3 个方面的因素,共有 8 个驱动因子,具体见表 1。

为了检验选取的驱动因子对种土地利用类型变化相关性,进行 Logistic 回归分析(表 2):

表 1 万州区驱动因子选择及含义

因素类型	驱动因子名称	含义
区位因素	距公路的距离	各栅格单元到最近公路的欧式距离
	距铁路的距离	各栅格单元到最近铁路的欧式距离
	距河流水库的距离	各栅格单元到最近河流水库的欧式距离
自然因素	高程	各栅格单元中心点的高程值
	坡度	各栅格单元中心点的坡度值
	坡向	各栅格单元坡面法线在水平方向上的投影的方向
社会经济因素	人口密度	各栅格单元中心点的人口密度
	GDP	各栅格单元中心点的 GDP

表 2 Logistic 回归分析结果

项目	耕地	园地	林地	草地	建设用地	水域	其他土地
距公路的距离	-0.00002	0.00001	0.00001	0.00016	0.00003	0.000019	0.0001
距铁路的距离	0.00011	-0.00009	-0.00014	0.00018	0.00002	0.00004	0.00007
距河流水库的距离	0.00009	0.00003	0.00001	0.0003	0.00015	-0.00014	0.00008
高程	-0.00388	-0.00207	-0.00111	-0.00503	-0.00147	-0.00566	-0.00175
坡度	0.04652	0.02368	-0.02039	-0.02164	-0.03485	-0.03569	-0.03416
坡向	-0.00076	0.00126	0.00326	0.00108	—	-0.00294	-0.00069
人口密度	0.00053	0.00009	0.0012	0.00079	0.0008	-0.00023	0.00016
GDP	0.00048	0.00011	0.00086	0.00006	0.00095	-0.00053	0.00006
常数	-4.58964	-3.21568	-0.86452	-1.75646	-1.10912	-0.67725	-5.82924
ROC	0.734	0.773	0.836	0.901	0.824	0.912	0.72

由表 2 看出本文中各种地类的 ROC 检验值均大于 0.7,说明选择的上述驱动因子能够描述研究区的土地利用变化情况。

2.2.3 转换规则 转换规则表示土地利用类型之间型转换的难易程度,它是土地类型发生变化的重要因素。根据研究区的土地利用动态实际情况和阅读参考相关文献^[26],设定所有土地利用类型之间均可以相互转化。

2.2.4 土地利用变化邻域因子设置 在 FLUS 软件中,经过多次调试及验证,得到模拟精度较高时的邻域因子参数(表 3),参数范围为 0~1,因子值越接近 1 表示该土地类型的扩张能力越弱,越不容易转化为其他类型土地^[27]。

表 3 万州区土地利用变化邻域因子参数

土地利用类型	耕地	园地	林地	草地	建设用地	水域	其他土地
邻域因子	0.6	0.3	0.9	0.25	0.95	0.8	0.2

2.3 生态系统服务价值系数优化

参考相关学者^[4,18-19]的研究确定的生态服务价值系数并根据重庆市万州区的实际情况和咨询相关学者的建议,建立适合研究区的生态系统服务价值系数体系(表 4)。其中耕地直接采用朱康文对重庆市两江新区的价值系数为 6 203 元/hm²;园地的价值系数根据相关研究及专家意见定为 7 143 元/hm²;万州区作为重要的生态涵养保护区,林地生态系统中有更大的作用,因此林地价值系数在参考谢高地等^[18]的基础上增加 20%为 23 538 元/hm²;草地的生态价值系数参考张凤太等^[19]对重庆主城区和朱康文等^[4]对重庆两江新区的研究取平均值 4 261.5 元/hm²;Costanza 等^[17]、谢高地等^[18]等将城镇和工矿用地生态价值系数确定为 0,而朱康文等^[4]在张凤太等^[19]等的基础上没 hm²降低 8%,根据专家意见结合研究区的实际情况本研究取对重庆主城区和两江新区研究的平均值为-5 586 元/hm²;万州区水系分布众多,水域系数根据专家意见在朱康文等^[4]的基础上增

加 5%为 6 090 元/hm²;其他土地综合参考几位学者的研究确定为 876.5 元/hm²。

表 4 生态系统服务价值系数 元/hm ²	
土地利用类型	万州区
耕地	6203
园地	7143
林地	23538
草地	4261.5
建设用地	—5586
水域	6090
其他土地	876.5

生态系统服务价值计算公式^[28]为:

$$V=\sum_i^7A_i\times C_{v,i}$$
 (4)

式中:V 表示区域生态系统服务的评估总价值;A_i 表示第 i 种土地利用类型的面积;C_{v,i} 含义表示第 i 种土地利用类型的生态系统服务价值系数。

2.4 生态价值敏感度

生态价值敏感度(C_s)表示生态系统服务总价值对价值系数的依赖程度。如果 C_s>1 表示该系统服务价值富于弹性;C_s<1 表示生态系统服务价值缺乏弹性^[29]。计算公式:

$$C_s=\left|\frac{(V_g-V_f)/V_f}{(C_{v,g}-C_{v,f})/C_{v,f}}\right|$$
 (5)

式中:V 表示估算的生态系统总服务价值,单位为元;C_v表示生态服务价值系数;f 和 g 分别表示在价值系数调整前后生态系统服务价值情况。

2.5 生态价值变化度

生态价值变化度(R_c)反映某类土地利用面积的增加或减少引起的生态系统总服务价值的变化状况。如果 R_c>1 时表明某类土地利用面积的变化对生态系统总服务价值影响明显,如果 R_c<1 时表明某类土地利用面积的变化对生态系统总服务价值影响不明显^[29]。计算公式:

$$R_c=\left|\frac{(V_g-V_f)/V_f}{(A_g-A_f)/A_f}\right|$$
 (6)

式中:A 为某土地利用类型的面积。

3 结果与分析

3.1 土地利用结构变化分析

基于 ArcGIS 软件分析 2009 年和 2017 年两期的土地利用数据量,得到各种地类的土地利用情况(表 5)。

表 5 2009 年和 2017 年各类土地利用面积及所占比例				
土地利用类型	2009 年		2017 年	
	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%
耕地	122406.83	35.41	121185.75	35.06
园地	11533.16	3.34	11259.84	3.26
林地	137419.76	39.76	137393.27	39.75
草地	28256.86	8.17	28144.64	8.14
建设用地	29535.54	8.54	31384.71	9.08
水域	15697.46	4.54	15449.84	4.47
其他土地	804.95	0.23	836.49	0.24
总计	345654.55	100.00	345654.55	100.00

由表 5 可知在在研究区的现状中耕地和林地占主体地位,在两期的土地利用现状中耕地和林地分别占 35.41%,39.76%和 35.06%和 39.75,在此期间耕地减少了 1 221.08 hm²,园地减少了 273.32 hm²,建设用地增加了 1 849.17 hm²,林地、草地及水域也呈现出小幅度的减少态势,而其他土地则呈现小幅度的增加趋势。耕地的减少和建设用地的大幅度增加体现出人口不断增长、城镇化水平不断提高、经济不断发展尤其是万州作为三峡工程移民地区背景下的发展需要,而园地、林地、草地及水域等的小幅度变动反映出万州区作为重庆市的重要生态保护区要维护其生态稳定的战略方针。

3.2 土地利用需求预测

3.2.1 构建土地利用变化转移矩阵 根据研究区 2009 年和 2017 年两期的地类数据,以两期的现状矢量图为底图,利用 ArcGIS 软件首先对属性表中各地类字段合并在一起,采用 Analysis Tools 工具对合并以后的数据进行空间叠加分析,打开叠加后结果中的 dbf 格式文件导入到 Excel 表格中通过计算得出 2009—2017 年万州区的各地类的转移概率矩阵(见表 6)。

表 6 万州区土地利用类型转移概率矩阵							
土地利用类型	耕地	园地	林地	草地	建设用地	水域	其他土地
耕地	0.9792	0	0	0.0002	0.0196	0	0.0009
园地	0.0001	0.9809	0	0.0038	0.015	0.0001	0.0001
林地	0	0	0.9972	0.0001	0.0026	0	0
草地	0.0018	0	0	0.9961	0.002	0	0.0001
建设用地	0.0207	0	0	0.0002	0.9786	0	0.0005
水域	0	0	0	0	0.0118	0.9881	0.0001
其他土地	0.0066	0	0.0005	0.0002	0.0013	0	0.9914

3.2.2 土地利用需求 借助表 6 求得的矩阵,以 2009 年的土地利用类型数据为基础数据,运用马尔科夫链预测得出万州区 2017 年和 2025 年耕地、园地、林地等 7 种土地的数量。

其中在设定的自然发展情境下,主要根据历史发

展趋势进行发展;在生态保护情境下,是在自然发展的情境下设定园地、林地两种土地利用类型向建设用地转化的数量减少 20%,水域向建设用地转化的数量减少 25%,同时加入生态保护区的限制因素。具体数量见表 7。

表 7 万州区 2017 年、2025 年土地需求量预测 hm²

土地利用类型	耕地	园地	林地	草地	建设用地	水域	其他土地
2009 年	122406.83	11533.16	137419.76	28256.86	29535.54	15697.46	804.95
2017 年实际	121185.75	11259.84	137393.27	28144.64	31384.71	15449.84	836.49
2017 年预测	120713.67	11253.60	137428.20	28128.60	31370.40	15491.34	819.00
2025 年自然发展	119897.73	10958.31	137401.20	28000.26	33304.68	15218.37	873.90
2025 年生态保护	119917.62	11195.01	137735.46	28147.05	32478.12	15590.88	590.31

3.3 生态红线保护区

根据万州区生态红线的划定成果,将生态红线范围内的区域作为生态红线约束下限制发展的区域(下图中表示为 0 的区域),主要包括自然保护区、部分风景名胜区、重点生态功能区、水土流失敏感区、饮用水水源保护区、三峡水库消落区、森林公园以及生态公益林等,主要布局在西部的响水镇、甘宁镇,中北部的新田镇、茨竹乡、九池乡,北部的高梁镇、天城镇等和东部的长滩镇、龙驹镇、梨树乡以及地宝土家族乡。在生态保护情境下将该数据作为限制条件输入模型中。进行标准化处理过的生态红线保护区数据见图 2。

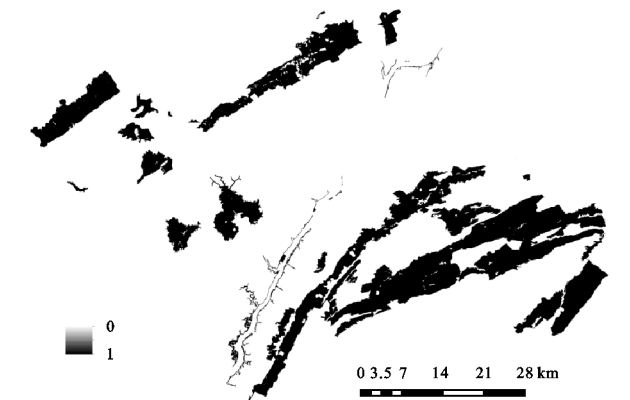


图 2 万州区生态红线保护区

3.4 FLUS 模型的情景模拟分析

本研究先将研究区 2009 年土地数据作为基期初始数据,将驱动因子结果进行标准化处理,归一化到 [0,1],设置神经网络训练的采样比例为 20,占研究区有效采样数的百分之二,神经网络的隐藏层数设置为 12。运行软件得到 2009 年土地利用适宜性概率图集,其中均方根误差 RMSE=0.23,说明数据训练结果可信。在 FLUS 软件的基于自适应惯性机制的元胞自动机模(CA)模块中导入 2009 年土地利用类型栅格图,加载适宜性概率图集,不加任何限制性因素,输入土地利用变化邻域因子参数,最后设置模型参数,运行软件得到 2017 年研究区自然发展模式下

预测的现状栅格图并与 2017 年万州区实际现状图对比(图 3)。之后借助软件的 Precision Validation 模块,加载 2017 年的真实与预测的结果进行对比验证,得出应用总体精度(OA)、FOM 指数及 Kappa 指数。OA 和 Kappa 值通常介于 0~1,数值越接近 1,模型的,仿真精度越高。当 Kappa 大于或等于 0.75 时,模型的仿真精度较高。当 Kappa 值在 0.5~0.75 时,模型的仿真精度一般,其中 FOM 指数大小受模拟年数影响,每模拟年数增加一年,FOM 指数增加不大于 0.01为标准水平。对比万州区 2017 年现状和预测图,两张图基本一样,验证精度的指数见表 7。由精度验证结果 OA 值为 0.906 2 大于 0.8 且 Kappa 为 0.843 7 大于 0.75,FOM 值处于标准水平,说明 FLUS 模型可用于万州区土地利用变化模拟^[30]。然后根据表 8 求得的 2025 年不同情景下的土地需求数量,以 2017 年的土地利用现状为初始状态,模拟 2025 年两种情景模式下的土地利用类型空间分布状况。结果见图 4。

根据模拟结果,在自然发展情景下,耕地、园地、草地和水域面积都有不同幅度的减少,其中耕地面积减少最多为 1 288.02 hm²,园地、草地、水域分别减少 301.53 hm²,144.38 hm²,231.17 hm²,建设用地、其他土地、林地的面积有所增加,其中建设用地面积增加幅度最大为 1 919.97 hm²,其他土地和林地只有小幅度的增加。这是由于在自然的发展情境下,随着社会经济的发展和人口的增长,建设用地势必会不断的扩张来占用其他土地类型的面积,主要呈现为在研究区中部沿长江两岸地区的城镇区域建设用地向四周蔓延,主要是由于研究区地势起伏大,山地丘陵较多,建设用地的发

展只能沿长江两岸一些地势缓和的区域蔓延发展。其余土地利用情况除其他土地数量增长以外,园地、林地、草地和水域都有小幅度的减少,是区域土地利用变化的特征现象。在生态保护情境下,耕地、园地、其他土地的面积有所减小,其中耕地

面积减小幅度最大为 1 268.13 hm²,园地和其他土地减少分别为 64.83 hm²,246.18 hm²,其他土地类型的面积都有所增加,其中建设用地增加最多为 1 093.41 hm²,林地、草地、和水域分别增加 342.19 hm²,2.41 hm²,141.04 hm²。这是由于在生态保护情景下,加入了生态红线保护区限制了林地向其他用地类型的转化,增加了林地的稳定性。同时林地、园地、水域用地较自然情

形面积有一定的增加,林地增加面积最大主要分布在东南和西北的密林地区,同时建设用地的的发展得到了较好的限制,其他用地和草地依然有较小幅度的减少趋势,在该情景下的模拟结果与研究区作为主要生态涵养区和保护区的宏观战略相贴合。总体来说两种情境下的用地变化情况符合重庆地区的发展趋势,对研究区未来的土地利用规划有一定的参考价值。

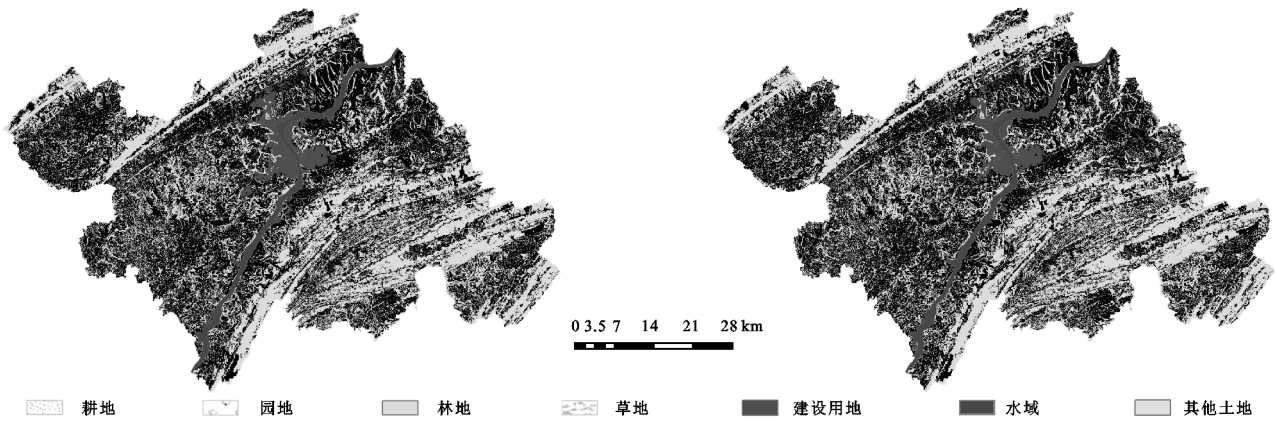


图 3 万州区 2017 年土地现状及模拟结果

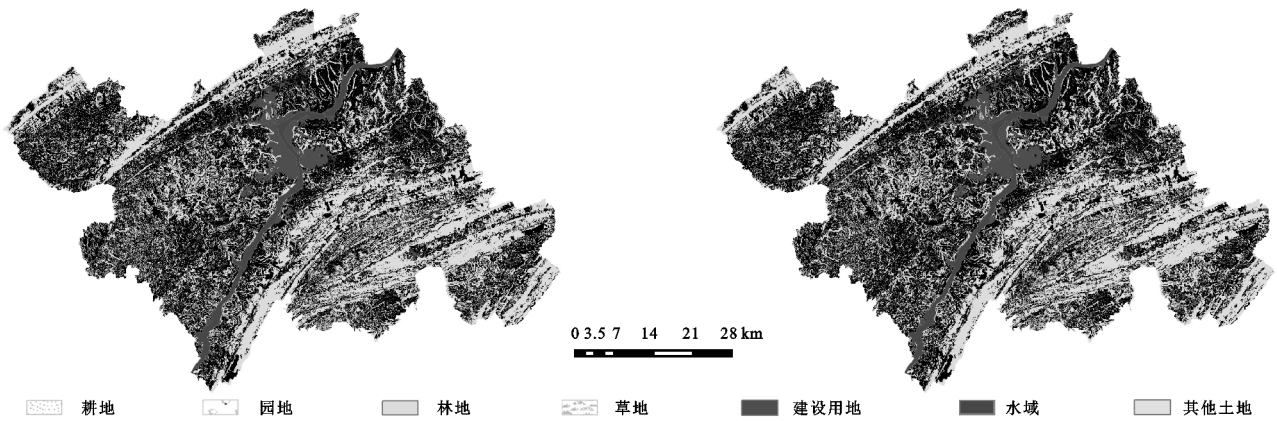


图 4 万州区土地利用变化情景模拟结果

3.5 生态系统服务价值分析

通过计算(表 8)2017 年万州区的生态系统服务总价值约为 41.06 亿元,2025 年设定的两种情景下的总价值有所减少,分别为 40.83 亿元、41.00 亿元。两种情景中耕地和园地的生态服务价值又有所下降原因是城镇的发展、新增建设用地要占用一定的耕地和园地;林地的生态服务价值有所增加在生态保护情景中增加的价值比自然保护情景多 0.079 亿元,说明林地生态保护方面有着更重要的作用;草地在自然增长情景呈现生态服务价值下降的趋势在生态保护情境下增加了 0.006 亿元,说明草地在生态保护系统中也具有重要的生态价值;建设用地在两种情景中都表现出负向价值,在自然增长情境中的负向价值更大比生态保护情景多了 0.046 亿元,这是由于在生态保护情境下生态红线划定的生态红线保护区域在一定程度上限制了建设用地的的发展,有利于经济的可持续发展;水域在

生态保护情境中生态服务价值多了 0.009 亿元,呈现出增加的趋势。生态红线划定下生态保护情景生态的总价值比自然保护情景下多了 0.169 亿元说明此种情景下生态红线的划定增加了生态系统的的服务总价值,对研究衡量生态红线的划定价值意义重大。

表 8 万州区生态系统服务价值 亿元

土地利用类型	2017 年现状	自然增长情景	生态保护情景
耕地	7.517152	7.437256	7.438490
园地	0.804290	0.782752	0.799660
林地	32.339628	32.341494	32.420173
草地	1.199384	1.193231	1.199487
建设用地	-1.753150	-1.860399	-1.814228
水域	0.940895	0.926799	0.949485
其他土地	0.007332	0.007660	0.005174
合计	41.055531	40.828793	40.998240

3.6 生态价值敏感度分析

根据表 4 中确定的价值系数,分别增加和减少 5%来

计算总价值,计算出敏感性值结果见表 9。7 种土地的值都小于 1 且林地的值最高其他土地的值最低,根据敏感性数值可以得出万州区的生态系统服务价值对价值系数的变化缺乏弹性。根据王亚娟等^[31]对宁夏彭阳县的研究得出的结论绝大多数地区的价值系数的变化对地区的生态系统服务的总价值影响较小,说明结果准确。

表 9 万州区生价值敏感度

土地利用 类型	价值系数 变化幅度/%	总服务价值/10 ⁸ 元			敏感性指数		
		2017 年	自然增长情景	生态保护情景	2017 年	自然增长情景	生态保护情景
耕地	+5	41.4314	41.2007	41.3702	0.1831	0.1822	0.1815
	-5	40.6797	40.4569	40.6263			
园地	+5	41.0957	40.8679	41.0382	0.0196	0.0192	0.0194
	-5	41.0153	40.7897	40.9583			
林地	+5	42.6725	42.4459	42.6192	0.7877	0.7921	0.7908
	-5	39.4386	39.2117	39.3772			
草地	+5	41.1155	40.8884	41.0582	0.0292	0.0292	0.0293
	-5	40.9956	40.7691	40.9383			
建设用地	+5	40.9679	40.7358	40.9075	0.0427	0.0456	0.443
	-5	41.1432	40.9218	41.0889			
水域	+5	41.1026	40.8751	41.0457	0.0229	0.0227	0.0231
	-5	41.0085	40.7825	40.9982			
其他土地	+5	41.0559	40.8292	40.9985	0.0002	0.0002	0.0001
	-5	41.0552	40.8284	40.9979			

3.7 生态价值变化度分析

以 2017 年各种土地利用类型的面积为基础,通过增加 5%和减少 5%来重新计算各种土地地类的面积,并计算出生态系统服务总价值来分析生态系统服务价值对地类面积的敏感性(表 10)。由表格中的结算结果可以看出来只有林地的价值变化度接近于 2.0,说明在万州区林地的面积变化对于生态系统服务价值的影响最为显著,其中园地、耕地和水域的价值变化度大于 0.5 说明这 3 种土地利用类型的面积变化对于生态系统服务价值有一定的影响,其余的土

地类型的影响较小。所以政府部门在制定相关规划时可以考虑通过增加水域用地和林地的比例来提高区域的生态环境质量。万州区作为重庆乃至全国重要的生态保护和生态脆弱区,林地面积较大,在土地利用中占有重要的比例,而生态保护红线的划定可以有效地巩固和加强林地等增强生态系统服务价值地类的面积,对于保护生态功能和生态敏感区具有重要的意义。因此政府等决策部门应该加强对生态空间的保护,严格限制划定的生态红线内的区域的开发,构建良好的生态环境,实现社会经济的可持续、健康发展。

表 10 万州区生态价值变化度

土地利用 类型	土地利用类型 面积化幅度/%	总服务价值/10 ⁸ 元			生态价值变化度		
		2017 年	自然增长情景	生态保护情景	2017 年	自然增长情景	生态保护情景
耕地	+5	42.1276	41.9008	42.0703	0.5222	0.5251	0.5230
	-5	39.9835	39.7567	39.9262			
园地	+5	42.2900	42.0633	42.2327	0.6014	0.6047	0.6022
	-5	39.8210	39.5943	39.7637			
林地	+5	45.1235	44.8968	45.0662	1.9817	1.9927	1.9845
	-5	36.9875	36.7608	36.9302			
草地	+5	41.7920	41.5653	41.7347	0.3588	0.3608	0.3593
	-5	40.3190	40.0923	40.2617			
建设用地	+5	40.0901	39.8634	40.0328	0.4703	0.4729	0.471
	-5	42.0209	41.7942	41.9637			
水域	+5	42.1080	41.8813	42.0508	0.5128	0.5156	0.5134
	-5	40.0030	39.7763	39.9457			
其他土地	+5	41.2070	40.9803	41.1497	0.0738	0.0742	0.0739
	-5	40.9040	40.6773	40.8468			

4 结论

(1) 文中选取的区位、自然、社会经济 3 个方面的 8 个驱动因子通过 Logistic 回归分析经 ROC 的值均大于 0.7,表明选取的驱动因子可靠;利用 Markov 模型预测 2025 年万州区地类数量,并对 2017 年的用地情况进行模拟,模拟后验证 OA 值大于 0.9 且检测值 Kappa 值大于 0.8 表明利用 FLUS 模型对研究区的土地利用模拟效果较好,对相似的研究有一定的参考价值。

(2) 通过生态系统服务价值评估万州区 2017 年现状、20205 年自然发展情景和 2025 年生态保护情景下生态系统服务总价值分变为 41.06 亿元、40.83 亿元和 41.00 亿元,在 2025 年的生态保护情境下的生态系统服务价值高于自然发展情景,说明生态红线的划定有利于保证生态系统服务总价值,在一定程度上减缓了社会经济发展带来的生态方面的影响,对于维护整个区域的生态安全有重要的作用。

(3) 通过对未来土地利用的两种情景模拟,结果表明在生态保护情景下生态红线的划定可以在一定程度上限制建设用地的扩张,同时也约束了新增建设用地不能在红线以内发展,对于区域的生态保护有重要的作用。

(4) 通过对研究区的生态敏感度分析,不同土地利用类型的价值系数的变化对于生态系统服务总价值产生的影响较小;通过对研究区的生态变化度分析,林地的面积变化对生态系统服务总价值的影响最大,园地、耕地和水域的面积的的变化对生态系统服务总价也有一定的影响。根据结果虽然林地在万州区的地类面积中占有最大的比例,但因为其对于生态系统的重要性不能放松对林地的保护。

(5) 总体来说,在生态红线划定之后对生态系统有良好的保护作用,整体上提高了生态系统的服务总价值,符合现在生态文明建设的理念和要求,在区域建设用地的规划和布局上也更加合理,对于区域的持续健康发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 高吉喜.国家生态保护红线体系建设构想[J].环境保护,2014,42(S):18-21.
- [2] Lu W H, Liu J, Xiang X Q, et al. A comparison of marine spatial planning approaches in China: Marine functional zoning and the marine ecological red line [J]. Marine Policy, 2015,62:94-101.
- [3] 燕守广,高吉喜.底线意识:生态红线怎么守[J].中华环境,2014(6):26-27.
- [4] 朱康文,雷波,李月臣,等.生态红线保护下的两江新区土地利用/覆盖情景模拟及生态价值评估[J].环境科学

研究,2017,30(11):1801-1812.

- [5] 李志明,宋戈,鲁帅,等.基于 CA-Markov 模型的哈尔滨市土地利用变化预测研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):41-48.
- [6] Valbuena D, Verburg P H, Bregt A K, et al. An agent-based approach to model land-use change at a regional scale[J]. Landscape Ecology, 2010,25(2):185-199.
- [7] 黄明,张学霞,张建军,等.基于 CLUE-S 模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J].资源科学,2012,34(4):769-776.
- [8] Ganzeveld L N, Bouwman L. The impact of future land use and land cover changes on atmospheric chemistry-climate interactions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010,115(23):D23301.
- [9] Li S H, Jin B X, Wei X Y, et al. Using CA-Markov model to model the spatiotemporal change of land use/cover in Fuxian Lake for decision support[J]. Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015,2(4):163-168.
- [10] 陈学,朱康文,雷波.基于 CA-Markov 模型的土地利用覆盖变化模拟[J].环境影响评价,2016,38(4):61-65.
- [11] 何春阳,史培军,陈晋,等.基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J].中国科学 D 辑:地球科学,2005,35(5):464-473.
- [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.
- [13] 梁友嘉,徐中民,钟方雷.基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J].地理研究,2011,30(3):564-576.
- [14] 黎夏,李丹,刘小平,等.地理模拟优化系统 GeoSOS 软件构建与应用[J].中山大学学报:自然科学版,2010,49(4):1-5,15.
- [15] 黎夏,李丹,刘小平.地理模拟优化系统(GeoSOS)及其在地理国情分析中的应用[J].测绘学报,2017,46(10):1598-1608.
- [16] 李少英,刘小平,黎夏,等.土地利变化模拟模型及应用研究进展[J].遥感学报,2017,21(3):329-340.
- [17] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014,26:152-158.
- [18] 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):189-195.
- [19] 张凤太,苏维词,赵卫权.基于土地利用/覆被变化的重庆城市生态系统服务价值研究[J].生态与农村环境学报,2008,24(3):21-25.
- [20] 陈益佳,廖铁军.生态脆弱区土地利用变化研究:基于重庆市万州区的分析[J].国土与自然资源研究,2018(2):26-29.

- [19] 《龙门山生态文明建设试验区》课题组,杜肯堂,邓玲,等.在灾后重建中创设“龙门山生态文明建设试验区”的建议[J].天府新论,2009(3):5-9.
- [20] 李勇,孙爱珍.龙门山造山带构造地层学研究[J].地层学杂志,2000,24(3):201-206.
- [21] 陈盼盼.龙门山地区人类活动生态胁迫评价系统研建[D].四川绵阳:绵阳师范学院,2017,04:11-13.
- [22] 包维楷,庞学勇.四川汶川大地震重灾区灾后生态退化及其基本特点[J].应用与环境生物学报,2008,14(4):441-444.
- [23] 国家发展和改革委员会价格司.全国农产品成本收益汇编(2016)[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [24] 四川省统计局.《四川统计年鉴》[EB/OL]. <http://tjj.sc.gov.cn/tjcbw/tjnj/>,2019.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Costanza R, d'Arge R, de Groot R S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(15):253-260.
- [28] Costanza R, Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014,26:152-158.
- [29] Wang W J, Guo H C, Chuai X W, et al. The impact of land use change on the temporospatial variations of ecosystems services value in China and an optimized land use solution [J]. Environmental Science & Policy, 2014,44:62-72.
- [30] 马依拉·热合曼,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,等.基于遥感与GIS的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究[J].生态学报,2018,38(16):5938-5951.
- [31] 李涛,甘德欣,杨知建,等.土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变[J].应用生态学报,2016,27(12):3787-3796.
- [32] 邓雨薇.基于土地利用变化的精河流域生态系统服务价值研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2014,5:15,35.
- [33] Zhang Z M, Gao J F, Gao Y N. The influences of land use changes on the value of ecosystem services in Chaohu Lake Basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(1):385-395.
- [34] 杨锁华,胡守庚,瞿诗进.1990—2014 年长江中游经济带生态系统服务价值时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(3):164-169.
- [35] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.

(上接第 357 页)

- [21] 陈彦光.基于 Matlab 的地理数据分析[M].北京:北京高等教育出版社,2012:309-310.
- [22] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automatafor simulating multiple land use changes using GIS[J]. Inter-National Journal of Geographical Information Science, 2002,16(4):323-343.
- [23] Li X, Chen Y, Liu X, et al. Concepts, methodologies, and tools of an integrated geographical simulation and optimization system[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2011,25(4):633-655.
- [24] Li X, Li D, Liu X, et al. Geographical simulation and optimization system (GeoSOS) and its cutting-edge researches [J]. Advances in Earth Science, 2009,24(8):899-907.
- [25] 谢莹,匡鸿海,吴晶晶,等.基于 CLUE-S 模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟[J].长江流域资源与环境,2016,25(11):1729-1737.
- [26] 李国珍.基于 FLUS 模型的深圳市土地利用变化与模拟研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [27] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.
- [28] Zeng J, Li J F, Yao X W. [Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration][J]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao=the Journal of Applied Ecology/Zhongguo Sheng Tai Xue Xue Hui, Zhongguo Ke Xue Yuan Shenyang Ying Yong Sheng Tai Yan Jiu Suo Zhu Ban, 2014,25(3):883-891.
- [29] Radford K G, James P. Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient: A case study of Greater Manchester, UK[J]. Landscape and Urban Planning, 2013,109(1):117-127.
- [30] 彭云飞.基于 FLUS 模型的大都市区土地利用优化模拟:以深圳市为例[J].山东国土资源,2019,35(8):70-74.
- [31] 王亚娟,刘小鹏,关文超.山区土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析:以宁夏彭阳县为例[J].生态经济,2010,26(5):146-149.