

基于 CA-Markov 模型的乌江下游地区 土地利用变化情景分析

吴晶晶¹, 田永中^{1,2}, 许文轩¹, 肖悦¹, 谢莹¹, 程玉丝¹

(1. 岩溶环境重庆市重点实验室, 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆稻田科技有限公司, 重庆 400700)

摘要:以乌江下游的涪陵等6个区县为研究区,基于1995年、2005年、2015年的Landsat影像解译数据,综合运用GIS空间分析技术、CA-Markov模型和MCE模型,实现研究区土地利用时空格局模拟。结合情景分析方法,探讨在“快速城镇化情景”、“现状延续情景”和“生态保护情景”三种模式下研究区2020年、2035年、2050年的土地利用格局。结果表明:(1)在“快速城镇化情景”下,建设用地急剧扩张,35年间其面积增加了一倍,达到1 390.46 km²,且主要来源为耕地,约占转出耕地面积的一半;林地增长十分缓慢,草地和未利用地持续减少,到2050年分别减少了186.58 km²和69.40 km²,未利用地减少了一半。(2)在“现状延续情景”下,建设用地增长仍然较快,2050年增加了347.92 km²,增幅达37.92%;耕地减幅有所下降,林地增加也比“快速城镇化情景”要快,但草地和未利用地仍在持续减少,35年间分别减少了25.9%和44.3%。(3)在“生态保护情景”下,林地、草地、未利用地等生态用地不断恢复和增加,到2050年,生态用地总面积占研究区的64%;建设用地无序扩张得到限制,到2050年其总面积为1 171.42 km²,比同期“快速城镇化情景”减少了219.04 km²;耕地虽有减少,但逐渐趋于平衡,始终保持在6 000 km²以上。因此,“生态保护情景”是研究区未来经济、社会和环境协调发展较为理想的模式。研究结果可为该地区土地规划、区域可持续发展提供科学参考。

关键词:土地利用/覆被变化; CA-Markov模型; MCE模型; 情景分析; 乌江下游地区

中图分类号: F301.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0133-07

Scenario Analysis of Land Use Change in the Lower Reaches of Wujiang River Based on CA-Markov Model

WU Jingjing¹, TIAN Yongzhong^{1,2}, XU Wenxuan¹, XIAO Yue¹, XIE Ying¹, CHENG Yusi¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Daotian Science and Technology Limited Company, Chongqing 400700, China)

Abstract: Based on interpretation data of Landsat images in 1995, 2005 and 2015, we carried out the simulation on spatiotemporal patterns of land use by integrating GIS spatial analysis technique, CA-Markov model and MCE model, and taking the lower reaches of Wujiang River as the study area, such as Fuling district and so on. With the method of scenario analysis, the land use patterns of 2020, 2035 and 2050 in the study area were discussed under such three scenarios as ‘rapid urbanization scenario’, ‘status quo continuation scenario’ and ‘ecological protection scenario’. The results show that: (1) in the rapid urbanization scenario, the construction land has expanded sharply, doubling its area in 35 years to 1 390.46 km², and the main source is cultivated land, accounting for about half of the area of cultivated land transfer; forestland grows slowly, grassland and unused land continue to decline, which will be reduced by 186.58 km² and 69.40 km², respectively, by the year of 2050, the unused land reduced by half; (2) in the status quo continuation scenario, the growth of construction land is still growing rapidly, construction land will increase by 347.92 km² in 2050, an increase rate is 37.92%; the decrease of cultivated land has damped down, and the increase of forest land is

收稿日期: 2016-12-15

修回日期: 2017-03-04

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“基于遥感—过程耦合模型的岩溶石漠化植被恢复区碳收支及其时空格局特征研究——以重庆为例”(41201436)

第一作者: 吴晶晶(1989—), 男, 安徽安庆人, 硕士, 主要从事地图制图技术和土地信息系统研究。E-mail: wdj1989@email.swu.edu.cn

通信作者: 田永中(1971—), 男, 重庆铜梁人, 副教授, 主要从事地理信息、遥感与土地利用规划研究。E-mail: tyzlf@swu.edu.cn

faster than that of rapid urbanization scenario, but the grassland and unused land continue to decrease, which will be reduced by 25.9% and 44.3% during 35 years; (3) in the ecological protection scenario, the ecological land, such as forestland, grassland, unused land and so on, continue to recover and increase, by the year of 2050, the total area of ecological land will account for 64% of the study area; the construction land sprawl is limited, and its total area will be 1 171.42 km² by the year of 2050, and will be reduced by 219.04 km² compared with the same period rapid urbanization scenario; although the reduction of arable land, it gradually tends to balance, and always remains above 6 000 km². Therefore, the ecological protection scenario is an ideal model for the coordinated development of economy, society and environment in the future. The results can provide scientific reference for land planning and regional sustainable development in this area.

Keywords: LUCC; CA-Markov model; MCE model; scenario analysis; the lower reaches of Wujiang River

土地系统是地球陆地系统最重要的组成部分,也是人类—环境关系的纽带和桥梁,对于理解和弄清人类—环境复杂关系具有重要作用^[1]。土地利用/覆被变化(LUCC)模型是土地系统科学研究的重要组成部分,是分析土地利用原因、过程与结果,认识土地利用系统变化、生态环境效应、支持土地利用规划和政策的有力工具^[2-3]。自1995年IGBP与IHDP联合推出了LUCC研究计划之后,国内外相关学者根据实际需要和自身学科背景构建了众多LUCC模型,对土地利用变化的驱动力与驱动机制^[4-7]、时空格局演变^[8-10]、情景模拟与分析^[11-14]等进行了有益的探索和实践,并取得了丰硕的成果。

近年来,CA-Markov模型越来越受到众多学者的关注,如Nourqolipour等^[15]利用CA-Markov模型模拟了马来西亚Kuala Langat地区油棕种植园土地利用时空格局变化,并成功预测了该地区2020年土地利用演变趋势;Tong等^[16]在CA-Markov模型基础上引入人口变量进行改进,实现了不同流域尺度上土地利用格局模拟;李志等^[17]利用CA-Markov模型分析了黄土高原沟壑区黑河流域1985—2000年土地利用变化的趋势、速度、类型及其与地形的关系,并模拟了2015年土地利用情景;刘耀彬等^[18]通过构建CA-Markov-logistic模型模拟环鄱阳湖区分区2015年土地利用格局情景,并采用景观格局指数进一步分析了该地区土地利用景观格局变化趋势。

然而,这些研究大多是基于过去和现在数据对未来土地利用变化的一种预测,而不是通过具体情景设置得到未来情景下LUCC的数量特征和空间格局。因此,本文以乌江下游地区为研究区域,尝试综合CA-Markov模型、多准则评价(MCE)和情景分析法探讨区域土地利用时空格局演变和未来情景发展态势,力图为区域土地利用规划和决策、生态环境保护 and 可持续发展提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌江是长江上游的一级支流,发源于贵州省威宁县,流经黔北及渝东南,在重庆市涪陵区注入长江,干流全长1 037 km,支流众多,呈羽状水系分布,流域总面积8.79万km²。流域地势西南高,东北低,地势落差大,自然景观垂直变化显著。从沿河县城到涪陵河口为乌江下游,长243 km,此段河道河谷宽窄相间,两岸多有田地分布,农田和居民点较为集中。

本文研究区为乌江下游地区,考虑到行政区完整性,故以重庆市酉阳土家族苗族自治县、黔江区、彭水苗族土家族自治县、武隆县、南川区和涪陵区6个区县为研究对象(附图1),位于106°54′—109°19′E,28°19′—30°01′N,总面积约1.99万km²。该区地处渝东南生态保护发展区和武陵山区,喀斯特地貌广布,地势起伏较大,生态环境脆弱,经济发展落后,是国家扶贫开发连片特困地区之一;同时该区又位于三峡库区,其LUCC变化直接影响到库区的水土流失、泥沙淤积等生态环境问题。2015年该区总人口为438.49万人,其中农业人口290.61万人,占总人口的66.3%。地区GDP总和为1 566.33亿元,各区县人均GDP差距较大,其中以酉阳县最低,仅为20 908元,远低于重庆市平均水平52 321元和全国平均水平49 992元。区内土地利用类型多样,以林地、耕地为主,土地经营方式粗放,以传统种植业为主,粮食单产量低,土地利用效益不高,限制了脱贫致富。

1.2 数据来源与处理

本文研究数据主要包括遥感影像、社会经济数据和基础地理数据。遥感影像来源于中国科学院地理空间数据云平台,包括1995年、2005年Landsat-5 TM和2015年Landsat-8 OLI三期影像,每期四幅,行编号为039—040,列编号为126—127,研究区范围内遥感影像无云或有少量云。在ENVI软件中经过

几何精校正、影像拼接和裁剪等预处理之后,参考中国科学院土地利用/覆被变化分类体系,结合研究区实际,按照“耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地”6大类,对遥感影像进行目视判别和人机交互解译,分别得到三个时期遥感影像解译数据,其空间分辨率为30 m。解译精度验证通过两种方式进行:一是,在原影像上另外选取一组验证数据,通过混淆矩阵计算,得到三期解译数据 Kappa 系数分别为0.823,0.851,0.916;此外,为提高解译精度,经过野外调查,利用GPS获取实际地类样本373个,通过验证,正确率达到80%,以上表明遥感影像解译数据精度较高,真实可靠。考虑到研究区面积大小和计算机运行效率,本文曾选取30 m,60 m,90 m,120 m不同栅格大小对研究区2015年土地利用格局进行模拟,从模型运行效率、模拟精度、边界溢出等方面进行比较,发现30 m分辨率模拟精度最高,但耗时也最长,60 m次之,90 m和120 m用时较短,但精度稍显不足,故最终采用60 m分辨率用于模拟研究。

社会经济数据主要来源于《重庆统计年鉴》(1996—2015)和各区县统计年鉴(2005—2015),并在ArcGIS软件中将其与行政区数据进行空间链接,输入属性数据,通过统计、插值等操作实现空间化表达。基础地理数据包括行政区划、道路、水系、居民点等矢量数据。DEM数据也来源于地理空间数据云平台。为便于研究,将所有数据的坐标参考统一变换为UTM(通用横轴墨卡托)投影。

1.3 研究方法

本文首先运用CA-Markov模型模拟研究区2015年土地利用格局分布,并与2015年实际解译数据进行比较,然后结合多准则评价(Multi-Criteria Evaluation, MCE)和情景分析法实现对研究区三种情景下2020年、2035年、2050年土地利用格局模拟和分析。

1.3.1 CA-Markov模型 CA模型即元胞自动机(Cellular Automata, CA),是一种基于不连续的时空动力学模型,其特点是时间、空间和状态都是离散的^[19-21]。一个CA系统主要由元胞及其状态、元胞空间、元胞邻域和转换规则四部分组成。在元胞空间中,每一个细胞都有各自有限个特定状态,每一个细胞都会按照所定义的局部规则进行同步更新,这些局部规则相互作用就形成了一个动态演化系统。CA模型可用如下公式表示:

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

式中: S 为元胞空间; N 是每个元胞单元的邻域; t, t

$+1$ 表示不同的两个时刻; f 是元胞状态演化规则函数。Markov(马尔科夫)模型是基于马尔科夫过程理论而形成的预测事件发生概率的一种方法,具有无后效性特征,即当前的状态仅与前一时刻的状态有关,而与其他因素无关。在土地利用变化研究中,可以将土地利用变化过程视为Markov过程,将某一时刻的土地利用类型对应于Markov过程中的可能状态,它只与其前一时刻的土地利用类型相关,土地利用类型之间相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率^[19,21]。因此,可用如下公式对土地利用状态进行预测:

$$S(T) = P_{ij} \times S(T_0) \quad (2)$$

式中: $S(T), S(T_0)$ 分别为 T, T_0 时刻的土地利用状态; P_{ij} 为土地利用变化状态转移概率矩阵,可由如下公式表示:

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

($0 \leq P_{ij} < 1$ 且 $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n; n$ 为土地利用类型))

CA模型具有强大的空间运算能力,可以有效地模拟系统的空间变化,但CA主要着眼于元胞的局部相互作用,存在局限性;Markov模型可有效模拟土地利用类型数量变化,但传统Markov模型难以预测土地利用的空间格局变化^[21]。而CA-Markov模型综合了CA模型模拟复杂系统空间变化的能力和Markov模型长期预测的优势,完善了Markov分析预测结果的空间配置,可以很好地从时间和空间上模拟土地利用的变化情况^[22]。因此,文章基于IDRISI TerrSet软件,将CA与Markov结合,进行土地利用变化模拟预测。

1.3.2 MCE模型 多准则评价(MCE)是在一些不相关、不一致的规则基础上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,它是分析决策理论的重要内容之一^[23]。其核心思想是针对不同目标制定相应的标准,通过综合分析影响目标的诸多因素来辅助决策。标准可分为约束条件和适宜因子两类。约束条件是将分析约束到特定区域,并将要素空间化处理为布尔值,标准只有“0或1”两种选择,没有中间灰色的地带。适宜因子是将影响因素标准化为0~255的连续值,进而评价区域并进行选择^[24]。在本文研究中,约束条件可与情景设置相结合,适宜因子的选择可与土地利用变化的驱动力研究相结合。

2 结果与分析

2.1 土地利用格局演变模拟

2.1.1 CA-Markov 过程与结果 以 1995 年、2005 年两期影像解译数据为基础,利用 Markov 模块生成 1995—2005 年土地利用面积转移矩阵和概率转移矩阵,结合土地利用变化驱动力、多准则评价(MCE)模块、集合生成器(Collection Editor)工具生成土地利用转移适宜性图集,将相关参数输入到 CA-Markov 模块中对 2015 年土地利用格局进行模拟。具体过程如下:

(1) 元胞及其状态。本文研究中元胞大小即栅格像元大小,考虑到研究区面积大小和模型运行效率,采用 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 像元大小,元胞状态就是其属性所对应的土地利用类型。

(2) 元胞邻域。本文采用默认的 5×5 滤波器,即一个元胞周围 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 矩形空间可对该元胞状态的改变产生显著性影响。

(3) 转移矩阵计算。在 Markov 模块中输入 1995 年和 2005 年两期影像解译数据,并将间隔时间和向前预测时间周期均设置为 10 a,比例误差设置为 0.2,即可得到 1995—2005 年土地利用转移面积矩阵和概率矩阵。

(4) 转移适宜性图集生成。转换规则是 CA 模型的核心,IDRISI 软件利用 MCE 模块生成土地利用转移适宜性图集来定义演化规则或标准,根据适宜性图集确定元胞在下一时刻的状态。如前所述,MCE 模型包括约束条件和适宜因子两部分,其因子的选择与土地利用变化驱动力有关。根据已有的研究结果^[6,15,22]、数据的可获取性以及研究目的,按照自然指标、社会指标、经济指标划分,选取高程、坡度、距水体距离、距主干道路距离、距城镇中心距离、人口密度、人均 GDP 共 7 个驱动因子,结合约束条件,利用 MCE 模块中 WLC(加权线性合并)法生成每一类型的转移适宜性图像,最后利用 Collection Editor 工具打包生成转移适宜性图像集。其中,转移适宜性图像生成遵循以下规则:

① 建设用地。其约束条件满足以下要求:现有城镇建设用地和交通用地不能转为其他用地,设置其值为 0,其他为 1;为保护水源,规定距河流、湖泊、水库等距离 100 m 内不适宜建设,设置其值为 0,其他为 1。此外,适宜因子的规则描述如下:认为高程低于 500 m 为最适宜,500~1 000 m 为适宜,大于 1 km 时适宜性减弱;坡度介于 $0^\circ \sim 6^\circ$ 为最适宜, $6^\circ \sim 15^\circ$ 为适宜,大于 15° 时适宜性减弱;距主干道路 500 m 以内为最适宜,500~1 000 m 为适宜,大于 1 km 时适

宜性减弱;距城镇距离 1 km 以内为最适宜,1~3 km 为适宜,大于 3 km 时适宜性减弱。

② 耕地。规定基本农田保护区范围内的耕地禁止转换为其他用地,设置其值为 0,其他为 1;坡度小于 6° 为最适宜, $6^\circ \sim 25^\circ$ 适宜性逐渐减弱,大于 25° 时为不适宜;距主干道 1 km 内为最适宜,1~3 km 为适宜,3 km 以外适宜性减弱;距河流、湖泊、水库等 100~1 000 m 内为最适宜,1 km 以外适宜性逐渐减弱。

③ 水域。水域作为重要的生态用地类型,规定禁止向其他地类转换。

④ 其他类型转换。林地和草地限制因素比较少,一般分布在海拔较高地区,所以高程是最主要的影响因素;未利用地规定可以任意转换。

(5) 迭代次数。CA 模型的迭代次数以 Markov 模型预测的各类型面积总量为边界条件,当迭代得到的各类型面积与 Markov 模型预测的各类型面积总量相同时结束 CA 模型的迭代,故迭代次数与向前预测时间周期一致,皆为 10 a。

通过以上参数设置,运行 CA-Markov 模块即可得到研究区 2015 年土地利用格局模拟图(附图 2)。

2.1.2 模拟结果精度验证 LUCC 模型验证的方法有很多,目前没有一个统一的方法适用于所有模型,但其验证内容无外乎 LUCC 数量变化和空间位置变化,前者是检验模型模拟的土地利用各类别数量比例和参考数据的土地利用各类别比例的一致性和相似度;而后者是评估模型模拟的土地利用各类别的空间分布和参考数据的土地利用各类别空间位置接近程度^[1]。IDRISI 软件提供了一种改进的 Kappa 系数验证方法 VALIDATE,同时兼顾了数量和空间位置的验证。因此,文章采用此方法用 2015 年实际解译数据来验证模拟结果,得到其数量精度 Kquantity 值为 0.869 5,位置精度 Klocation 值为 0.831 9,表明 CA-Markov 模型模拟结果精度较高,效果良好,能够满足研究需求。

2.2 乌江下游地区未来土地利用情景模拟与分析

2.2.1 情景方案设计 已有的研究表明^[6-7],在一定时间内自然因子难以对土地利用类型产生深刻变化,而经济发展、城市化进程、人口增长、政策导向等社会经济因素往往促使土地利用类型发生根本性改变。根据重庆市政府对“渝东南生态保护发展区”的定位要求,参考已有的情景设计^[11,13,25],结合研究区 2015 年统计年鉴数据(表 1),从经济发展、人口增长、城市化、农业商品化和粮食安全等关键因素构建三种社会经济发展情景,各情景具体指标见表 2。

表 1 2015 年各区县社会经济统计值

区县	GDP	人口自然	城镇	农业	粮食单产
	增长率/%	增长率/‰	化率/%	商品率/%	增长率/%
涪陵	15.9	5.82	63.78	66.9	0.07
南川	11.4	6.42	54.02	68.5	1.30
武隆	16	5.61	38.7	53	0.90
彭水	14	8.72	31.19	55	0.22
黔江	14.6	9.41	45.12	70.2	1.01
酉阳	14.8	9.79	29.66	57.9	1.58

表 2 乌江下游地区社会经济发展情景设计

区县	GDP 增长率/%			人口自然增长率/‰			城镇化率/%			农业商品率/%			粮食单产增长率/%		
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₁	S ₂	S ₃	S ₁	S ₂	S ₃	S ₁	S ₂	S ₃	S ₁	S ₂	S ₃
涪陵	17	13	10	6.5	5	3.5	65	63	55	70	65	60	0.15	0.05	0.02
南川	13	10	7	7	6	4.5	60	55	50	73	67	62	1.45	1.3	1.1
武隆	18	13	10	6	5	4	45	35	30	60	55	50	1.15	0.8	0.65
彭水	15	12	8	9	8	5.5	40	30	25	60	55	50	0.35	0.2	0.15
黔江	16	13	10	10	9	7	50	45	35	75	70	65	1.3	1	0.7
酉阳	16	12	9	10.5	9	7.5	35	30	25	65	57	50	1.7	1.56	1.47

注：S₁ 为快速城镇化型；S₂ 为现状延续型；S₃ 为生态保护型。

2.2.2 情景模拟结果与分析 基于三种情景下各区县关键因素指标值,利用插值方法实现指标空间化分配,结合 MCE 模块生成特定情景下土地利用转移适宜性图集,考虑到未来三种情景下土地利用变化趋势与 2015 年土地利用空间格局密切相关,故以 2015 年解译数据为基期年,分别设置 5 a、20 a、35 a 间隔,运行 CA-Markov 模块分别模拟出三种情景模式下 2020 年、2035 年和 2050 年土地利用格局分布(附图 3),利用统计分析得到不同情景下不同时间各土地利用类型面积及其变化情况(表 3)。

在情景 1 下,经济高速发展,城市化进程进一步加快,建设用地不断向外扩张,大量挤占城镇周边耕地,其中,扩张区域最明显的是涪陵区西北部和东南部、南川区东北部和黔江区中南部。由表 3 可知,2020 年、2035 年、2050 年建设用地面积分别比 2015 年增加了 150.83 km²、302.02 km² 和 473.04 km²,增幅分别为 16.44%、32.92%和 51.56%。而同期耕地面积则分别比 2015 年减少了 89.51 km²、193.56 km² 和 324.66 km²,减少的耕地中约有一半转为了建设用地。由此可见,建设用地和耕地的矛盾日益突出,保护耕地面临巨大压力。此外,林地虽有增加,但十分缓慢,到 2050 年也只增加了 109.85 km²;水域总体上变化不大,草地和未利用地则持续减少,到 2050 年分别减少了 186.58 km² 和 69.40 km²,未利用地几乎减少了一半。这表明,林地、草地、未利用地等生态用地的环境功能在减弱,研究区的生态环境有恶化的倾向,生态安全不容乐观。

在情景 2 下,经济发展、人口增长和城市化速度都按照 2015 年的水平演变发展,由于 2015 年各区县经济

情景 1 为“快速城镇化型”,主要反映当经济加速发展、城市化进程加快、人口迅速增加(例如二胎政策放开)时研究区各土地利用类型变化情况;情景 2 表示“现状延续型”,即按照当前的经济发展速度和城市化进程演变下去的未来土地利用变化;情景 3 为“生态保护型”,即适当减缓经济发展,降低 GDP 增速,同时兼顾生态环境保护时研究区未来土地利用格局演变。

发展水平相对较高,发展势头良好,故建设用地增长仍然较快。2020 年、2035 年和 2050 年建设用地比 2015 年分别增加了 95.73 km²、223.92 km² 和 347.92 km²,最大增幅为 37.92%,建设用地对耕地的占用仍然不容忽视。耕地继续在减少,但幅度没有情景 1 大,2020 年、2035 年、2050 年分别减少了 1.18%、2.8%和 4.37%。虽然林地增长速度比情景 1 要快,但草地和未利用地等生态用地仍在继续减少,35 a 间分别减少了 25.9%和 44.3%。因此,研究区生态环境保护的压力仍然存在。

在情景 3 下,各指标值在原有基础上下调了几个百分点,实际上追求的是经济、社会、环境协调发展。因此,建设用地无序扩张在一定程度上得到了控制,到 2050 年其总面积也才 1 171.42 km²,比同期情景 1 减少了 219.04 km²。耕地虽有减少,但逐渐趋于平衡,始终保持在 6 000 km² 以上,且呈集中连片之势。与情景 1、2 中林地相比,情景 3 林地增幅最大,2020 年、2035 年、2050 年比 2015 年分别增加了 57.45 km²、94.64 km²、166.48 km²,分别是情景 1 的 2.31 倍、1.53 倍和 1.52 倍。此外,草地和未利用地减少趋势放缓,水域略有减少,但总体变化不大。由此可见,研究区生态用地面积不断恢复,其环境功能也在逐渐增强,表明其社会经济发展与生态环境保护逐渐趋于和谐。

3 讨论

(1) 选取遥感影像解译数据而不是土地利用详查数据用于研究,主要考虑以下两点:一是研究尺度问题,由于研究区面积比较大(约 1.99 万 km²),采用 30 m 分辨率遥感影像解译数据能够满足尺度需求;

二是时间跨度问题,“一调”和“二调”土地利用详查数据分类标准不一致,影响数据间的有效衔接,且“一调”数据难以获得。

(2) 利用 CA-Markov 模型在对研究区进行模拟时,考虑到研究区面积比较大,且计算机性能有限,故选取了 60 m 分辨率来模拟研究。此外,曾选取其中一个区县进行试验,发现 30 m 模拟结果与 60 m 模拟结果差别并不大。为进一步提高模拟精度,下一步研究是在高性能计算机模拟下,采用 30 m 分辨率的模拟结果精度对情景分析结果的可能影响。

表 3 三种情景下研究区 2020 年、2035 年、2050 年
土地利用面积及其变化 km²

土地利用 类型	年份	快速城镇 化型(S ₁)	现状延续 型(S ₂)	生态保护 型(S ₃)
耕地	2020	6112.41	6128.47	6133.12
	2035	6008.36	6027.97	6033.34
	2050	5877.26	5931.12	6001.23
	2015—2020	−89.51	−73.45	−68.80
	2015—2035	−193.56	−173.95	−168.58
	2015—2050	−324.66	−270.80	−200.69
林地	2020	11568.73	11593.16	11601.28
	2035	11605.85	11620.27	11638.47
	2050	11653.68	11708.03	11710.31
	2015—2020	24.90	49.33	57.45
	2015—2035	62.02	76.44	94.64
	2015—2050	109.85	164.20	166.48
草地	2020	612.18	617.37	628.25
	2035	558.15	597.25	599.47
	2050	491.34	502.37	516.37
	2015—2020	−65.74	−60.55	−49.67
	2015—2035	−119.77	−80.67	−78.45
	2015—2050	−186.58	−175.55	−161.55
水域	2020	395.42	402.09	390.29
	2035	402.19	393.14	391.71
	2050	396.27	398.14	390.19
	2015—2020	−3.09	3.58	−8.22
	2015—2035	3.68	−5.37	−6.80
	2015—2050	−2.24	−0.37	−8.32
建设用地	2020	1068.25	1013.15	998.15
	2035	1219.44	1141.34	1113.79
	2050	1390.46	1265.34	1171.42
	2015—2020	150.83	95.73	80.73
	2015—2035	302.02	223.92	196.37
	2015—2050	473.04	347.92	254.00
未利用地	2020	130.26	133.01	136.16
	2035	93.26	107.28	110.47
	2050	78.24	82.25	97.73
	2015—2020	−17.38	−14.63	−11.48
	2015—2035	−54.38	−40.36	−37.17
	2015—2050	−69.40	−65.39	−49.91

(3) 将情景设置环节与土地转移适宜性图集制作相结合,实际上是将情景要素视为影响土地利用变化的约束条件,这与现有研究利用情景设置求出未来某一时刻土地利用总需求有所不同^[13],而 CA-Markov 模型土地需求是利用转移概率矩阵与其栅格像元乘积而得到的。此外,模型中根据预测时段前期资料所确定的转移概率矩阵不一定能够完全反映将来的土地利用变化,因此,进一步研究是求出未来某一时刻终极转移概率矩阵,以此算出终极状态下各地类面积,从而进一步提高模型的模拟精度。

(4) 情景设置主要是参考社会经济数据而设计的,没有考虑自然地理要素的可能影响,且具体情景设置时没有与规划指标进行比较,因此,进一步研究是将自然地理要素加入到情景指标中,同时参考重庆市和各区县现阶段土地利用总体规划成果,对模型进行校正,为该区下一轮土地利用规划提供科学参考。

4 结 论

(1) 利用 CA-Markov 模型模拟出研究区 2015 年土地利用格局分布,并与 2015 年实际解译数据进行比较,得到其数量精度 Kquantity 值为 0.869 5,位置精度 Klocation 值为 0.831 9,表明 CA-Markov 模型模拟精度高,效果比较理想,可用于土地利用时空格局变化模拟分析。

(2) 通过情景设计和模拟得到研究区三种情景下 2020 年、2035 年、2050 年土地利用格局分布。对比情景 1、情景 2 和情景 3 发现,三种情景下的土地利用面积变化趋势具有相似性,即建设用度和林地增加,耕地、草地和未利用地在减少,水域总体上变化不大。不同情景下各土地类型增加或减少的幅度不同。

在情景 1 下,建设用地急剧扩张,35 a 间其面积增加了一倍,且主要来源为耕地,约占转出耕地面积的一半;林地增长十分缓慢,草地和未利用地持续减少,其中,未利用地到 2050 年减少了一半,这说明片面追求经济的高速发展,不断压缩耕地、草地和未利用地的生存空间,一方面进一步加剧了人地矛盾,促使耕地保护压力倍增,另一方面也导致研究区环境恶化,威胁生态安全。

在情景 2 下,建设用地增长仍然较快,最大增幅达 37.92%,而耕地减幅有所下降,林地增加也比情景 1 要快,但草地和未利用地仍在持续减少,35 a 间分别减少了 25.9%和 44.3%,这说明按照当前的经济发展和城镇化速度,虽然要比情景 1 慢,但研究区生态环境改善并不明显,环境保护的压力仍然存在。

而在情景3下,林地、草地、未利用地等生态用地不断恢复和增加,到2050年,生态用地总面积占研究区的64%;耕地逐渐趋于平衡且呈集中连片之势,与此同时,建设用地无序扩张也得到有效控制,这表明研究区在发展经济的同时兼顾了环境改善与生态保护。

因此,情景3是研究区未来经济、社会和环境协调发展较为理想的模式,符合国家绿色发展理念和重庆市“面上保护、点上开发”的区域发展定位。根据情景3模式,应适当降低GDP增速,坚持经济发展与生态环境保护并重的发展理念,依托当地特色优势,建设生产空间集约高效、生活空间宜居宜业、生态空间山清水秀的美好家园。

参考文献:

- [1] 唐华俊,吴文斌,杨鹏,等.土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J].地理学报,2009,64(4):456-468.
- [2] 何春阳,史培军,李景刚,等.中国北方未来土地利用变化情景模拟[J].地理学报,2004,59(4):599-607.
- [3] 后立胜,蔡运龙.土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述[J].地理科学进展,2004,23(6):96-104.
- [4] Lambin E F, Geist H J, Lepers E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2003,28(2):205-241.
- [5] Stephenne N, Lambin E F. Scenarios of land-use change in Sudano-sahelian countries of Africa to better understand driving forces[J]. GeoJournal, 2004,61(4):365-379.
- [6] 甘红,刘彦随,王大伟.土地利用类型转换的人文驱动因子模拟分析[J].资源科学,2004,26(2):88-93.
- [7] 高啸峰,王树德,宫阿都,等.基于主成分分析法的土地利用/覆被变化驱动力研究[J].地理与地理信息科学,2009,25(1):36-39.
- [8] 范泽孟,岳天祥,刘纪远,等.中国土地覆盖时空变化未来情景分析[J].地理学报,2005,60(6):941-952.
- [9] 刘毅,杨晟,陈吉宁,等.基于元胞自动机模型的城市土地利用变化模拟[J].清华大学学报,2013,53(1):72-77.
- [10] 杨俊,解鹏,席建超,等.基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟:以大连经济技术开发区为例[J].地理学报,2015,70(3):461-475.
- [11] 邓祥征,刘纪远,战金艳,等.区域土地利用变化的多情景分析:以内蒙古自治区太仆寺旗为例[J].地球信息科学,2004,6(1):81-88.
- [12] 秦贤宏,段学军,杨剑.基于GIS的城市用地布局多情景模拟与方案评价:以江苏省太仓市为例[J].地理学报,2010,65(9):1121-1129.
- [13] 梁友嘉,徐中民,钟方雷.基于SD和CLUE-S模型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] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J].地理科学进展,2015,34(8):976-986.
- [15] Nourqolipour R, Mohamed Shariff A R B, Balasundram S K, et al. A GIS-based model to analyze the spatial and temporal development of oil palm land use in Kuala Langat district, Malaysia[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73:1687-1700.
- [16] Tong S T Y, Sun Y, Yang Y J. Generating a future land use change scenario with a modified population-coupled markov cellular automata model[J]. Journal of Environmental Informatics, 2012,19(2):108-119.
- [17] 李志,刘文兆,郑粉莉.基于CA-Markov模型的黄土塬区黑河流域土地利用变化[J].农业工程学报,2010,26(1):346-352.
- [18] 刘耀彬,戴璐,董玥莹.环鄱阳湖区分区土地利用景观格局变化模拟研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(10):1762-1770.
- [19] 侯西勇,常斌,于信芳.基于CA-Markov的河西走廊土地利用变化研究[J].农业工程学报,2004,20(5):286-291.
- [20] 蔺卿,罗格平,陈曦. LUCC驱动力模型研究综述[J].地理科学进展,2005,24(5):79-87.
- [21] 王友生,余新晓,贺康宁,等.基于CA-Markov模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J].农业工程学报,2011,27(12):330-336.
- [22] 肖明,吴季秋,陈秋波,等.基于CA-Markov模型的昌化江流域土地利用动态变化[J].农业工程学报,2012,28(10):231-238.
- [23] 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.
- [24] 赵彪.基于MCE的沈阳市沈北新区空间开发适宜性评价研究[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2015.
- [25] 张博,雷国平,周浩,等.基于CLUE-S模型的矿业城市土地利用格局情景模拟[J].水土保持研究,2016,23(5):261-266.