

基于 CA - Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究

赵冬玲¹ 杜 萌¹ 杨建宇^{1,2} 李鹏山¹ 何珊珊¹ 朱德海^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 为了探究城市发展过程中土地利用变化规律及各类驱动力的影响,以北京市顺义区为例,基于 2000、2005、2010 年 3 期遥感影像解译数据,分析研究区域的土地利用类型的动态变化程度,并基于 Markov 模型定量分析了土地利用的转移方向及转化程度。结合 GIS 分析功能,探讨多种土地利用驱动力对于土地利用类型转移的影响,并采用模糊计算的方法,将各类影像土地利用转移的因子标准化,并利用 GIS 中加权线性方法将其整合,结合元胞自动机马尔可夫模型,模拟出 2010 年的土地利用分布,经验证模拟的精度高达 81.41%,Kappa 指数为 0.776 9,得到了较为理想的结果,证明了方法的可行性及精度的可靠性。并以 2010 年的土地利用格局为基础,预测 2020 年的土地利用状况并分析 2010—2020 年 10 a 间的土地利用变化。分析结果表明,除草地、林地变化不明显,耕地、水域面积继续保持减少的趋势,但减小的趋势渐缓,建设用地仍在不断增加,但也逐渐趋于饱和的增长趋势。此研究可为当前及未来的土地利用规划、管理和生态恢复提供科学依据。

关键词: 土地利用动态度; 模拟预测; CA - Markov 模型; 多标准评价方法

中图分类号: F301.24; X321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0278-08

Simulation and Forecast Study of Land Use Change Based on CA - Markov Model

Zhao Dongling¹ Du Meng¹ Yang Jianyu^{1,2} Li Pengshan¹ He Shanshan¹ Zhu Dehai^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality, Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: In order to explore the influence of land use change and driving forces in the process of urban development, this paper took Shunyi District, Beijing as an example and analyzed the dynamic changes of land use types in the study area. Meanwhile, the direction and degree of the transformation of land use based on Markov model with three remote sensing images in 2000, 2005 and 2010 were analyzed. Combined with GIS analysis function, the influence of various land use driving forces on land use types was discussed, and the factors of land use transformation were standardized by using fuzzy calculation and intergrated by using weighted linear combination method. CA - Markov model was used to simulate the distribution of land use in 2010. The accuracy of the proposed simulation results obtained was as high as 81.41%, the Kappa index was 0.776 9. The feasibility and accuracy of the proposed method were proved. Based on the patterns of land use in 2010, the land use status of the land in 2020 was predicted and land use changes from 2010 to 2020 were analyzed. In addition to grassland and forest, the area of cultivated land and water continues maintaining the trend of reducing, but the trend is slowing down. And construction land is still increasing. This study provides scientific support for the planning and decision making of land use in the present and future.

Key words: dynamic degree of land use; simulation and forecast study; CA - Markov model; multiple-criteria evaluation method

收稿日期: 2015 - 08 - 31 修回日期: 2015 - 10 - 14

基金项目: 北京市耕地复合价值提升关键技术研究与应用项目(Z141100000614001)

作者简介: 赵冬玲(1961—),女,副教授,主要从事工程测量及航空摄影测量研究,E-mail: zhaodongling@cau.edu.cn

通信作者: 杨建宇(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事 3S 技术及其土地应用研究,E-mail: ycyjyang@cau.edu.cn

引言

随着城市经济的快速发展,城市生态环境乃至土地利用格局产生了巨大的变化^[1]。区域土地利用变化直接反映出区域土地资源利用方式及城市经济社会的发展方向,并引发自然和生态过程的变化,包括土壤性质^[2]、地表径流及地表侵蚀^[3-4]等各个方面,因此土地利用/覆盖变化(Land use/cover change)已成为全世界研究学者们的研究热点^[5]。进行不同尺度下的土地利用景观格局的研究,重建过去的土地利用格局、模拟现有的土地利用格局以及预测未来的土地利用的状况,可以为探索土地利用变化的规律和趋势提供科学决策,并为未来的土地资源的合理利用及未来科学的政府决策提供有效的示范和支撑^[6]。

土地利用空间演化模拟的模型应用研究是该研究的核心,其中 CA (Cellular automata) 模型以及 Markov 模型都是目前研究土地利用格局模拟预测中比较重要的方法。Markov 模型在研究时间演变上具有很大的优势,但是在空间计算能力上比较弱。CA 模型具有较强的空间计算的能力^[7-8]。集中 2 种传统模型优势的 CA - Markov 模型对于时空演变的模拟预测具有较好的效果,因此也被称为时空马尔可夫模型^[9]。其中土地转移适宜性规则是该模型的核心^[4,10-11]。CA - Markov 模型广泛应用于城市土地利用格局演变的研究,但从众多研究来看,大部分研究普遍将条件概率图像,或是较单一的影响因素直接作为土地利用的转化规则,土地利用转移适宜性评价过程均较为简单,往往不能细致准确地刻画出实际情况中各类影响因子对于土地利用变化的驱动影响。

本文以北京市顺义区为例,采用 CA - Markov 模型,结合 GIS 中的多标准评价 (Multi-criteria evaluation, MCE) 方法,对多种影响因子对土地利用的影响力进行空间统计分析,对各类影响因素进行评价,并利用模糊函数计算进行标准化处理,采用线性合并 (Weighed linear combination, WLC) 方法将适宜性因子进行整合,得到各类型土地利用转移适宜性评价结果,以此为基础更加细致地对土地利用的空间演化进行模拟及预测,并对 2000—2020 年的土地利用格局动态变化规律进行分析。

1 研究区域概况与数据预处理

1.1 研究区域概况

北京市顺义区位于北京市东北部,地理位置位于 40°00' ~ 40°18'N、116°28' ~ 116°58'E,北邻怀柔

区、密云县,东接平谷区,南与通州区、河北省三河市接壤,西以昌平区、朝阳区隔温榆河为界(图 1)。顺义区地势北高南低,地处燕山南麓,华北平原北端,属潮白河冲积扇下段。自 2000 年以后,经济发展迅速,土地利用变化明显,因而本文选择北京市顺义区作为研究区范围。

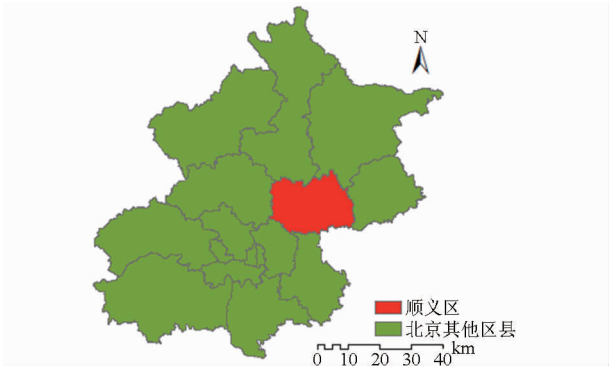


图 1 北京市顺义区地理位置图

Fig. 1 Geographical position image of Shunyi District in Beijing

1.2 遥感数据处理

本文采用的土地利用数据源分别为 2000、2005、2010 年 3 期 Landsat TM 遥感影像,分辨率为 30 m × 30 m,研究区域内地物信息丰富,云量较少,遥感数据整体质量较好。基于 ENVI 和 ArcGIS 为平台,经过辐射纠正及 RGB 假彩色合成,以 1:10 000 第 2 次全国土地调查数据为参考,并以土地用途、土地利用方式以及地物覆盖特征为主要分类依据,进行分类处理及目视判读和解译,得到 2000、2005、2010 年 3 期土地利用现状数据。

2 研究方法

本文基于 3 期土地利用现状数据,分析土地利用格局的空间变化规律及变化程度,采用 GIS 中的多标准评价方法将多种土地影响因子进行整合,探究土地利用转化规律并得到土地类型转化适宜性图集,完成土地利用空间演化的模拟及预测,具体技术流程如图 2 所示。

2.1 土地利用动态度

从土地利用/土地覆盖变化的含义及研究内容出发,构建土地利用变化模型是深入了解土地利用变化成因、过程,预测未来发展趋势及环境影响的重要途径,也是土地利用变化研究的主要方法^[12]。本文采用单一土地利用类型动态度反映土地利用变化程度,其表达式为^[13]

$$k = \frac{A_{t_2} - A_{t_1}}{A_{t_1}} \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中 k——研究初期至末期的土地利用动态度

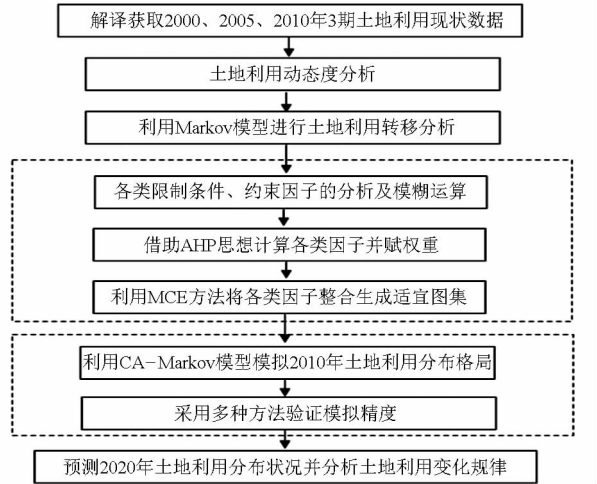


图2 技术流程图

Fig.2 Technique flow chart

t_1 、 t_2 ——研究初期和研究末期所在年份

A_{t_1} 、 A_{t_2} —— t_1 、 t_2 两个时期的各类土地利用类型面积

2.2 多标准评价方法

多标准评价中最基本的问题就是将不同的准则信息进行整合,本文采用多标准评价方法(MCE)中的加权线性合并方法(WLC)。MCE方法中适宜性评价准则包括土地利用转移的限制条件和约束因子。限制条件表现为二值化的规则,即允许和禁止,是“硬决策”;约束因子表现为适宜性由低到高的“软决策”^[14]。本文根据顺义区的生态、经济、人文等因素,在不影响当前经济发展、降低经济开发成本且保护基本农田的原则基础上,将坡度、机场建设用地作为限制条件,将与村镇中心、主要交通干道、首都国际机场、京承铁路、建设用地本身的距离以及各类土地利用转移条件概率图像等作为约束因子,在ArcGIS中将各类影响因子与土地利用空间分布进行叠置和统计分析,结合分析结果分别对限制条件和约束因子做二值化运算和模糊函数运算,对土地利用的影响因素做出评价并进行归一化处理,见图3。本文中具体的限制条件及约束因子如下:

- (1)坡度限制条件。根据我国《水土保持工作条例》并结合顺义区的实际地形条件,规定坡度15°以上的区域为禁耕区,15°以下的地区为适宜耕作的地区,分别赋值为0和1,见图3a。
- (2)首都国际机场建设用地限制条件。机场建设用地在不断扩张,首都国际机场建设用地规定不适宜转变成耕地,规定分值为0,其余区域赋值为1,见图3b。
- (3)与村镇中心距离的约束因子。顺义区下辖村镇较多,分布零散,并且建设用地较为细碎,根据ArcGIS中叠置结果的统计分析,规定距离村镇中心

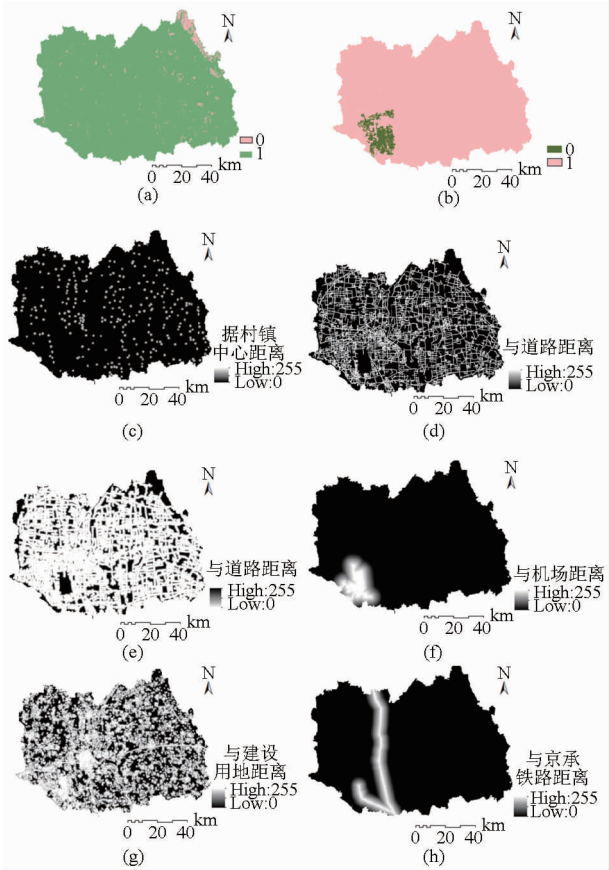


图3 各类适宜性因子评价图

Fig.3 Evaluation charts of all kinds of suitability factors

- 500 m 区域为适宜转变建设用地区域,适宜度从村镇中心本身到 500 m 范围内单调降低,适宜度拉伸范围为 0 ~ 255,见图 3c。
- (4)与道路距离的约束因子。根据叠置分析的结果规定距道路 100 m 范围内适宜开发的程度随距离增大单调降低,将适宜度归一化至 0 ~ 255,见图 3d。对于耕地而言,距离 120 m 范围以外区域适宜转变为耕地,且随着距离增大,适宜度线性增加,将适宜度归一化至 0 ~ 255,见图 3e。
- (5)与首都机场距离的约束因子。由叠置分析的结果可知,与机场距离越近,适宜开发程度越大,适宜度随距离加大逐渐降低,直至 2 500 m 以外基本上不适宜开发,对于转变建设用地适宜度单调降低,适宜度归一化为 0 ~ 255,见图 3f。
- (6)与建设用地本身距离的约束因子。由建设用地所在范围缓冲区内统计分析的结果表明,建设用地本身对于建设开发用地具有吸引作用,且随着距离的增大吸引作用单调降低。因此,规定建设用地以外 300 m 以内为适宜开发用地,适宜度单调降低,将适宜度归一化为 0 ~ 255,见图 3g。
- (7)与京承铁路距离的约束因子。京承铁路为贯穿整个顺义区的主要铁路,对于建设开发具有吸引作用,并随着距离增大,影响程度单调减小。规定

距离铁路 2 000 m 范围内为适宜开发的范围,适宜度单调降低,适宜度归一化到 0 ~ 255,见图 3h。

(8)条件概率图像。由 Markov 模型计算得到的条件概率图像也是土地利用类型转移规则的重要参考。

本文借鉴 SAATY 在层次分析法 (Analytical hierarchy process,AHP)背景下提出的每 2 种因子间两两比较的方法^[15],不同约束因子的权重通过因子间两两比较得到的比较特征值来确定。应用 MCE 模块中的加权线性合并方法(WLC)将不同标准按照两两比较矩阵计算的权重进行整合,得到各类土地利用类型转移适宜性图像。最终利用 Collection Editor 生成土地转移适宜性图像集。为 CA - Markov 的土地利用空间分布的模拟预测提供转移规则。

2.3 CA - Markov 模型及预测方法

Markov 模型中,系统在 t_1 时刻的状态仅与前一状态即 t_0 时刻的状态有关,因而马尔可夫链是通过计算 $t_0 \sim t_1$ 时期的土地利用变化矩阵来实现的,即土地利用类型之间的相互转换的面积或状态转移概率^[16-18]。土地利用变化可能性的预测公式为^[19]

$$S_{t+1} = P_{ij} S_t \tag{2}$$

式中 S_t, S_{t+1} —— $t, t+1$ 时刻土地利用状态
 P_{ij} ——土地利用转移概率矩阵,即 i 土地利用类型向 j 土地利用状态转移概率

元胞自动机(CA)中每个变量只取有限个状态,且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的^[20],因此元胞自动机模型具有较强的空间计算的能力。CA 模型的表达式为

$$A_{t+1} = f(A_t, N) \tag{3}$$

式中 A_t, A_{t+1} —— $t, t+1$ 时刻元胞有限、离散的状态集合

N ——元胞滤波器大小

f ——局部空间内元胞的转换规则

CA - Markov 模型集合 2 种模型的特点,在 Markov 模型中加入了空间变化的特征,使用元胞自动机滤波器创建空间意义明显的权重因子,离现存土地利用越近的地区,该因子的权重越大,因此更多的考虑了空间关系^[21]。

本文中利用 CA - Markov 模型进行土地利用空间演化的模拟预测具体过程如下:

(1)计算土地利用转移矩阵。将 2000 年和 2005 年的土地利用数据进行叠置分析,利用 Markov 模型进行土地利用类型转移面积矩阵及概率矩阵的计算,将转移矩阵作为后期模拟及预测的数据基础。将 2000 年和 2010 年的土地利用数据进行转移矩阵的计算,将转移概率及面积矩阵作为转换规则参与

后面的预测土地利用格局的计算。

(2)划分元胞大小及构造元胞滤波器。结合顺义区的区域面积及研究区域景观类型特征,划定元胞大小为 30 m × 30 m。元胞滤波器的大小即表示对于现有元胞具有显著影响力的邻域元胞的范围,本文设定 5 × 5(栅格单元)的元胞滤波器。

(3)建立转移适宜性图像集。本文采用多标准评价方法(MCE)里的加权线性合并方法(WLC)将不同的准则信息进行整合,得到各类土地利用转移的适宜图像,再利用合成编辑的工具生成土地转移的适宜性图像集。

(4)确定模型运行的起始时刻及 CA 的迭代次数。本文基于 2000、2005 年 2 期土地利用数据,采用 Markov 模型计算得到 2000—2005 年的土地利用类型转移矩阵,结合土地利用转移适宜性图像集,以 2005 年为起始时刻,以 5 a 为周期,模拟 2010 年的土地利用空间分布状况,并进行模拟结果的精度检验。在模拟方法及过程可信度达到较高水平的前提下,再利用 Markov 模型计算 2000—2010 年 10 a 间的土地利用转移面积及概率矩阵。为了更加准确合理地刻画 2000—2010 年期间土地利用转移规律,将适宜性图像集进行改进,将原先适宜性图像集中的条件概率图像换成 2000—2010 年 10 a 期间的条件概率图像,其他土地转移适宜性评价因子图保持不变,以达到更加合理准确的预测结果。以 2010 年为基线,结合 2000—2010 年间土地利用转移概率矩阵及改进后的适宜性图像集,以 10 a 为周期,预测 2020 年土地利用格局空间分布。

3 试验结果及分析

3.1 研究区土地利用格局及变化特征分析

基于 2000、2005、2010 年 3 期的土地利用分布及动态变化程度数据(表 1、2),分析 3 个时期顺义区的土地利用格局变化规律。

表 1 反映出 2000、2005、2010 年 3 个时期的土地利用的分布格局,可知整个顺义区以耕地和建设用地面积为主,占总面积 75% 以上。2000—2005 年期间,耕地、水域、未利用地均有减少,水域和耕地用地面积缩小较为明显,土地利用动态度分别达到 -12.00% 和 -3.99%。期间建设用地的扩张表现的最为明显,土地利用动态度高达 19.68%,土地扩张的速度大大增加,可反映出 2000—2005 年期间顺义区经济增长迅速,人口压力日益加大,城镇不断扩张,以满足经济发展的需要。至 2010 年,耕地占 53.89%,相比于 2005 年的耕地利用面积,基本上没

表 1 2000、2005、2010 年 3 个时期各类土地利用面积及所占百分比

Tab.1 Areas and proportions of different land use types in 2000, 2005 and 2010

土地利用 类型	2000 年		2005 年		2010 年	
	面积/ km ²	百分 比/%	面积/ km ²	百分 比/%	面积/ km ²	百分 比/%
耕地	669.26	65.69	535.64	52.58	549.07	53.89
林地	14.92	1.46	24.92	2.45	18.68	1.83
草地	34.13	3.35	56.72	5.57	50.88	4.99
建设用地	127.78	12.54	253.53	24.88	349.33	34.29
水域	36.33	3.57	14.53	1.43	1.96	0.19
未利用地	136.39	13.39	133.46	13.10	48.89	4.80

表 2 以 5 a 为周期的各类土地利用动态变化

Tab.2 Dynamic changes of land use in the period of 5 a

土地利用 类型	2000—2005 年		2005—2010 年	
	面积变化/ km ²	土地利用 动态度/%	面积变化/ km ²	土地利用 动态度/%
耕地	-133.62	-3.99	13.43	0.50
林地	10.01	13.42	-6.25	-5.01
草地	22.59	13.23	-5.84	-2.06
建设用地	125.75	19.68	95.80	7.56
水域	-21.80	-12.00	-12.57	-17.30
未利用地	-2.92	-0.43	-84.57	-12.67

有明显变化,这主要得益于这个时期国家的耕地保护政策。林地、草地、水域和未利用地均表现出减少

的趋势,结合表 2 中的土地利用动态度结果表明,缩小的速度由大到小表现为水域、未利用地、林地、草地,水域的范围大幅度缩小,未利用地迅速转变为其他类型用地。而建设用地正在不断扩张,面积所占百分比达到 34.29%,单一土地利用动态度为 7.56%,虽然保持了较快的增长速度,但相比于上一个 5 a 间的变化而言,增长的速度略有减小。

3.2 土地利用变化的空间转换分析

马尔可夫转移矩阵定量分析了各类土地利用类型之间的补给来源和流转方向以及土地利用类型转换概率,见表 3、4。其中表现最明显的是耕地、水域面积大大减少,建设用地大量增加。其中耕地转出总面积为 239.70 km²,主要转变为建设用地,占转出总面积的 76.71%,其次为转变成草地和未利用地,分别占转出总面积的 11.79%和 9.51%。林地面积稍有增加,主要由耕地和草地转换过来。草地面积也有一定程度增加,主要由耕地和林地转变而来。建设用地面积大幅度增加,转入面积为 214.93 km²,主要由耕地和未利用地补给而来,转入面积分别为 183.87 km²和 25.96 km²,分别占转入总面积的 85.55%和 12.08%。水域面积大大减少,主要转变为耕地和建设用地。未利用地面积有所增加,主要由耕地和建设用地转变而来,分别占未利用地转入面积的 34.18%和 64.48%。

表 3 顺义区 2000—2010 年土地利用面积转移矩阵

Tab.3 Transition area matrix of land use in Shunyi District from 2000 to 2010

km²

	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地	转出总计
耕地	298.48	4.79	28.26	183.87	0	22.78	239.70
林地	1.82	10.43	6.36	0.06	0	0.01	8.25
草地	24.26	5.91	15.60	4.27	0	0.83	35.28
建设用地	85.85	0.65	5.72	225.01	0	43.00	135.21
水域	0.93	0.01	0.10	0.77	0.09	0.06	1.87
未利用地	17.04	0.11	1.41	25.96	0	4.37	44.52
转入总计	129.91	11.46	41.85	214.93	0	66.68	
净转出	109.80	-3.21	-6.57	-79.71	1.87	-22.16	

注:横向代表 2000 年各土地利用类型,纵向代表 2010 年各土地利用类型。

表 4 顺义区 2000—2010 年土地利用转移概率矩阵

Tab.4 Transition probability matrix of land use in Shunyi District from 2000 to 2010

	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
耕地	0.555	0.009	0.053	0.342	0	0.042
林地	0.098	0.558	0.341	0.003	0	0.001
草地	0.477	0.116	0.307	0.084	0	0.016
建设用地	0.238	0.002	0.016	0.625	0	0.119
水域	0.476	0.003	0.053	0.391	0.046	0.032
未利用地	0.349	0.002	0.029	0.531	0	0.089

3.3 土地利用的空间演化模拟分析

3.3.1 土地利用模拟试验结果分析

以 2005 年数据为基期数据,以 2000—2005 年土地利用转移矩阵及土地利用转移适宜性图集为转换规则,模拟 2010 年的土地利用空间格局。将 2010 年实际土地利用空间分布与模拟结果进行比较验证。本研究分别采用 2 种方法对模拟效果进行验证。

(1) Kappa 指数方法

Kappa 指数为

$$V_{\text{Kappa}} = \frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \tag{4}$$

式中 P_0 ——土地利用分布模拟正确的比例

P_c ——随机情形下模拟正确的比例

P_p ——理想情况下模拟完全正确的比例

借助 GIS 的空间叠置相减的分析功能,将 2010 年实际土地利用解译结果图与模拟结果做栅格相减

运算,结果为零即为模拟准确,非零即为模拟不准确,经统计,为零的像元个数为 921 512,总像元个数为 1 131 898,模拟正确的百分比为 81.41%,达到较好的模拟效果,再计算 Kappa 指数。其中 P_0 为 0.814 1,由于共有 6 种土地利用类型,因而随机情形下模拟正确比例为 1/6,即 $P_c = 0.166 7$,理想情况下模拟正确的比例 $P_p = 1$,计算得到 2010 年模拟的 Kappa 指数为 0.776 9,验证结果表明模拟结果达到了较高的精度,见图 4。

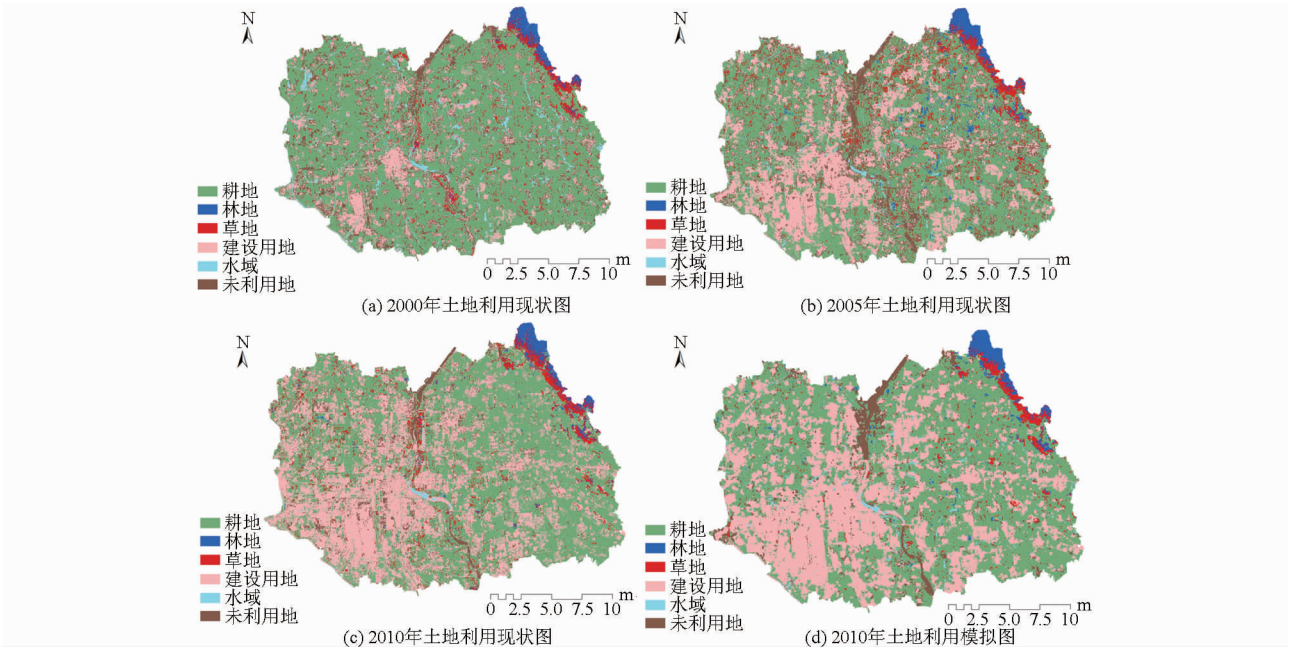


图 4 2000、2005、2010 年土地利用现状图及 2010 年土地利用模拟图

Fig. 4 Current land use images in 2000, 2005, 2010 and land use simulation image of 2010

(2) 随机分布样点法

在整个研究区域内采用生成随机样点(Create random points)的方法在生成 700 个随机分布于整个研究区的样本点,并利用空间分析功能将随机样本点分别与模拟土地利用图及实际土地利用图进行叠置分析,将分析结果进行统计,模拟正确的点数为 592 个点,占总随机样点数的 84.57%。经过再次验证,表明模拟的方法及过程较为准确合理,可信度较高。

3.3.2 土地利用预测试验结果分析

分析结果表明本研究的土地利用空间演化模拟达到了较好的效果,证明了模拟方法及过程具有较高可信度,本研究继续以 2010 年为基线,将原先的适宜性图像集进行改进。因为 2010 年模拟效果较好,保持其他适宜性条件不变,只将其中的 2000—2005 年的条件概率图像更换成 2000—2010 年条件概率图像,从而以 2000—2010 年的土地转移矩阵及改进的适宜性图像集为规则,预测 2020 年土地利用分布格局,试验结果见图 5 和表 5。

加入 2020 年土地利用的预测结果数据,再以

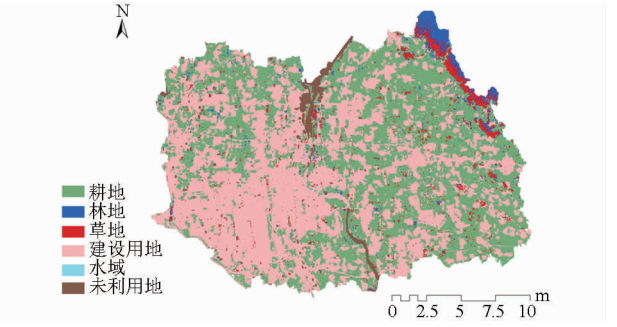


图 5 2020 年土地利用预测图

Fig. 5 Land use forecast image of 2020

10 a 为变化周期分析土地利用的动态变化,见表 6。其中耕地在 2000—2010 年第 1 个 10 a 周期内,耕地面积减少了 120.10 km²,在 2010—2020 年间面积减少 99.99 km²,土地利用动态度基本保持一致,可见 2 个 10 a 间,耕地的变化速率是基本稳定的,均呈减少的趋势。由表 6 中的土地利用动态度可知,水域和未利用地的面积也在减少,并且减少的速度基本相同,表现出比较稳定的减小趋势。对于建设用地而言,第 1 个 10 a 内增加面积为 221.55 km²,在第

表 5 2020 年土地利用分布
Tab.5 Land use distribution of 2020

土地利用类型	面积/km ²	百分比/%
耕地	449.08	44.08
林地	21.87	2.15
草地	32.35	3.18
建设用地	487.99	47.90
水域	0.17	0.02
未利用地	27.33	2.68

表 6 以 10 a 为周期的各类土地利用动态变化
Tab.6 Dynamic changes of land use in period of 10 a

土地利用 类型	2000—2010 年		2010—2020 年	
	面积变化/ km ²	土地利用 动态度/%	面积变化/ km ²	土地利用 动态度/%
耕地	-120.19	-1.80	-99.99	-1.82
林地	3.76	2.52	3.20	1.71
草地	16.75	4.91	-18.53	-3.64
建设用地	221.55	17.34	138.66	3.97
水域	-34.37	-9.46	-1.79	-9.13
未利用地	-87.49	-6.42	-21.57	-4.41

2 个 10 a 间面积增加 138.66 km²,到第 2 个 10 a 周期内建设用地的增长速度依然迅猛,但逐渐呈现因增长饱和而减缓的趋势。

4 结 论

(1)土地利用动态变化规律明显。从整体来

看,2000—2005 年,建设用地大大增加,而耕地面积急剧减少,主要转变为建设用地和未利用地。2005—2010 年间,耕地面积基本上保持不变,建设用地持续增加。而 2000—2010 年期间,建设用地不断扩张,但渐渐趋于饱和趋势,增加的速度逐渐降低。

(2)采用多标准评价方法(MCE)的加权线性合并方法(WLC)进行土地转移的适宜性评价,结果表明多标准评价方法合理准确,适用于土地利用转变的规则制定,模拟精度达到了 81.41%,Kappa 指数为 0.776 9。研究结果不仅证明了多标准评价方法精度较高,且证明了 CA - Markov 模型较适合应用于城市土地利用的空间演化的模拟预测。

(3)本研究中,模拟及预测的过程均统一采用了 30 m × 30 m 大小的栅格尺寸,没有将土地利用的尺度效应考虑进去,未来的研究中考虑采用不同的元胞大小分别进行模拟预测的研究,针对不同的研究范围,探究最适合的元胞大小,以期达到更高的模拟精度和更好的试验效果。同时未来的研究中也可以考虑变化元胞滤波器的大小,探索元胞滤波器大小对于试验精度的影响以及对于不同情况下不同元胞滤波器大小的适宜程度。同时,可采用多种土地利用模拟的模型进行验证,不仅可以验证模拟预测的精度,也可以将不同模型进行模拟预测的结果进行比较,从而选择更优的模拟预测的方法,实现更好的空间演化模拟的效果。

参 考 文 献

1 郑燕凤. 基于 GIS 的 CA - MARKOV 模型的土地利用变化研究[D]. 泰安:山东农业大学,2009.
ZHENG Yanfeng. Study of land-use change based on GIS and CA - MARKOV—a case study of Zhaoyuan[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2009. (in Chinese)

2 BORMANN H, BREUER L, GRAFF T, et al. Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance; a comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis[J]. Ecol Model, 2007, 209(1): 29 - 40.

3 BRATH A, MONTANARI A, MORETTI G. Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation [J]. Journal of Hydrology, 2006, 324: 141 - 153.

4 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 - 352,391.
LI Zhi, LIU Wenzhao, ZHENG Fenli. Land use change in Heihe catchment on loess tableland based on CA - Markov model[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(1):346 - 352,391. (in Chinese)

5 陆汝成,黄贤金,左天惠,等. 基于 CLUE - S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究——以江苏省环太湖地区为例 [J]. 地理科学,2009,29(4):577 - 581.
LU Rucheng, HUANG Xianjin, ZUO Tianhui, et al. Land use scenarios simulation based on CLUE - S and Markov composite model—a case study of Taihu lake ring in Jiangsu province[J]. Scientia Geographica Sinica,2009,29(4):577 - 581. (in Chinese)

6 龚文峰,袁力,范文义. 基于 CA - Markov 的哈尔滨市土地利用变化及预测[J]. 农业工程学报,2012,28(14):216 - 222.
GONG Wenfeng, YUAN Li, FAN Wenyi. Dynamic change and prediction of land use in Harbin city based on CA - Markov model [J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(14):216 - 222. (in Chinese)

7 刘继生,陈彦光. 基于 GIS 的细胞自动机模型与人地关系的复杂性探讨[J]. 地理研究,2002,21(2):155 - 162.
LIU Jisheng, CHEN Yanguang. GIS-based cellular automata models and researches on spatial complexity of man-land relationship [J]. Geographical Research, 2002,21(2):155 - 162. (in Chinese)

- 8 刘淑燕,余新晓,李庆云,等. 基于CA-Markov模型的黄土丘陵区土地利用变化[J]. 农业工程学报,2010,26(11):297-303.
LIU Shuyan, YU Xinxiao, LI Qingyun, et al. Land use change in loess hilly region based on CA-Markov model[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 297-303. (in Chinese)
- 9 杨国清,刘耀林,吴志峰. 基于CA-Markov模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007,32(5):414-418.
YANG Guoqing, LIU Yaolin, WU Zhifeng. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 414-418. (in Chinese)
- 10 王友生,余新晓,贺康宁,等. 基于CA-Markov模型的藉河流域土地用变化动态模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(12):330-336,442.
WANG Yousheng, YU Xinxiao, HE Kangning, et al. Dynamic simulation of land use change in Jihe watershed based on CA-Markov model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 330-336, 442. (in Chinese)
- 11 王学,张祖陆,张超. 基于CA-Markov模型的白马河流域景观格局分析及预测[J]. 水电能源科学,2011,29(12):111-115.
WANG Xue, ZHANG Luzu, ZHANG Chao. Landscape pattern analysis and prediction in Baimahe catchment based on CA-Markov model[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(12): 111-115. (in Chinese)
- 12 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(1):83-89.
WANG Xiulan, BAO Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 83-89. (in Chinese)
- 13 梁治平,周兴. 土地利用动态变化模型的研究综述[J]. 广西师范学院学报:自然科学版,2006,23(增刊):22-26.
- 14 殷晓芳. 基于CA-Markov模型的建设用地模拟预测研究[D]. 武汉:华中师范大学,2014.
YIN Xiaofang. Research on simulation and forecast of construction land-use change based on CA-Markov model[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014. (in Chinese)
- 15 荣月静,张慧. 基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(4):343-353.
RONG Yuejing, ZHANG Hui. Evaluation of ecological sensitivity of land use in Jiaxing city based on MCE-CA model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(4): 343-353. (in Chinese)
- 16 王菲,柴旭荣. CA-Markov模型在土地利用模拟研究中的应用[J]. 现代农业科技,2013(2):227,235.
WANG Fei, CHAI Xurong. Application of CA-Markov model in land use simulation research[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(2): 227, 235. (in Chinese)
- 17 吴莉,侯西勇,徐新良,等. 山东沿海地区土地利用和景观格局变化[J]. 农业工程学报,2013,29(5):207-216,293.
WU Li, HOU Xiyong, XU Xinliang, et al. Land use and landscape pattern changes in coastal areas of Shandong province, China [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 207-216, 293. (in Chinese)
- 18 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.
HOU Xiyong, CHANG Bin, YU Xinfang. Land use change in Hexi corridor based on CA-Markov methods[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 286-291. (in Chinese)
- 19 高占国,赵旭阳. 基于GIS的土地利用动态变化与预测——以井陉县威州镇为例[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2002,23(2):75-80.
GAO Zhanguo, ZHAO Xuyang. Prediction of land use variation change based on GIS[J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 75-80. (in Chinese)
- 20 张旭. 基于CA-MARKOV模型的甘南州土地利用预测研究[D]. 兰州:兰州大学,2012.
ZHANG Xu. Prediction of land use based on CA-MARKOV model in Gannan prefecture[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese)
- 21 何丹,周璟,高伟,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(6):1095-1105.
HE Dan, ZHOU Jing, GAO Wei, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in lake Dianchi watershed[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1095-1105. (in Chinese)