

基于 Logistic-CA-Markov 模型的青岛市 土地利用变化动态模拟

邢容容^{1,2}, 马安青¹, 张小伟¹, 于欣鑫¹, 马冰然¹

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队, 河北 秦皇岛 066001)

摘 要:研究经济快速发展的沿海地区土地利用结构的变化并预测其未来发展趋势,可以为区域土地合理利用与配置提供参考。以青岛市为研究区,采用 Logistic-CA-Markov 耦合模型,基于 2000 年、2011 年土地利用解译数据,结合 DEM、人口、GDP、距离等因素模拟出 2011 年土地利用数据,与 2011 年解译数据对比,得到模拟精度为 94.27%,说明模型拟合精度较高,接着对 2022 年、2033 年土地利用空间格局进行了预测。Logistic-CA-Markov 模型模拟的 2011—2022 年土地利用类型将保持 2000—2011 年的变化趋势,表现在耕地、水域、未利用土地面积减少,林地、草地以及城乡、工矿、居民用地面积增加,2022—2033 年城乡、工矿、居民用地面积仍然增加,但是增加速率明显小于 2011—2022 年。研究表明,Logistic-CA-Markov 耦合模型具有较高的模拟精度,可以应用于模拟多类土地利用类型之间的演变。该研究可为青岛市的土地规划、管理和决策提供依据,同时对保护和改善生态环境具有现实的指导意义。

关键词:土地利用变化; 动态模拟; Logistic-CA-Markov 耦合模型; 青岛市

中图分类号: F301.2; P901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0111-04

Dynamic Simulation of Land Use Change in Qingdao City Based on Logistic-CA-Markov Model

XING Rong-rong^{1,2}, MA An-qing¹, ZHANG Xiao-wei¹, YU Xin-xin¹, MA Bing-ran¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Qinhuangdao Mineral Resources and Hydrogeological Brigade, Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao, Hebei 066001, China)

Abstract: The study of land use change of rapid coastal areas and prediction of future trends can provide a reference for rational utilization and allocation of land resources. Qingdao City was taken as the study area. The land use scenario in 2011 was simulated and forecasted on the basis of land use type interpretation of 2000 and 2011, DEM, population, GDP and range of distance data by means of Logistic-CA-Markov model. Results showed that the simulation accuracy by this model was 94.27%. So the fitting accuracy will be higher by using this model. Then distribution of land use spatial patterns in 2022 and 2033 were forecasted. The simulated result by Logistic-CA-Markov model indicated that each land use type from 2011 to 2022 would keep the similar change trend as that from 2000 to 2011. Farm land, water and unused land area would decrease, while the areas of forest, grassland, rural, urban, mining and residential would increase. The rural, urban, mining and residential areas will increase from 2022 to 2033 slowly compared to that from 2011 to 2022. It is concluded that the proposed model in the paper had high accuracy in terms of simulating complex land use changes and could be used to simulate the multiple land use evolution. And this study provides not only basis of land planning, management and decision, but also realistic significance to protect and improve the ecological environment.

Key words: land use change; dynamic simulation; Logistic-CA-Markov model; Qingdao City

土地利用/覆被变化 (Land Use/Land Cover Change, LUCC) 是全球环境变化的重要组成部分和主要原因之一,其产生的资源环境问题越来越突出,影响着能量交换、水循环及生物多样性和生态系统的稳定性^[1]。随着青岛市经济的迅速发展,经济社会结构发生变化,人地矛盾愈加尖锐,制约着城市协调发展。此背景下,建立土地利用动态模型,科学把握土地变化趋势,制定合理的土地调控政策,对于青岛市土地资源可持续利用、经济社会和谐发展具有指导意义。

目前模拟土地利用动态变化的模型很多,常见的有系统动力学模型^[2]、元胞自动机(CA)^[3]、CLUE-S 模型^[4]、多智能体^[5]、CA-Markov^[6]、人工神经网络^[7],此外,黎夏和叶嘉安设计的 ANN-CA 模型^[8],邓祥征的土地系统动态模拟模型(DLS)^[9],张显峰、崔伟宏的城市土地利用演化过程模拟预测 LESP 模型^[10]等取得了一定的成果。其中,CA-Markov 模型是目前土地利用动态变化模拟预测研究中应用广泛且较为有效的研究方法。该模型综合了 CA 和 Markov 模型各自的优点,即 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型定量化预测的优势,二者的有机结合,能够综合考虑自然和人文因素的影响,有利于模拟不同阶段土地利用的时空变化,并且在国内外取得了较多的研究成果。本文以青岛市为研究区,采用 CA-Markov 模型,并用 Logistic 模型定义 CA 的转换规则,利用 2000 年、2011 年的土地利用变化数据来预测青岛市 2022 年、2033 年土地利用变化的趋势,从而为青岛市可持续发展提供决策依据。

1 研究区概况

青岛市位于山东半岛南端,黄海之滨。全市海岸线总长约 870 km,其中大陆岸线 730 km,占山东省岸线的 1/4。东北与烟台市毗邻,西与潍坊市相连,西南与日照市接壤。全市总面积 11 282 km²,常住人口为 871.51 万人(2011 年)。青岛市下辖六区四市(2012 年国务院批复),包括市南区、市北区、李沧区、崂山区、城阳区、黄岛区以及胶州市、即墨市、平度市、莱西市。地势东高西低,南北两侧隆起,中间低凹,其中山地约占全市总面积的 15.5%、丘陵占 25.1%、平原占 37.7%、盆地占 21.7%。目前,青岛市主要土地利用类型有城镇居民点工矿用地、耕地、林地、园地、水域、交通过地、未利用地。青岛虽属温带季风气候,但其“三面沧海一面山”的独特地理位置,使其又具有鲜明的海洋性气候特征,年平均气温 12.7℃,降水量

年平均 662.1 mm,年平均风速为 5.2 m/s,以东南风为主导风向,年平均相对湿度为 73%,由于黄海水团和风向的影响,青岛多平流雾,年均雾日 50 余天。

2 数据处理

选用 2000 年 9 月 16 日的 Landsat TM 影像(条带号/行编号为 120/34、120/35)和 2011 年 5 月 23 日的‘环境一号’卫星 CCD 影像,解译出土地利用数据,根据中国科学院土地资源分类系统,结合青岛市地形条件及土地利用/覆被特点,划为 6 种土地利用类型:耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地^[11]。

选取自然和社会经济 7 个参数作为驱动因子进行 Logistic 回归分析,包括:海拔高度、地形起伏度、距城镇中心的距离、距海岸线的距离、道路密度、人口密度、GDP 密度。从国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/>)获得 30 m 分辨率数字高程(DEM)栅格数据,利用 ArcGIS 提取地形起伏度。城镇位置矢量数据是从地球系统科学数据共享网上下载,海岸线位置数据是由 2000 年青岛市土地利用数据提取得到,通过 ArcGIS 空间分析 distance 命令得到距城镇中心的距离和距海岸线的距离。人口数据和 GDP 数据均来自青岛市 2010 年统计年鉴。交通数据是从 Google Earth 上提取县级以上道路,然后与青岛市行政区做叠置,对结果按行政区统计道路密度,将统计结果与青岛市行政区做表链接,计算各县(区)的交通密度,利用 ArcGIS 对计算出的交通密度采用反距离加权法(IDW)进行空间插值,得到青岛市交通密度。采用同样插值方法,获得人口密度、GDP 密度数据。

由于 Logistic-CA-Markov 模型需要 RST 格式的栅格数据,因此将土地利用数据和驱动因子数据在 ArcGIS 中转换为 ASCII 码,在 IDRISI 中将 ASCII 码转换 RST 格式。

3 研究方法

3.1 Logistic 回归分析模型

Logistic 回归分析可分为二元 Logistic 回归分析和多元 Logistic 回归分析,并被广泛应用于土地利用变化研究中^[12]。Binary Logistic 回归方程的公式为:

$$\log_{\theta}\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)=\alpha+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+\cdots+b_nx_n$$

式中: P_i ——每个栅格可能出现土地利用类型 i 的概率; x_1, x_2, \cdots, x_n ——驱动因素。逐步回归对每一个

栅格出现某一地类的概率进行诊断,筛选出对土地利用格局影响较为显著的因素,确定它们间的定量关系。

Logistic 回归的结果,通常采用 Pontius 提出的受试者工作特征曲线(relative operating characteristics,简称 ROC 曲线)进行验证^[13]。ROC 的值介于 0.5 和 1.0 之间。当 $0.5 < ROC < 0.7$ 时,预测效果有较低准确性; $0.7 < ROC < 0.9$ 时,有一定准确性; $ROC > 0.9$ 时,有较高准确性。ROC 值越接近于 1.0,说明预测效果越好。 $ROC = 0.5$ 时,说明模拟方法完全无效,无模拟价值。 $ROC < 0.5$ 不符合真实情况,在实际中极少出现。一般认为当 ROC 值大于 0.7 时模拟效果较好,模拟结果可以采用,反之则模拟效果不好。

3.2 CA-Markov 模型

元胞自动机(cellular automata,CA)是时间、空间、状态都离散,空间相互作用和时间因果关系都为局部的网格动力学模型,具有模拟复杂系统时空演化过程的能力^[14]。CA 有 4 个基本要素:元胞、状态、邻域和转换规则,最核心的部分就是定义转换规则。

马尔可夫模型是基于马尔可夫链,根据系统中不同状态的起始概率和状态之间的转移概率来预测将来各个时刻的变动状况,是时间和状态都离散的随机运动过程。该过程一是分析土地利用类型面积的变化信息;二是由土地利用转移概率矩阵来预测土地利用变化趋势。

Markov 模型与 CA 模型均为时间离散、状态离散的动力学模型,二者具有一定的局限性。Markov 模型支持土地利用变化的数量预测,而无空间特征;CA 模型则具有较强的空间概念和模拟复杂空间系统时空动态演变的能力^[15]。IDRISI 软件中的 CA-Markov 模型综合了 Markov 模型定量化预测的优势和 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力,能从数量和空间两方面较好地进行土地利用变化时空格局模拟,具有较大的科学性和实用性^[16]。

利用 Logistic 回归分析模型定义 CA 的转换规则,三者结合形成 Logistic-CA-Markov 模型。

4 土地利用变化模拟与预测

4.1 Logistic-CA-Markov 模拟过程

通过 Logistic 回归模型得到的分布适宜图作为 CA 的转换规则,利用 IDRISI 软件中的 CA-Markov 模块模拟青岛市土地利用变化,过程如下:

(1) 生成土地利用转移矩阵。基于 IDRISI 软件的 Markov 模块,叠加 2000 年、2011 年的土地利用类

型图,并将间隔时间和预测时间周期设置为 11 a,比例误差设置为 0.15,得出土地利用转移概率和转移面积矩阵。

(2) 创建土地转变适宜性图像集。采用 Logistic 模型对各土地利用类型与 7 个驱动因子进行分析,构建回归方程,并用 ROC 验证。经 ROC 检验,各土地利用类型的 ROC 值分别是城乡、工矿、居民用地 0.915 4、耕地 0.902 7、林地 0.973 3、未利用土地 0.887 8、水域 0.864 5、草地 0.786 1,均大于 0.7,说明模拟效果较好,驱动因子能较好地解释各地类的空间分布。运用 Logistic 逐步回归对每一栅格单元可能出现的某一种土地利用类型的概率进行诊断得到各土地利用类型的空间分布概率图。利用 IDRISI 的 collection editor 将 Logistic 回归得到的各土地利用类型的适宜性图组合为适宜性图像集(.rgf),作为 CA 的转化规则。

(3) 设置参数。在 IDRISI 的 CA-Markov 模块,以 2000 年为预测起始年,选取元胞周围 5×5 的矩阵构成 CA 滤波器,设置间隔迭代为 11 年,模拟得到 2011 年土地利用分布图。

4.2 模拟精度检验

目前还没有统一的方法对 CA-Markov 模拟的结果进行精度验证,但较常用的有全数检验法和随机检验法。随机检验法适合于验证对象较均匀,代表性强且覆盖面积较大的情况,由于样本的选取是随机的,存在一定的偏差,而全数检验法可以检验到参与模拟的每一个单元,可信度高,但是计算冗繁,计算时间要求长。考虑青岛市面积适中,数据量较小,故采用全数检验法。将 2011 年土地利用的模拟结果与 2011 年土地利用的解译结果进行求差栅格运算,前后一致的区域求差后地类编码属性为 0,最后提取出地类编码值为 0 的栅格数除以研究区域总栅格数,即得模拟精度 94.27%(表 1),反映出该模拟结果可信度较好,利用 CA-Markov 模型预测土地利用类型具有较好的可靠性、适用性^[17]。

表 1 2011 年预测精度对比

土地利用类型	正确栅格 个数	模拟结果 栅格个数	模拟 精度/%
城乡、工矿、居民用地	8645	9225	93.71
未利用土地	485	504	96.23
林地	3161	3642	86.79
水域	1519	1652	91.95
耕地	23213	24439	94.98
草地	4237	4308	98.35
总计	41260	43770	94.27

4.3 未来土地变化预测

以2011年为预测起始年,选取元胞周围 5×5 的矩阵构成CA滤波器,设置间隔迭代为11年,模拟得到2022年土地利用分布图,以2022年土地利用图为基线,取11次建立2033年土地利用分布图(附图7)。

根据Logistic-CA-Markov模型预测,到2022年青岛市耕地、林地、草地、水域、未利用土地和城乡、工矿、居民用地的面积分别为5 832.50,1 061.72,892.95,316.72,54.57,2 871.27 km²。预测结果表明,2022年土地利用分布表现在城乡、工矿、居民用地明显增加,比2011年增加5.48%;林地和草地少量增加,分别比2011年增加0.41%,0.14%;而耕地、水域、未利用土地面积不同程度的减少,分别比2011年减少5.15%,0.76%,0.12%,其中耕地面积减少更为明显。根据预测,青岛市的耕地、林地、草地、水域、未利用土地和城乡、工矿、居民用地的比例由2022年的52.88%,9.63%,8.1%,2.87%,0.49%,26.03%,到2033年则变成了46.16%,10.00%,8.96%,2.66%,0.43%,31.79%。2022—2033年期间青岛市土地利用格局继续保持着2011—2022年的变化趋势,总体上表现为城乡、工矿、居民用地仍呈扩张态势,但是没有2011—2022年扩张明显,同时,耕地、水域、未利用土地面积仍不断减少,减少幅度相对降低。

5 结论

近年来,随着经济发展和人类活动的影响,青岛市土地利用格局发生很大变化,科学把握土地利用变化的趋势显得尤为重要,本研究利用Logistic-CA-Markov模型模拟和预测了2022年、2033年的土地利用结构的变化,结果表明:通过对青岛市2011年土地利用类型动态变化进行模拟,验证其模拟精度可达94.27%,接着对2022年、2033年进行了预测,预测结果显示2011—2022年土地利用将继续保持2000—2011年的变化趋势,表现出耕地、水域、未利用土地面积减少,林地、草地以及城乡、工矿、居民用地面积增加。2033年城乡、工矿、居民用地面积仍然增加,但是增加速率明显小于2011—2022年。

由于一些社会经济数据的欠缺,只选取了海拔高度、地形起伏度、距城镇中心的距离、距海岸线的距离、道路密度、人口密度、GDP密度7个因子作为约束条件进行模拟,未考虑更多其他可能的潜在影响因素,如人口数量的快速增长、政府相关的调控政策都会影响青岛市的土地利用格局。因此,在今后的研究

中,要加强对这些潜在影响因子的研究,以及采用更高分辨率的影像,预测结果将会更加准确。

参考文献:

- [1] Yadav V, Malanson G. Spatially explicit historical land use land cover and soil organic carbon transformations in Southern Illinois[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(4): 280-292.
- [2] 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.
- [3] 熊利亚,常斌,周相广. 基于地理元胞自动机的土地利用变化研究[J]. *资源科学*, 2005, 27(4): 38-43.
- [4] Zheng X Q, Zhao L, Xiang W N, et al. A coupled model for simulating spatio-temporal dynamics of land-use change: A case study in Changqing, Jinan, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 51-61.
- [5] Céla G R, Carolina G A, Cássio G C, et al. A multi-agent model system for land-use change simulation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 42(4): 30-46.
- [6] 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.
- [7] Tayyebi A, Pijanowski B C, Tayyebi A H. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: An application to Tehran, Iran[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 100(1/2): 35-44.
- [8] 黎夏,叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机CA及真实和优化的城市模拟[J]. *地理学报*, 2002, 57(2): 159-166.
- [9] 邓祥征. 土地系统动态模拟[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [10] 张显峰,崔伟宏. 集成GIS和细胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J]. *测绘学报*, 2001, 30(2): 148-155.
- [11] 邢容容,刘乐军,马安青. 青岛市1990—2011年土地利用/覆被变化研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 220-225.
- [12] 刘荣,高敏华,谢峰. 基于Logistic回归模型的土地利用格局模拟分析:以新疆吐鲁番市为例[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 74-78.
- [13] 王美霞,任志远,王永明. 千河流域土地利用空间格局模拟及其影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2013, 38(4): 34-36.
- [14] 黎夏,叶嘉安,刘小平,等. 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [15] 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.
- [16] 鄢铁平,廖伟,李璐,等. 丹江口库区土地利用结构与格局优化[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 11-15.
- [17] 吴季秋,俞花美,肖明,等. 基于CA-Markov模型的海湾土地利用动态预测[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(6): 531-539.