

基于 CA-Markov 模型的山东省临沂市土地利用格局变化研究及预测

汪佳莉, 吴国平, 范庆亚, 崔敬涛

(南京大学 地理与海洋科学学院 地理信息科学系, 南京 210093)

摘 要:以山东省临沂市为例,基于 1990 年、2000 年和 2010 年 Landsat TM 影像数据,运用马尔科夫(Markov)转移矩阵及地学信息图谱理论分析 20 a 的土地利用格局变化,并利用 CA-Markov 模型对 2020 年研究区域的土地利用类型进行预测和模拟。结果表明:(1)耕地面积不断减少,但仍为研究区域的基质景观,建设用地面积不断增加,耕地转移成建设用地是土地转移的主要轨迹。(2)耕地—耕地—耕地为代表的稳定型图谱的面积最大,分布最广;反复变化型图谱所占比例较小。(3)2020 年土地利用类型预测结果显示,土地利用格局将保持 1990—2010 年的变化趋势,耕地面积主要转出为建设用地。区域的优势景观仍为耕地,其次为建设用地;林地、水体、草地和未利用地面积变化较小,处在相对动态平衡状态。研究结果为临沂市土地资源社会经济和环境生态协调发展提供了重要的参考依据。

关键词:CA-Markov 模型;临沂市;土地利用;地学信息图谱理论;预测

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)01-0212-05

Change and Prediction of the Land Use in Linyi City, Shandong Province, Based on CA-Markov Model

WANG Jiali, WU Guoping, FAN Qingya, CUI Jingtao

(Department of Geographic Information Science, School of Geography and Oceanography, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract:Based on the data of Landsat TM images in 1990, 2000 and 2010 of Linyi City, Markov transition probability matrix and geo-information TUPU theory were used to analyze the change of land use pattern in the past 20 years in Linyi City. By the CA-Markov model, the change of landscape pattern of Linyi City in 2020 was predicted. The results could be listed as follows. Firstly, although area of farmland kept decreasing, it still was dominant pattern of landscape in Linyi City. The area of construction land kept increasing, and shift of farmland to construction land was the main change trace. Secondly, farmland-farmland-farmland was the greatest area change of stable type atlas, which occupied largest area and widely spatial distributed. The area of repeated change type atlas was the smallest, which distributed sporadically. Lastly, the results of prediction in 2020 showed that the farmland would be the main source of land shift as before, which would be mainly converted to the construction land. The dominant pattern of landscape would be still farmland, and construction land would become the more important pattern of landscape. The area of woodland, waters, grassland and wasteland might have small changes, which could keep dynamic balance statues relatively. The results can provide the scientific basis for sustainable development of land and the balance between economy and ecology in Linyi City.

Keywords:CA-Markov model; Linyi City; land use; geo-information TUPU theory; prediction

土地利用/土地覆盖变化(LUCC)是目前地理学研究的前沿问题之一,全球城市化引起 LUCC 变化将导致经济、社会和生态发生变化,并使之成为全球变化和可持续发展研究的核心和热点^[1-2]。由于 LUCC 过程错综复杂,因而以简单抽象为特征的这类模型对于理解和预测 LUCC 的格局和过程有着不可替代的作用^[3]。近年来,不少学者用 CA-Markov 模

型来研究 LUCC^[4-5],该模型综合了 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,既提高了土地利用类型转化的预测精度,又可以有效地模拟土地利用格局的空间变化,具有较大的科学性与实用性^[6]。地学信息图谱理论可用于不用时期同一区域城市化过程中 LUCC 变化情况,并揭示其空间格局特征和演变过程^[7]。临沂市土地利用

收稿日期:2014-04-18

修回日期:2014-05-11

第一作者:汪佳莉(1990—),女,浙江杭州人,硕士研究生,研究方向:地理信息系统在土地规划中的应用。E-mail:wangruiqi20069@163.com

通信作者:吴国平(1964—),男,博士,副教授,主要研究 GIS 与遥感、国土资源学、数字地球和地理建模等方面的研究。E-mail:wood2258@qq.com

景观格局及土地适应性评价等方面的研究已有不少^[8-9],但土地利用格局的相关分析几乎没有。临沂市作为传统的农业大市,经济发展起点较低,发展潜力较大,近年来该市人口快速增长,城市化水平迅速提高,随着城乡统筹战略的实施,该市 2009 年的土地利用总体规划中预计到 2020 年城镇化率将从 2005 年的 40% 提高到 63%,在经济高速发展及快速城镇化的进程中,其土地利用格局必然发生巨大的变化。为准确了解临沂市土地资源变化信息和趋势,本文利用马尔科夫(Markov)转移矩阵及地学信息图谱理论对 1990—2010 年临沂市土地利用格局变化进行分析,并利用 CA-Markov 模型预测该区域 2020 年土地利用变化趋势,以期制定更科学、有效的土地利用管理策略提供借鉴,这对今后合理利用土地和配置土地资源,缓解人地矛盾,促进社会经济可持续发展具有十分重要的理论和实践意义。

1 研究区域概况

临沂市位于山东省东南部,南接江苏徐州、连云港,东临日照,西靠枣庄、济宁、泰安,北与淄博、潍坊接壤,辖区总面积为 17 184 km²,为山东省面积最大的城市。临沂市西北部为山地丘陵,地势起伏;东南部为平原,地势平坦。四季分明,气候为暖温带大陆性季风气候。全市共辖 3 区 9 县。主要研究区域为临沂市辖区,即河东区、兰山区、罗庄区,占全市总面积的 11.8%。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

本文主要采用 Landsat5 TM 和 Landsat7 ETM+ 传感器数据,分别获取 1990 年、2000 年和 2010 年 3 期中无云或少云、清晰度较高月份的遥感影像图。对获得的遥感数据在分别进行大气校正、地形校正等处理后,结合 2011 年黄河流域 1:100 万交通数据库以及由临沂市国土资源局提供的研究区 2010 年 1:50 000 土地利用现状图,采用监督分类和目视解译相结合的方法行分类,解译所得数据的精度均大于 85%,满足本文研究需要。根据国家质量监督检验检疫总局和国家标准化委员会联合颁布的《土地利用现状分类》,结合临沂市的区域特点及研究目的,将土地类型分为耕地、草地、林地、水体、建设用地、未利用地 6 大类。

2.2 CA-Markov 模型

马尔科夫(Markov)预测法是一种基于马尔科夫链,根据事件目前状况预测将来各个时刻(或时期)变动状况事件发生概率的方法。土地利用变化过程可视为马尔科夫(Markov)过程,其状态转移过程无后

效性。土地利用类型之间相互转换的面积数量或比例为状态转移概率,可用如下公式对土地利用状态进行预测:

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \quad (1)$$

式中: $S_{(t)}$, $S_{(t+1)}$ —— t , $t+1$ 时刻土地利用结构的状态; P_{ij} ——状态转移矩阵。

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$0 \leq P_{ij} < 1 \text{ 且 } \sum_{j=1}^N P_{ij} = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3, \cdots, n)$$

元胞自动机模型(Cellular Automata,简称 CA)是时间、空间、状态都离散,且空间的相互作用及时间上的关系皆为局部的网格动力学模型^[10],其计算原理为散布在规则格网中的每个元胞取有限的离散状态,遵循同样的作用规则、确定的局部规则作同步更新,每个变量只取有限的状态,且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的。其公式表示如下^[11]:

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (3)$$

式中: S ——元胞有限离散的集合状态; t , $t+1$ ——不同的时刻; N ——元胞的邻域; f ——局部空间的元胞转化规则。

Markov 模型与 CA 模型均为时间和状态离散的动力学模型,但 Markov 无法预测空间变量,而 CA 的状态变量则与空间位置紧密相连^[12]。CA-Markov 模型不仅具有 Markov 模型预测数量上的优势,同时也具备了 CA 模型模拟复杂系统时空动态演变的能力^[13],故将两种模型结合能有效地模拟土地利用格局的空间变化。

土地利用的模拟预测分析主要通过 IDRISI 软件中的 Markov 模块和 CA-Markov 模块进行。首先利用 Markov 模块计算 1990—2000 年,2000—2010 年转移概率矩阵,后确定元胞大小(30 m×30 m)、CA 滤波器大小(5×5)、CA 循环次数(10)等参数,在此基础上以 2000 年为初始时刻通过 CA-Markov 模块模拟得到 2010 年临沂市土地利用类型分布图。再经 ArcGIS 9.3 中的栅格减运算得到土地利用模拟一致、非一致图。最后运用 IDRISI 中 CROSSTAB 模块计算各地类的 Kappa 指数。

2.3 土地利用信息图谱

土地利用/土地覆被变化格局的基本单元,即图谱单元,是记录时空复合信息的基本单元^[14],土地利用/土地覆被变化信息图谱的生成包括时间、空间、属性、过程一体化数据合成和提取及模式概括等过程^[14]。本文利用地学信息图谱理论,借助 ArcGIS

9.3 的叠置分析建立 1990—2000—2010 年土地利用格局变化图谱,每个图谱单元记录 1990 年、2000 年和 2010 年土地利用单元类型,反映 20 a 间土地利用变化的演变历程,为了直观地反映土地利用时空变化规律,将图谱变化模式概括为 5 种类型即:(1) 稳定型:在 1990—2000—2010 年都保持不变;(2) 前期变化型:在 1990—2000 年发生变化,2000—2010 年未发生变化;(3) 后期变化型:在 1990—2000 年未发生变化,2000—2010 年发生变化;(4) 反复变化型:在 1990—2000 年变为一种类型,在 2000—2010 年又变回原来类型;(5) 持续变化型:在 1990—2000—2010 年一直变化,且未还原成原来类型。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化矩阵分析

利用 IDRISI 中的 Markov 模块分析 1990 年、2000 年和 2010 年的数据。由表 1 分析可知,该区域土地利用总体结构以耕地为主,面积比例从 67.56% 降至 54.04%,均超过 50%,占据优势地位,是土地利用格局的基质景观,其次是建设用地和林地,水体、未利用地及草地所占比例较小,表明该区域以第一产业生产为主,符合当地的经济和社会特征。

从表 2、表 3 可知,净增面积比例最大为建设用地,大量的新增建设用地主要由耕地转入,耕地转移成建设用地的状态转移概率较大,均超过 0.2。表明耕地转移成建设用地是主要的土地转移轨迹。未利

用地呈递减态势,从 1990 年的 953.64 hm² 下降至 2010 年的 483.66 hm²。1990—2000 年末利用地减少面积为 367.38 hm²,主要转移为耕地,其状态转移概率为 0.32;2000—2010 年末利用地主要转出为建设用地,状态转移概率高达 0.33。未利用地转移轨迹在这 20 a 间发生了显著变化,从前 10 a 主要流向耕地,到后 10 a 主要流向建设用地,反映了土地需求类型的转变。未利用地包括沼泽、湿地等具有生态调节功能的用地,因此未利用地的减少会加剧生态环境的恶化。林地面积呈下降趋势,转出面积主要流入耕地,20 a 间的转移概率均高于 0.19,在人口增长和经济利益的驱动下,不少林地被开垦为耕地。耕地转移为林地的状态概率有所上升,从 1990—2000 年的 0.000 2 上升到 2000—2010 年的 0.028 4。主要由于政府的“退耕还林”政策的见效及人们生态保护意识的增强。草地的面积先增后减,但 2010 年草地面积较 1990 年仍增加了 4.44%。1990—2010 年新增草地面积主要由未利用地转入,状态转移概率为 0.065 8。2010—2020 年净增草地面积主要由耕地转入,这与政府的“退耕还草”政策的实施有关。在城市化的推动下,草地转出面积也主要流向建设用地,转移概率均高于 0.18。水体面积持续增加,尤其是 2000—2010 年这 10 a,增幅高达 7.77%。主要归结于政府从 2006 年可开始积极推进的水源保护区的建设,交通水利用地的规划,河道疏通、六大灌区改造、农田水利基本建设等工程。

表 1 1990 年、2000 年、2010 年临沂市各类型土地面积变化

土地利用 类型	1990 年		2000 年		2010 年		面积变化	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	1990—2000 年/%	2000—2010 年/%
建设用地	38209.41	16.67	53098.56	23.17	72336.15	31.56	38.97	36.23
耕地	154846.89	67.56	143233.11	62.49	123861.33	54.04	−7.50	−13.52
未利用地	953.64	0.42	586.26	0.26	483.66	0.21	−38.52	−17.50
林地	24673.68	10.77	21563.82	9.41	21119.31	9.21	−12.60	−2.06
水体	9716.85	4.24	9802.71	4.28	10564.83	4.61	0.88	7.77
草地	792.18	0.35	908.19	0.40	827.37	0.36	14.64	−8.90

表 2 1990 年、2000 年临沂市土地利用转移概率矩阵

土地利用 类型	2000 年					
	建设 用地	耕地	未利 用地	林地	水体	草地
建设 用地	0.8321	0.1232	0.0050	0.0358	0.0033	0.0005
耕地	0.2020	0.7642	0.0002	0.0002	0.0028	0.0025
未利 用地	0.0976	0.3171	0.4674	0.0517	0.0003	0.0658
林地	0.1335	0.1939	0.0011	0.6689	0.0011	0.0015
水体	0.0248	0.0900	0.0000	0.0456	0.8385	0.0011
草地	0.1892	0.0346	0.0136	0.0518	0.0008	0.7100

表 3 2000 年、2010 年临沂市土地利用转移概率矩阵

土地利用 类型	2000 年					
	建设 用地	耕地	未利 用地	林地	水体	草地
建设 用地	0.7910	0.1570	0.0046	0.0429	0.0030	0.0015
耕地	0.2563	0.7026	0.0013	0.0284	0.0109	0.0109
未利 用地	0.3289	0.1429	0.3454	0.1310	0.0349	0.0169
林地	0.0876	0.2013	0.0040	0.7034	0.0034	0.0003
水体	0.0881	0.0279	0.0002	0.0416	0.8272	0.0150
草地	0.1972	0.0906	0.0109	0.0236	0.0000	0.6777

3.2 土地利用信息图谱分析

(1) 稳定型图谱单元在各类变化模式图谱单元中所占比例最大,空间上散布于整个研究区域,其中耕地—耕地—耕地这个变化模式面积为 115 453.70 hm²,占稳定型图谱面积的 65.48%,表明该区域主要以农业生产为主;建设用地—建设用地—建设用地次之,占稳定型图谱面积的 19.78%,由于研究区域为临沂市市区,是传统的城市经济、商贸物流、历史和行政中心(表 4)。

(2) 后期变化型为面积第二大图谱单元,变化面积为 30 492.20 hm²,占研究区的 13.30%,分布在中心城区的周边,主要沿沂河、沭河,具有滨水特色。该独具特色的城市空间形态使得临沂市发展模式有别于其他城市。其中耕地—耕地—建设用地面积是最大的图谱变化,占后期变化型图谱面积的 67.44%,城镇化逐圈推进导致中心城区周边耕地被城镇化。不少耕地被建设成高新区和工业园区,如位于河西的

罗庄工业区、高新技术开发区等。林地—林地—耕地次之,临沂市人口由 1990 年 162.7 万增长到 2010 年的 210.9 万,人口激增导致粮食需求的增加,致使人们开垦林地,加速区域生态环境的恶化。

(3) 前期变化型图谱面积为 19 836.85 hm²,其面积最大变化图谱为耕地—建设用地—建设用地,主要分布在沭河上游及中心城区周边,反映了在早期城镇化进程中,离中心城区最近的耕地最先被城镇化。

(4) 持续变化型和反复变化型所占的面积较少,分布零星。持续变化型的最大变化图谱为林地—耕地—建设用地,从林地变更到建设用地,土地产出率也随之提高,说明人们不顾生态环境质量恶化,片面追求经济效益。分布零散主要由于新增的建设用地布局散乱缺乏规划。反复变化型的最大变化图谱为耕地—建设用地—耕地,这主要得利于土地复垦政策的落实,即将曾占用耕地的废弃工矿用地整治后再次恢复成耕地。

表 4 1990—2010 年土地利用变化图谱分析

图谱变化 类型	图谱单元 面积/hm ²	图谱单元占 总面积%	最大变化		
			最大图谱演变类型	面积/hm ²	占各图谱变化类型面积/%
稳定型	176318.36	76.93	耕地—耕地—耕地	115453.70	65.48
前期变化型	19836.85	8.66	耕地—建设用地—建设用地	12451.02	62.77
后期变化型	30492.20	13.30	耕地—耕地—建设用地	20565.00	67.44
反复变化型	970.08	0.42	耕地—建设用地—耕地	766.29	78.99
持续变化型	1573.47	0.69	林地—耕地—建设用地	742.13	47.17

3.3 土地利用类型变化预测

Markov 模型作为 CA-Markov 模型的重要组成部分,要求预测对象具有马尔科夫过程特性^[16],即土地利用变化呈现某种变化趋势的平稳性过程,而事实上临沂市土地利用会因自然或人为因素发生突发性变化。因此采用 CA-Markov 模型时为避免造成长期预测时产生较大的误差和不确定性,不能盲目或随意地扩大预测时间的步长^[17]。

本文将 2020 年这一年份作为临沂市土地利用变化预测年份,根据预测,2020 年研究区域的耕地、建设用地、林地、水体、未利用地、草地的面积分别为 108 831.87,87 308.01,20 700,11 212.11,405.45,735.21 hm²。通过对比分析可知,2010—2020 年,土地利用格局保持 1990—2010 年的变化趋势,即建设用地持续增加,耕地持续减少。其中耕地仍为基质景观,占总面积的 47.48%,建设用地面积占 38.09%,成为重要的土地类型。景观类型占整个景观面积的比例,在相对意义上给出了景观类型对整个景观的贡献率^[18]。说明在 2020 年临沂市仍以农业景观为主,但建设用地对整个景观贡献率较大,城镇化进程显

著。在所有土地利用的转化过程中,耕地转化成建设用地为最主要转化轨迹。林地、草地和未利用地减少面积不多,各地类的相互转化量相对较小,基本保持稳定,处于动态平衡状态中^[4]。水体面积仍有所增加。总之,随着城镇化的推进,临沂市将面临资源制约日益突出,耕地保护与建设用地短缺之间的矛盾加剧等问题,提高土地利用效率,转变土地利用和管理方式是不可回避的客观要求。

3.4 土地利用模拟精度分析

由表 5 可以看出,Kappa 较高,各类土地的模拟效果较好。建设用地、耕地、林地、水体的 Kappa 指数均高于 0.75,说明这 4 种类型的土地预测模拟效果很好;草地的 Kappa 指数略低于 0.75,远高于 0.4,其预测模拟尚佳;未利用地的 Kappa 指数较低,但也高于 0.4,表明未利用地的预测模拟效果一般。采用全数检验法检验模拟的总体精度,将 2010 年的解译结果与模拟结果进行栅格减运算,发现模拟一致的栅格数占总栅格数的 83.18%,即模拟总体精度为 83.18%,反映了该模拟结果可信度较好,CA-Markov 预测的土地利用类型具有较好的可信度和适用度。

表 5 2010 年临沂市各土地利用类型实际栅格与模拟栅格

土地利用 类型	2010 年模拟 栅格数	2010 年实际 栅格数	Kappa 指数
建设用地	849724	803735	0.7563
耕地	1349591	1376237	0.7848
未利用地	6654	5374	0.4220
林地	232299	234659	0.7969
水体	97716	117387	0.8087
草地	10601	9193	0.7449

4 结论与讨论

本文以临沂市为例,在 1990 年、2000 年、2010 年 3 期遥感解译数据的基础上,借助 Markov 转移矩阵及地学信息图谱理论,研究该区域的土地利用变化及空间格局演变。最后采用 CA-Markov 模型对 2020 年临沂市土地利用数量和空间分布进行预测。

临沂市耕地面积虽不断减少,但一直为基质景观,土地利用结构以耕地为主,其次是建设用地。建设用地净增面积主要由耕地转入。从土地利用格局的图谱变化中也可看出耕地转移成建设用地是主要的变化模式。两者均反映了该区域产业结构的调整及城镇化进程持续推进,耕地保护与建设用地供给压力增大。利用 CA-Markov 模型对 2020 年土地利用格局预测结果显示,耕地面积将占总面积的 47.48%,建设用地将占 38.09%,土地利用结构仍以耕地和建设用地为主,耕地转移为建设用地是土地转移的主要轨迹,耕地与建设用地的需求空间矛盾日益突出,虽城市化建设成效显著,但建设用地布局分散、集聚效益不明显。林地、未利用地、草地等具有生态调节作用的土地面积不断减少,生态环境面临挑战。根据上述研究结论提出以下建议:

有关部门应合理规划建设用地,通过控制新增规模特别是占耕地规模来控制建设用地的过度扩张,促进土地利用模式创新和土地利用效率的提高。以土地供应的硬约束来促进经济发展方式的根本转变。同时加快废弃矿山、采煤塌陷、挖损压占等废弃土地的复垦,建设基本农田集中区,推动农业集约化、现代化和产业化。调整优化建设用地布局,推动工业园区和经济开发区的集聚与整合,促进产业集聚发展,积极盘活存量建设用地,加强城镇闲散用地整合,全面提高建设用地集约利用水平。另外也应因地制宜地发展园地、林地,加快建设以森林、草地和基本农田等为主体的土地生态安全屏障,协调居民点、农田、林地、草地、水体等用地的配置,逐步形成结构合理、功能互补的土地利用生态空间格局。

参考文献:

- [1] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆盖变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553-557.
- [2] 俞龙生, 符以福, 喻怀义, 等. 快速城市化地区景观格局梯度动态及其城乡融合区特征: 以广州市番禺区为例[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 171-180.
- [3] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/土地覆盖变化研究的方法和实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 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.
- [5] 张旭. 基于 CA-MARKOV 模型的甘南州土地利用利用预测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [6] 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.
- [7] 李小英, 彭望球, 曹彤. 土地利用演化信息图谱的研究: 北京市顺义县为例[J]. 地球信息科学, 2002, 4(2): 55-60.
- [8] 范庆亚, 吴国平, 马庆申, 等. 基于 GIS 的临沂市土地利用景观格局梯度分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 230-234.
- [9] 刘忠秀, 谢爱良. 区域多目标土地适宜性评价研究: 以临沂市为例[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 176-181.
- [10] Courage Kamusoko, Masamu Aniya, Bongo Adi, et al. Rural sustainability under threat in Zimbabwe: Simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model[J]. Applied Geography, 2008, 29(3): 1-13.
- [11] 韩玲玲, 何政伟, 唐菊兴, 等. 基于 CA 的城市增长与土地增值动态模拟方法探讨[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(2): 32-35.
- [12] 赵建军, 张洪岩, 乔志和, 等. 基于 CA-Markov 模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 216-222.
- [13] 凌成星, 鞠洪波, 张怀清, 等. 基于 CA-MARKOV 模型的北京湿地资源变化预测研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 262-269.
- [14] 叶庆华. 黄河三角洲土地利用/土地覆被变化的时空复合分析[D]. 北京: 中国科学院, 2001.
- [15] 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(4): 216-222.
- [16] 黎夏, 刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟[J]. 地理学报, 2007, 62(10): 1097-1109.
- [17] 韩文权, 常禹. 景观动态的 Markov 模型研究: 以长白山自然保护区为例[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1958-1965.
- [18] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data [J]. Nature, 1981, 294(5838): 240-242.