·农业整理工程·

山东沿海地区土地利用和景观格局变化

吴　莉[1,2]，侯西勇[1※]，徐新良[3]，邱向红[1,2]

（1. 中国科学院烟台海岸带研究所，烟台 264003　2. 中国科学院研究生院，北京 100049；
3. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101）

摘　要：为分析和预测山东省沿海区域土地利用和景观格局变化，该文将景观格局指数作为评价土地利用变化模拟模型的基本指标；基于 RS 和 GIS 技术分析 2000－2010 年土地利用和景观格局的变化特征，并尝试 CA-Markov 模型预测土地利用变化，发现其在景观格局预测方面的不足，因而探索和提出 Spatial-Markov 模型，该模型不仅适合于土地利用变化模拟，也适合于景观格局过程分析。具体包括：1）基于 2000、2005 和 2010 年的 Landsat 影像进行土地利用分类，分析 10 a 间土地利用和景观格局的变化特征，表明：耕地面积不断减少，城镇和农村居民点用地不断扩张而占用大量耕地，草地等又不断开垦为耕地；区域景观格局破碎化趋势显著，人为干扰加剧，各种景观类型的分布向均匀化发展；2）基于 Logistic-CA-Markov 模型，以 11 个变量、2000 和 2005 年土地利用分类图为基础，模拟的 2010 年土地利用图与观测值相比较，虽然得到的 Kappa 系数较高（0.8530），但难以支持对景观格局特征的预测和分析；3）提出 Spatial-Markov 模型，基于 2000 和 2005 年土地利用分类图模拟 2010 年土地利用，模拟结果的 Kappa 系数高达 0.8872，且景观格局指数也与观测值非常接近，因此，选择该模型预测 2015 和 2020 年的土地利用和景观格局；4）预测结果表明，2010－2020 年间耕地面积将继续减少，城镇、农村居民点将继续保持快速增长的态势；景观尺度除了分形维数，其他指数保持 2000－2010 年间的变化趋势，而在类型尺度，除水域和未利用地外，各种景观类型多个景观指数将总体保持原有的变化趋势。该研究可为山东沿海区域土地利用规划提供参考，并为土地利用预测研究提供了一种新的方法。

关键词：土地利用，景观格局，模型，山东沿海区域
doi：10.3969/j.issn.1002-6819.2013.05.028
中图分类号：S159　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-6819(2013)-05-0207-10

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．
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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 207－216. (in Chinese with English abstract)

0　引　言

“国际地圈与生物圈计划”（IGBP）和“全球环境变化人类因素计划”（IHDP）两大国际组织于 1995 年联合提出“土地利用/土地覆盖变化（land use/cover change, LUCC）科学研究计划”[1]，推动土地利用变化研究成为全球变化研究的前沿和热点。土地利用/覆盖变化作为全球变化的重要组成部分和主要原因之一，可对生态环境产生影响[2-4]，如气候、生物多样性和水环境变化等，并进而对经济社会发展产生显著的影响作用。因此，分析土地利用变化特征并对其未来发展态势进行情景分析和模拟预测具有重要意义。目前已有多种土地利用预测的空间模型得到发展和应用，例如：CLUE[5]，CLUE–S[6-9]，SLEUTH[10-11]，神经网络[12-13]、元胞自动机[14]、CA-Markov[15-17]等。然而目前存在的空间直观模拟模型多需要输入大量的自然、社会、经济数据进行驱动力分析，数据获取成本高，模型掌握难度大[18]。土地利用变化影响地表的各种景观过程[19]，而景观变化亦是土地利用变化的最直观标志[20]。随着研究的深入，景观格局分析方法已被广泛引入到土地利用变化研究中，通过计算景观格局指数来获取景观的结构组成特征、空间格局特征和时间演化特征，以及将景观格局指数作为衡量 LUCC 模型性能的标准之一[21-22]。本文拟分析山东沿海区域 2000－2010 年间土地利用和景观格局的变化特征，并通过模型模拟和分析其未来态势：在尝试 Logistic-

收稿日期：2012-09-15　　修订日期：2013-02-22
基金项目：中国科学院知识创新工程重要方向项目（kzcx2-yw-224）；中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题（XDA05130703）；国家自然科学基金项目（40801016）。
作者简介：吴　莉（1987－），女，山东菏泽人，博士生，主要研究方向：海岸带土地利用/覆盖变化。烟台　中国科学院烟台海岸带研究所，264003。Email：lwu@yic.ac.cn
※通信作者：侯西勇（1975－），男，山东泰安人，研究员，博士生导师，主要从事海岸带土地利用/覆盖变化、海岸带综合管理方面的研究。烟台　中国科学院烟台海岸带研究所，264003。Email：xyhou@yic.ac.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

CA-Markov 模型的同时，探索和提出 Spatial-Markov 模型，并基于 2000 和 2005 年土地利用数据，分别运用 2 个模型模拟 2010 年的土地利用，利用 Kappa 系数和景观格局指数评价模拟结果和比较模型性能；在此基础上，选择模拟精度高的模型预测 2015 和 2020 年的土地利用和景观格局，以更准确地揭示景观格局的发展态势。

1 研究方法

1.1 Markov 模型

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[23]。在土地利用变化研究中，土地利用类型对应 Markov 过程中的“可能状态”，而类型之间相互转化的面积数量比例即为状态转移概率，可基于如下公式[24]进行预测：

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} \times P \tag{1}$$

式中，$S_{(t)}$，$S_{(t+1)}$分别是 t、t+1 时刻的系统状态；P 表示状态转移概率矩阵，如下：

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\left(0 \le p_{ij} \le 1, \sum_{j=1}^{n} p_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, ..., n)\right)$$

式中，n 为土地利用类型数目；p_{ij} 表示土地利用类型由 t 时刻的 i 转向 t+1 时刻 j 的概率。

1.2 Logistic-CA-Markov 耦合模型

1.2.1 元胞自动机模型

元胞自动机（cellular automata, CA）是具有时空计算能力的动力学模型，其特点是时间、空间、状态都离散，每个变量都只有有限多个状态，而且状态改变的规则在时间和空间上均表现为局部特征。CA 最基本的组成是元胞、元胞空间、邻居及规则，可将其视为由一个元胞空间和定义于该空间的变换函数所组成[25]：

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

式中，S 表示元胞有限、离散的状态集合；N 表示元胞的邻域；t，t+1 表示不同的时刻；f 表示局部空间元胞状态的转化规则。

1.2.2 Logistic 回归模型

本文采用 Binary Logistic 回归方程构建各土地利用类型的空间分布适宜图，其公式为：

$$\log_e\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \cdots b_nx_n \tag{4}$$

其中，P_i 表示每个栅格可能出现土地利用类型 i 的概率，$x_1, x_2, \ldots, x_n$ 表示驱动因素。运用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及其定量关系。通常采用 ROC 方法[26]检验回归方程的解释能力。

1.2.3 Logistic-CA-Markov 模型模拟过程

Markov 模型与 CA 模型均为时间离散、状态离散的动力学模型。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。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[17]，Logistic 回归方法则可用来定义 CA 的转换规则，三者结合从而形成 Logistic-CA-Markov 模型。

1.3 Spatial-Markov 模型

1.3.1 Spatial-Markov 模型的初始状态矩阵

基于 GIS 空间分析技术，将研究区划分为某一空间尺度（如，500 m×500 m）的规则格网，统计每一个格网中某一时期每一种土地利用类型的分布面积，从而将土地利用数据由单一矢量图层转化为多个栅格图层，即 Spatial-Markov 模型的初始状态矩阵。以 t_0（如，2000 年）时刻为例：

$$A_{t0} = (a_1 \ \ a_2 \ \ \cdots \ \ a_n) \tag{5}$$

式中，a_1、$a_2 \ldots a_n$ 为栅格图层，分别对应土地利用类型 1、2 ... n，记录该土地利用类型在所指定的空间尺度规则格网中的分布面积。

1.3.2 Spatial-Markov 模型的状态转移概率矩阵

将 t_0 与 t_1（如，2000 与 2005 年）2 个时相的土地利用矢量数据进行叠加，统计每个格网中土地利用状态转移的面积，计算转移比例，得到空间化的转移概率矩阵。在单个格网中的计算公式如下：

$$P_{ij} = \begin{cases} a_{ij}/a_i & (a_i \ne 0) \\ 0 & (a_i = 0, i \ne j) \\ 1 & (a_i = 0, i = j) \end{cases} \tag{6}$$

式中，P_{ij} 为某格网中土地利用类型 i 转化为 j 的概率，a_i 为 t_0 时刻土地利用类型 i 在该格网中的分布面积，a_{ij} 为 t_0-t_1 期间土地利用类型 i 转变为 j 的面积。

1.3.3 Spatial-Markov 模型的模拟

参照公式（1），基于 Spatial-Markov 初始状态矩阵和转移概率矩阵，可对未来状态进行模拟和预测。与传统 Markov 模型不同，Spatial-Markov 模型的计算过程必须借助于 GIS 中的栅格计算功能，而且其直接输出结果是类似于 A_{t0} 的多层栅格数据，每个栅格图层记录一种土地利用类型在所指定空

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间尺度规则格网中的分布面积。为了得到常用的、由名义尺度数据表达的土地利用分布数据，可通过最大值合成法（maximum value composite）转换模拟结果。

1.4　精度评价

空间直观模拟模型的验证方法包括视觉验证、逐点对比和整体对比等。视觉验证方法简单、直观，但主观性强[27]。逐点对比方法是将模拟结果和观测值进行叠置，逐像元比较计算混淆矩阵与 Kappa 系数。一般认为，Kappa>0.8 为模拟效果极好，0.6～0.8 为模拟效果较好，0.4～0.6 为模拟结果可接受，0.2～0.4 为模拟效果较差，0～0.2 为模拟效果极差[28]。近年来，为了在空间格局方面检验模拟结果与实际的符合程度，整体对比的方法被逐渐使用，如计算空间自相关程度[29-31]或景观格局指数[32-33]等。本文在景观水平选取斑块数（NP）、平均斑块面积（MPS）、分形维数（PAFRAC）、蔓延度（CONTAG）、聚集度（AI）、最大斑块指数（LPI）、香农多样性指数（SHDI）和香农均匀度指数（SHEI），在类型水平选取 NP、MPS、PAFRAC 和 AI，计算 2 个模型模拟结果的景观指数值，并与观测值之间进行比较计算偏离度，将其与 Kappa 系数作为模拟结果评价和模型对比的依据。

2　研究区与数据

2.1　研究区概况

山东沿海区域包括滨州、东营、潍坊、烟台、青岛、威海和日照（图 1），土地总面积约 69 087 km^2，地理范围介于 117°36′E～122°42′E 与 34°59′N～38°24′N 之间；海岸线长达 2 552 km，约占全国的 16%。

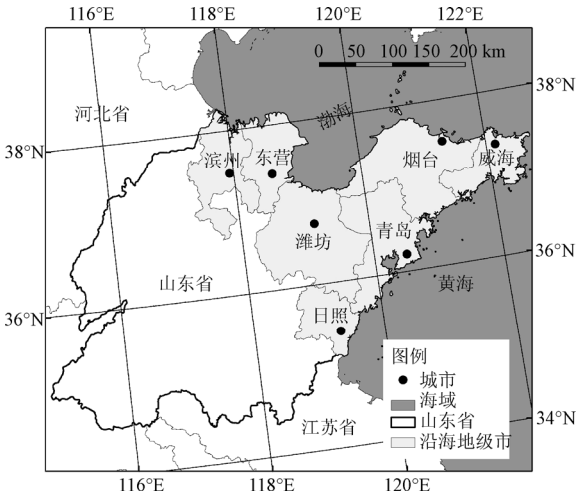


图 1　山东沿海区域位置图

Fig.1　Location of coastal areas in Shandong province, China

2.2　数据来源与处理

综合考虑山东省沿海区域土地资源开发、利用和保护的历史与现状特征，将土地利用分为耕地、林地、草地、水体、城镇、农村居民点、交通工矿、未利用地 8 个类型。在 ArcGIS 软件中，基于 2000、2005 和 2010 年的 Landsat TM/ETM+影像，参照 DEM、坡度等信息，目视解译获得 2000、2005 和 2010 年土地利用空间分布的矢量数据，解译结果比例尺达 1∶10 万。

Logistic 回归分析选取气候、地形和距离 3 大类 11 个参数作为驱动因子，包括：多年平均降雨、多年平均气温、高程、坡度、坡向、到城镇距离、到公路距离、到铁路距离、到河流距离、到海岸线距离、到高速公路距离。其中，降雨和气温是基于多年平均的气象站监测数据通过克里格方法进行空间插值得到；DEM 数据为 SRTM 共享信息，并据其生成坡度和坡向数据；其他因子数据是在 1∶50 万基础地理信息的基础上通过 GIS 空间分析而得到。

Logistic-CA-Markov 模型需要基于栅格类型的土地利用数据和驱动因子数据，因此将土地利用矢量数据以及 11 个土地利用变化的驱动因子转换为 IDRISI 软件所识别的 RST 格式的栅格数据，栅格大小为 500 m×500 m。

3　结果与分析

3.1　2000-2010 年土地利用与景观格局变化分析

3.1.1　土地利用变化特征

分析 2000、2005 和 2010 年的土地利用结构特征（图 2）以及不同时段类型间的转移特征，如下：1）2000－2010 年间耕地比重大于 60%，是区域景观的基质；2000－2005 年间耕地主要流向城镇与农村居民点，2005 年之后耕地的流失速率加剧，主要转变为草地、农村居民点和交通工矿用地。2）草地面积居第二位，亦呈不断减少趋势，主要流向耕地、城镇和农村居民点。3）林地面积仅次于草地，约占总面积的 6.7%；10 年间，林地面积增加约 47.75 km^2。4）水域约占区域总面积的 4%，但比例不断下降；2000－2005 年间，水域向交通工矿和未利用地转移的面积较大；2005－2010 年间，水域主要转向耕地和交通工矿。5）城镇与农村居民点面积飞速增长，2010 年城镇和农村居民点面积分别为 2000 年的 1.55 和 1.35 倍；城镇扩展主要表现为对周围耕地和农村居民点的侵占，而农村居民点的扩展主要来源于对耕地和草地的侵占。6）交通工矿面积加速上升，主要来源于对耕地、草地、水域和未利用地的占用。7）未利用地面积

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

比例较低，且不断减少，主要转化为耕地、水域和交通工矿。

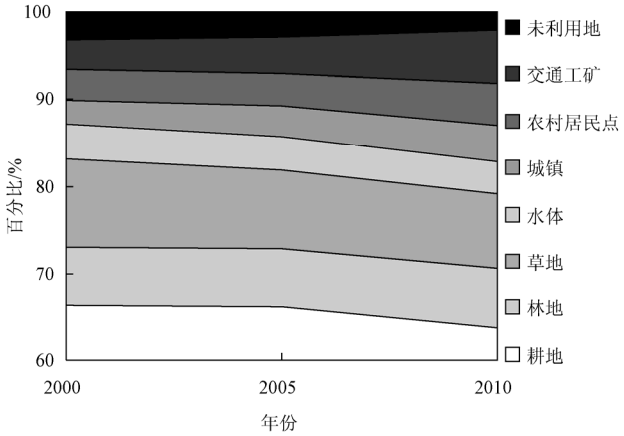


图 2 2000－2010 年间土地利用结构变化

Fig.2 Changes of land use structure from 2000 to 2010

3.1.2 景观格局变化特征

计算景观水平上的指数，如表 1。2000－2010 年间变化特征如下：1）景观斑块数呈上升趋势，平均斑块面积降低，景观向着破碎化的方向发展；2）分维数下降，景观形状趋于简单，人为干扰加剧；3）聚集度指数和蔓延度指数不断下降，相同斑块类型的聚集程度越来越低，而不同斑块类型的团聚程度越来越高；4）景观多样性指数和均匀度指数平稳增加，最大斑块指数呈减小趋势，标志着区域各景观类型的分布向均匀化发展；5）单一景观优势度减弱，也是耕地和林地面积减少、城镇和农村居民点面积大量增加的直接反映。

表 1 2000－2010 年间景观水平景观指数变化

Table 1 Landscape metrics at landscape level from 2000 to 2010

年份	NP/个	MPS/hm^2	PAFRAC	CONTAG/%	AI/%	LPI/%	SHDI	SHEI
2000	14 864	463.31	1.4731	51.28	76.69	64.66	1.2568	0.6044
2005	14 908	462.07	1.4726	50.66	76.40	64.50	1.2731	0.6122
2010	16 059	429.79	1.4699	48.53	75.45	54.62	1.3329	0.6410

注：NP、MPS、PAFRAC、CONTAG、AI、LPI、SHDI、SHEI 分别表示斑块数、平均斑块面积、分形维数、蔓延度、聚集度、最大斑块指数、香农多样性指数、香农均匀度指数，下同。

计算类型水平上的指数，如表 2。2000－2010 年间变化特征如下：1）耕地斑块数不断增加，平均斑块面积锐减，聚集度降低、分形维数增高；2）草地斑块数及平均斑块面积下降，分形维数升高，聚集程度降低；3）林地斑块数波动下降，平均斑块面积略微升高，分形维数和聚集度增高；4）水体和未利用地斑块数、平均斑块面积、分形维数及聚集度均下降；5）城镇和农村居民点的平均斑块面积、分形维数和聚集度均不断增加，但城镇斑块数不变，而农村居民点斑块数先减后增，城市化及相邻农村居民点的合并可能是农村居民点斑块减少的原因；6）交通工矿斑块数先减后增，平均斑块面积基本不变，分形维数与聚集度均增加。

表 2 2000－2010 年间景观类型尺度景观指数变化

Table 2 Landscape metrics at class level from 2000 to 2010

类型指数	年份	耕地	林地	草地	水体	城镇	农村居民点	交通工矿	未利用地
NP/个	2000	690	2111	2659	1355	786	6166	388	709
	2005	737	2099	2642	1414	781	6076	464	695
	2010	782	2103	2594	1354	783	7108	693	642
MPS/hm^2	2000	6 616.96	218.72	260.30	206.16	239.38	39.43	604.06	313.15
	2005	6 175.75	219.97	237.45	184.32	311.24	42.40	615.03	289.57
	2010	5 628.84	221.83	227.12	191.03	372.99	46.34	601.66	230.02
PAFRAC	2000	1.5203	1.4751	1.5680	1.4786	1.3317	1.4140	1.3338	1.4339
	2005	1.5363	1.4753	1.5679	1.4677	1.3552	1.4133	1.3478	1.4349
	2010	1.5656	1.4775	1.5691	1.4732	1.3356	1.4329	1.3632	1.4199
AI/%	2000	86.16	58.76	55.29	63.30	67.19	17.27	80.10	72.18
	2005	85.92	58.79	52.59	58.36	70.67	20.34	81.30	70.63
	2010	84.91	58.79	51.97	61.49	73.13	23.03	82.45	65.87

3.2 土地利用与景观格局变化模拟与预测

3.2.1 模型实现过程

利用 IDRISI 软件中的 CA-Markov 模块，以 Logistic 回归得到的分布适宜图作为转化规则，模拟土地利用变化，过程如下：1）在 IDRISI 软件中的 Markov 模块，输入 2000 和 2005 年土地利用栅格图，预测年数设为 5，得到转移面积矩阵，即 2005－2010 年间各类型转化为其他类型的预期栅格单元数；2）采用 Logistic 回归构建各土地利用类型空间分布格局与 11 个驱动因子之间的拟合方程，各土地利用类型的 ROC 值均大于 0.9，拟合效果较好，因而根据拟合方程生成空间分布适宜图，作为 CA 的转化规则；3）在 CA-Markov 模块，选取元胞周围 5×5 的矩阵构成 CA 滤波器，以 2005 年为预测起始年，设置 5 年间隔迭代，模拟得到 2010 年土地利用分布图。

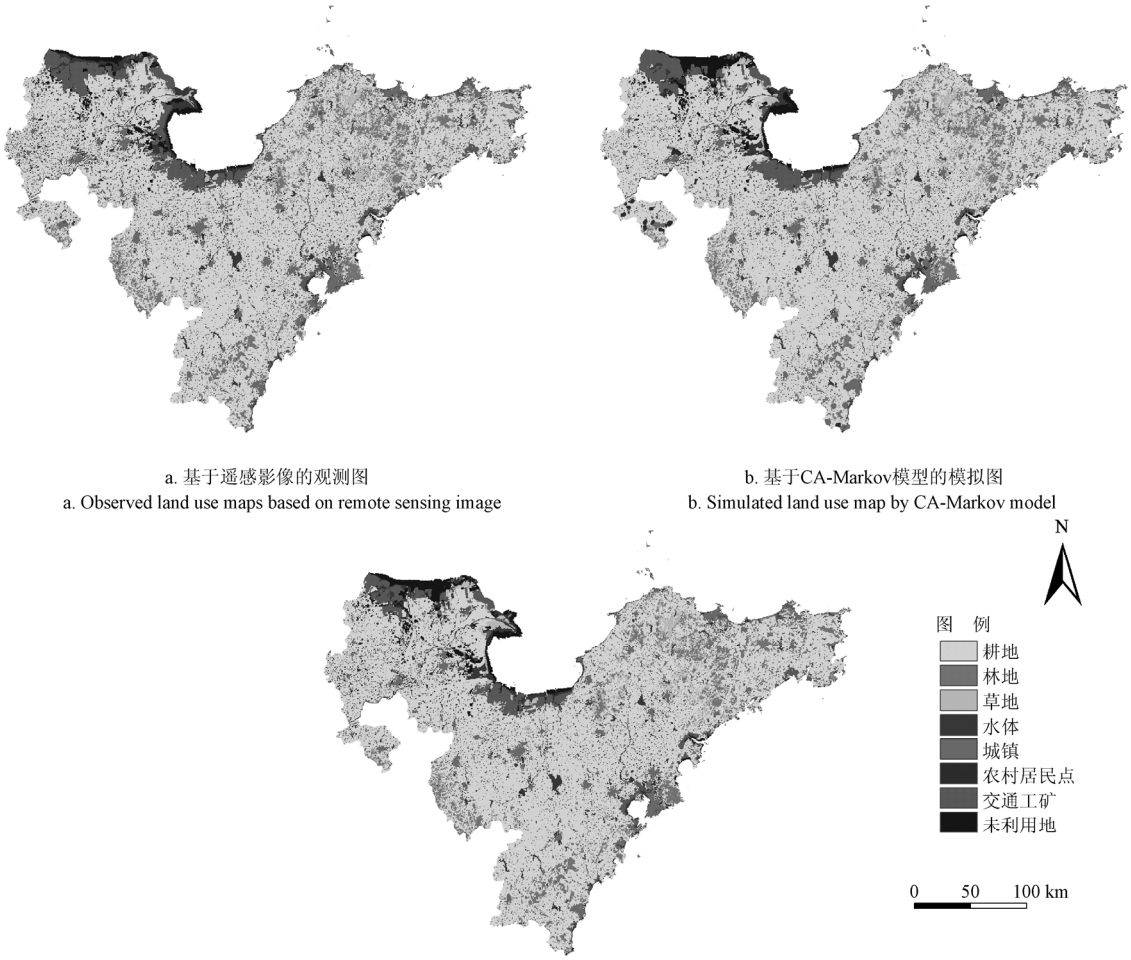
Spatial-Markov 模型是在 ArcGIS 9.3 中通过 AML 语言编程实现。过程如下：1）建立覆盖研究区的矢量格网，方格尺寸为 500 m×500 m；2）将 2000 年土地利用矢量图与该矢量格网进行叠加，统计每个格网中每一种土地利用类型的分布面积，对某一个土地利用类型，将统计结果以栅格数据来表达，栅格大小为 500 m×500 m，从而得到 8 个栅格图层；同理，可对其他年份的土地利用矢量数据进行同样的处理；3）将 2000 年与 2005 年土地利用矢量图层进行叠加，在属性表中添加新的字段记录

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

土地利用转移类型，进而将其与矢量格网图层叠加，统计每个格网中每一种土地利用变化类型的分布面积，并以栅格数据表达统计结果，从而得到 Spatial-Markov 模型的转移面积矩阵，根据公式（6）计算出转移概率矩阵；4）根据公式（1），通过地图代数功能，预测出 2010 年的土地利用，初始结果为 8 个栅格图层，通过 MVC 方法转化，得到名义尺度的预测结果。

3.2.2　模拟结果验证及模型比较

图 3 为山东沿海区域 2010 年土地利用观测图以及 2 个模型的模拟图。以 Kappa 系数比较 2 个模型模拟结果的精度水平（表 3）：1）Spatial-Markov 模型和 CA-Markov 模型的总 Kappa 系数分别为 0.8872 和 0.8530，模拟效果均较好；2）2 个模型各土地利用类型的 Kappa 系数差异较大，耕地、林地的 Kappa 系数较高，均超过 0.90，水体和交通工矿的 Kappa 系数较低，农村居民点的 Kappa 系数最低；3）Spatial-Markov 模型的模拟结果除了城镇和交通工矿 Kappa 系数较低之外，其他方面均优于 CA-Markov 模型。



a. 基于遥感影像的观测图
a. Observed land use maps based on remote sensing image

b. 基于CA-Markov模型的模拟图
b. Simulated land use map by CA-Markov model

c. 基于Spatial-Markov模型的模拟图
c. Simulated land use map by Spatial-Markov model

图 3　2010 年山东沿海区域土地利用观测图与模拟图

Fig.3　Observed and simulated land use maps in coastal area of Shandong province in 2010

表 3　基于 Kappa 系数的模拟结果精度对比

Table 3　Modeling comparison by Kappa coefficient

	总体	耕地	林地	草地	水体	城镇	农村居民点	交通工矿	未利用地
CA-Markov	0.8530	0.9279	0.9628	0.8555	0.6590	0.8476	0.7425	0.7044	0.7235
Spatial-Markov	0.8872	0.9608	0.9656	0.9457	0.7233	0.8462	0.7613	0.6761	0.8834

计算模拟图在景观尺度和类型尺度的景观格局指数，并将其与真实值计算结果比较，得到各个指数的偏离度，如表 4、表 5。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 基于景观尺度景观指数的模型验证与对比

Table 4 Modeling validation and comparison through landscape metrics at landscape level

偏离度/%	NP	MPS	PAFRAC	CONTAG	AI	LPI	SHDI	SHEI
CA-Markov	-16.37	442.42	-1.29	59.59	26.03	42.80	-39.23	-42.50
Spatial-Markov	-6.39	6.83	0.05	3.28	1.11	16.99	-3.30	-3.31

由表 4 可见，Spatial- Markov 模型模拟结果在景观尺度的各个景观指数与观测值更为接近，偏离度远低于 CA-Markov 模型结果。

表 5 基于类型尺度景观指数的模型验证与对比

Table 5 Modeling validation and comparison through landscape metrics at class level

偏离度/%	CA-Markov				Spatial- Markov			
	NP	MPS	PAFRAC	AI	NP	MPS	PAFRAC	AI
耕地	-8.18	12.11	-1.91	2.58	0.00	2.79	-2.32	1.05
林地	-1.95	0.89	-0.40	1.10	-0.10	-0.91	-0.12	-0.03
草地	-26.48	31.37	0.17	5.38	2.20	3.58	-0.08	0.98
水体	-9.75	4.37	-1.24	-1.83	6.72	-4.03	-0.53	-5.27
城镇	-2.17	4.33	-4.13	3.72	-1.79	-10.94	0.74	-1.58
农村居民点	-16.39	-1.45	-4.00	11.92	-14.76	-4.98	-1.58	-4.34
交通工矿	-36.36	24.66	-2.41	3.29	-27.56	-2.43	-0.92	-1.85
未利用地	-43.30	118.86	-0.35	17.49	12.77	26.28	1.10	7.65

由表 5 可见，8 个类型的 4 个景观指数中，Spatial-Markov 模型除了对城镇、农村居民点和交通工矿平均斑块面积的模拟精度、对耕地和未利用地分形维数的模拟精度、对水体聚集度的模拟精度不及 CA-Markov 模型外，对其他 26 个指数值的模拟精度都显著优于 CA-Markov 模型。

综上所述，Kappa 系数和景观格局指数均表明 Spatial-Markov 模型的模拟结果更优，尤其是在保持和还原景观格局特征方面的能力更为突出，更适合于景观格局变化的预测。

3.2.3 基于 Spatial-Markov 的土地利用与景观格局预测

采用 Spatial-Markov 模型预测 2015 和 2020 年的土地利用和景观格局，如图 4。计算景观水平景观指数（表 6）表明，2010－2020 年，城镇和农村居民点面积不断扩张，耕地面积持续下降；斑块数目升高，平均斑块面积降低，景观呈破碎化趋势；聚集度指数和蔓延度指数不断下降，景观多样性指数、均匀度指数仍不断上升，与 2000-2010 年变化趋势一致；而分形维数变化趋势与 2000-2010 年相反，景观形状将趋于复杂。各景观类型，除水体和未利用地类型的指数计算结果显示其与 2000-2010 年变化趋势差异较大，其他景观类型指数的变化趋势与历史变化趋势基本一致（表 7）。

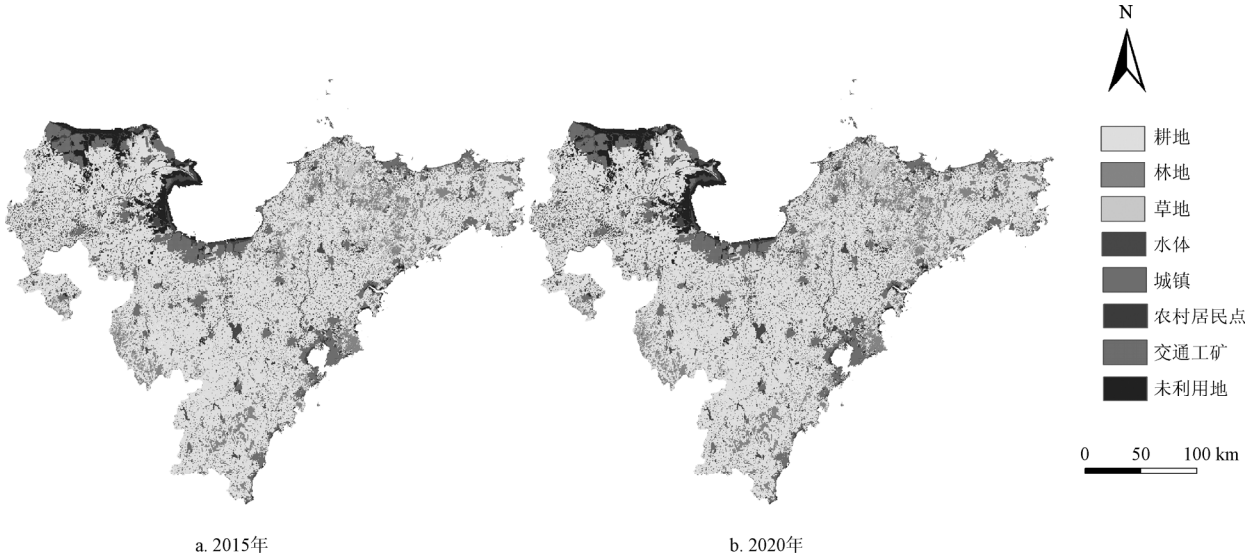


图 4 基于 Spatial-Markov 模型的山东沿海区域 2015 年、2020 年土地利用模拟图

Fig.4 Land use maps of coastal area in Shandong province in 2015 and 2020 simulated by Spatial-Markov model

表 6 2015、2020 年景观水平景观指数

Table 6 Landscape metrics at landscape level in 2015 and 2020

年份	NP/个	MPS/hm^2	PAFRAC	CONTAG/%	AI/%	LPI/%	SHDI	SHEI
2015	17083	404.01	1.4701	46.96	74.22	61.23	1.3658	0.6568
2020	17571	392.79	1.4724	46.19	73.57	53.65	1.3830	0.6651

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 7　2015、2020 年类型水平景观指数

Table 7　Landscape metrics at class level in 2015 and 2020

	NP/个		MPS/hm^2		PAFRAC		AI/%	
	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
耕地	813	843	5 335.30	5 088.29	1.5583	1.5648	84.18	83.59
林地	2097	2 104	221.61	221.03	1.4756	1.4762	58.89	58.86
草地	2627	2 645	218.79	215.33	1.5741	1.5780	50.70	50.43
水体	1 477	1545	157.13	151.39	1.4805	1.4739	55.23	54.95
城镇	794	800	374.81	379.00	1.3244	1.3206	73.53	73.67
农村居民点	7 690	8 066	50.39	53.58	1.4342	1.4407	25.46	26.95
交通工矿	761	751	457.85	463.58	1.3806	1.3773	78.94	79.28
未利用地	824	817	314.29	318.54	1.4284	1.4278	71.40	71.76

4　结论与讨论

本文以山东沿海区域为案例区，基于遥感信息和 GIS 技术获取 2000、2005 和 2010 年土地利用图，分析过去 10 年的土地利用及景观格局变化特征；进而，尝试 Logistic-CA-Markov 模型，以及发展 Spatial-Markov 模型，通过模型比较，探索能够有效模拟和预测景观格局变化的模型方法。主要结论如下：

1）2000－2010 年，山东沿海区域的优势景观类型为耕地，其次为草地、林地；城镇和农村居民点用地飞速扩张并占用大量耕地，这又不断驱动草地开垦为耕地；总的来说，沿海滩涂、湿地垦殖占用和城镇化是 2000－2010 年间区域土地利用变化的主导特征，由于土地利用变化，使得山东沿海区域景观格局特征向着破碎化的方向发展，人为干扰加剧，区域各景观类型的分布向均匀化发展，单一景观的优势度减弱。

2）Logistic-CA-Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.8530，显示模拟结果精度较好，但是景观格局指数偏差较大；Spatial-Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数值更高，为 0.8872，而且景观格局指数偏差较小，证明其对土地利用和景观格局变化的模拟能力显著优于 Logistic-CA-Markov 模型；因此，当兼顾土地利用和景观格局变化研究时，Spatial-Markov 模型更适合。

3）基于 Spatial-Markov 模型预测未来 10 年的土地利用变化，结果显示：城镇、农村居民点将继续保持快速增长的态势，耕地等类型的面积将持续减少；景观格局破碎化趋势将持续，但程度将有所减弱，人为干扰趋于减弱，景观多样性指数和均匀度指数趋向增加；在类型尺度，除水域和未利用地外，各景观类型多个景观指数的变化趋势总体保持过去 10 年间的变化趋势。

目前存在的土地利用预测模型多基于栅格数据，而矢量数据在向栅格数据转化的过程中存在一定的数据精度损失。与 Logistic-CA-Markov 模型相比，Spatial-Markov 模型可直接输入矢量数据，模型的输出包括一系列栅格数据集（初始结果）以及由其转换生成的名义尺度的栅格图层，模型技术方法及初始结果能够避免矢栅转换带来的精度损失，而且，其实现过程简单，输入数据少，可移植性强、便于推广应用，尤其是在景观格局模拟和预测方面优势显著。但 Logistic-CA-Markov 模型便于驱动力分析和情景分析，这是 Spatial-Markov 模型当前版本尚未实现的功能，未来时期，Spatial-Markov 模型进一步升级和发展的方向包括：1）尝试更多的案例应用及多尺度应用，并与更多的成熟模型进行比较；2）尝试纳入驱动力分析和情景分析功能；3）挖掘模型初始结果的应用空间等。

[参　考　文　献]

[1] Turner H B L, Skole D, Sanderson S. Land-use and land-cover change science/research plan[R]. IGBP Report No.35 and HDP Report No.7. Stochkholm: IGBP, 1995.

[2] 吴宏安，蒋建军，张海龙，等. 西安地区城镇扩展及其生态环境效应研究[J]. 自然资源学报，2006，21(2)：311－318.
Wu Hongan, Jiang Jianguo, Zhang Hailong, et al. Urban expansion and its effects on eco-environment in Xi'an region based on Landsat TM data[J]. Journal of Nature Resources, 2006, 21(2): 311－318. (in Chinese with English abstract)

[3] 周红妹，高阳，葛伟强，等. 城市扩展与热岛空间分布变化关系研究——以上海为例[J]. 生态环境，2008，17(1)：163－168.
Zhou Hongmei, Gao Yang, Ge weiqiang, et al. The research on the relationship between the urban expansion and the change of the urban heat island distribution in Shanghai area[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 163－168. (in Chinese with English abstract)

[4] Claessens L, Schoorl J M, Verburg P H, et al. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes[J]. Agriculture, Ecosystems

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and Environment, 2009, 129(1/2/3): 157－170.

[5] Veldkamp A, Fresco L O. CLUE-CR: an intergrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica[J]. Ecological Modelling, 1996, 91(1/2/3): 231－248.

[6] Luo Geping, Yin Changying, Chen Xi, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China[J]. Ecological Complexity, 2010, 7(2): 198－207.

[7] Zheng XinQi, Zhao Lu, Xiang Weining, 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.

[8] 李亦秋，邓欧，张冬有，等. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟[J]. 农业工程学报，2011，27(5)：329－335.
Li Yiqiu, Deng Ou, Zhang Dongyou, et al. Land use and ecosystem service value scenarios simulation in Dangjiangkou reservoir area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 329－335. (in Chinese with English abstract)

[9] 周锐，苏海龙，王新军，等. CLUE-S 模型对村镇土地利用变化的模拟与精度评价[J]. 长江流域资源与环境，2012，21(2)：174－180.
Zhou Rui, Su Hailong, Wang Xinjun, et al. Simulation and accuracy assessment of village land use change based on CLUE-S model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(2): 174－180. (in Chinese with English abstract)

[10] Jantz C A, Goetz S J, Donato D, et al. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(1): 1－16.

[11] 刘勇，吴次芳，岳文泽，等. 基于 SLEUTH 模型的杭州市城市扩展研究[J]. 自然资源学报，2008，23(5)：797－807.
Liu Yong, Wu Cifang, Yue Wenze, et al. Applying SLEUTH for simulating urban expansion of Hangzhou[J]. Journal of Nature Resources, 2008, 23(5): 797－807. (in Chinese with English abstract)

[12] Pijanowski B C, Brown D G, Shellito B A, et al. Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26(6): 553－575.

[13] 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.

[14] Al-Ahmadi K, See L, Heppenstall A, et al. Calibration of a fuzzy cellular automata model of urban dynamics in Saudi Arabia[J]. Ecological Complexity, 2009, 6(2): 80－101.

[15] Guan D J, Li H F, Inohae T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(20/21/22): 3761－3772.

[16] 何丹，金凤君，周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化——以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学，2011，31(8)：903－910.
He Dan, Jin Fengjun, Zhou Jing. The changes of land use and landscape pattern based on Logistic-CA-Markov model: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(8): 903－910. (in Chinese with English abstract)

[17] 郑青华，罗格平，朱磊，等. 基于 CA-Markov 模型的伊犁河三角洲景观格局预测[J]. 应用生态学报，2010，21(4)：873－882.
Zheng Qinghua, Luo Geping, Zhu Lei, et al. Prediction of landscape patterns in Ili River Delt based on CA-Markov model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 873－882. (in Chinese with English abstract)

[18] 孙丹峰，李红，张凤荣. 基于动态统计规则和景观格局特征的土地利用覆被空间模拟预测[J]. 农业工程学报，2005，21(3)：121－125.
Sun Danfeng, Li Hong, Zhang Fengrong. Spatial simulation and prediction of land use and land cover using adaptive stochastic rules and landscape pattern characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(3): 121－125. (in Chinese with English abstract)

[19] 崔晓伟，张磊，朱亮，等. 三峡库区开县蓄水前后景观格局变化特征[J]. 农业工程学报，2012，28(4)：227－234.
Cui Xiaowei, Zhang Lei, Zhu Liang, et al. Changes of landscape pattern and its characteristics in Kaixian county before and after impoundment of Three Gorges Dam Projects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 227－234. (in Chinese with English abstract)

[20] 冯异星，罗格平，周德成，等. 近 50a 土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响——以新疆玛纳斯河流域为例[J]. 生态学报，2010，30(16)：4295－4305.
Feng Yixing, Luo Geping, Zhou Decheng, et al. Effects of land use change on landscape pattern of a typical arid watershed in the recent 50 years: a case study on Manas River Watershed in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4295－4305. (in Chinese with English abstract)

[21] 吴昊，王维，王文杰，等. 长株潭地区景观格局及其变化特征研究[J]. 地球信息科学学报，2010，12(1)：133－142.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Wu Hao, Wang Wei, Wang Wenjie, et al. Research on the characteristics of landscape pattern and change in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan region[J]. Jounral of Geo-information Science, 2010, 12(1): 133－142. (in Chinese with English abstract)

[22] 杨叶涛，龚建雅，周启鸣，等. 土地利用景观格局对城市扩展影响研究[J]. 自然资源学报，2010，25(2)：320－329.
Yang Yetao, Gong Jianya, Zhou Qiming, et al. Impacts of landscape pattern on urban expansion: A case study of Beijing city[J]. Journal of Nature Resources, 2010, 25(2): 320－329. (in Chinese with English abstract)

[23] 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 with English abstract)

[24] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 297－303. (in Chinese with English abstract)

[25] 邱炳文, 陈崇成. 基于多目标决策和 CA 模型的土地利用变化预测模型及其应用[J]. 地理学报，2008，63(2)：165－174.
Qiu Bingwen, Chen chongcheng. Land use change simulation model based on MCDM and CA and its application[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(2): 165－174. (in Chinese with English abstract)

[26] Pontius J, Laura C S. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 85(1/2/3): 239－248.

[27] 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.
Tang Huajun, Wu Wenbin, Yang Peng, et al. Recent progresses of land use and land cover change(LUCC) models[J]. Acta Geographic Sinica, 2009, 64(4): 456－468. (in Chinese with English abstract)

[28] 杨正宇，周广胜，杨奠安. 4 个常用的气候-植被分类模型对中国植被分布模拟的比较研究[J]. 植物生态学报，2003，27(3)：587－593.
Yang Zhengyu, Zhou Guangsheng, Yang dianan. Comparison of simulated vegetation distribution in China produced by four popular climate-vegetation classification models[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(3): 587－593. (in Chinese with English abstract)

[29] 柯新利，邓祥征，何书金. 地理元胞自动机模型的尺度敏感性及原因[J]. 地理研究, 2010, 29(5)：863－872.
Ke Xinli, Deng Xiangzheng, He Shujin. Scale sensitivity and its causality for Geo-cellular Automata modelling[J]. Geographical Research, 2010, 29(5): 863－872. (in Chinese with English abstract)

[30] 王丽萍，金晓斌，杜心栋，等. 基于灰色模型-元胞自动机模型的佛山市土地利用情景模拟分析[J]. 农业工程学报，2012，28(3)：237－242.
Wang Liping, Jin Xiaobin, Du Xindong, et al. Land use scenarios simulation of Foshan city based on gray model and cellular automata model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 237－242. (in Chinese with English abstract)

[31] 吴桂平，曾永年，邹滨，等. AutoLogistic 方法在土地利用格局模拟中的应用——以张家界市永定区为例[J]. 地理学报，2008，63(2)：156－164.
Wu Guiping, Zeng Yongnian, Zou Bin, et al. Simulation on spatial land use patterns using AutoLogistic method: A case study of Yongding county, Zhangjiajie[J]. Acta Geographic Sinica, 2008, 63(2): 156－164. (in Chinese with English abstract)

[32] 冯永玖，刘艳，韩震. 不同样本方案下遗传元胞自动机的土地利用模拟及景观评价[J]. 应用生态学报，2011，22(4)：957－963.
Feng Yongjiu, Liu Yan, Han Zhen. Land use simulation and landscape assessment by using genetic algorithm based on cellular automata under different sampling schemes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 957－963. (in Chinese with English abstract)

[33] 周锐，苏海龙，胡远满，等. 不同空间约束条件下的城镇土地利用变化多预案模拟[J]. 农业工程学报，2011，27(3)：300－308.
Zhou Rui, Su Hailong, Hu Yuanman, et al. Scenarios simulation of town land use change under different spatial constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 300－308. (in Chinese with English abstract)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Land use and landscape pattern changes in coastal areas of Shandong province, China

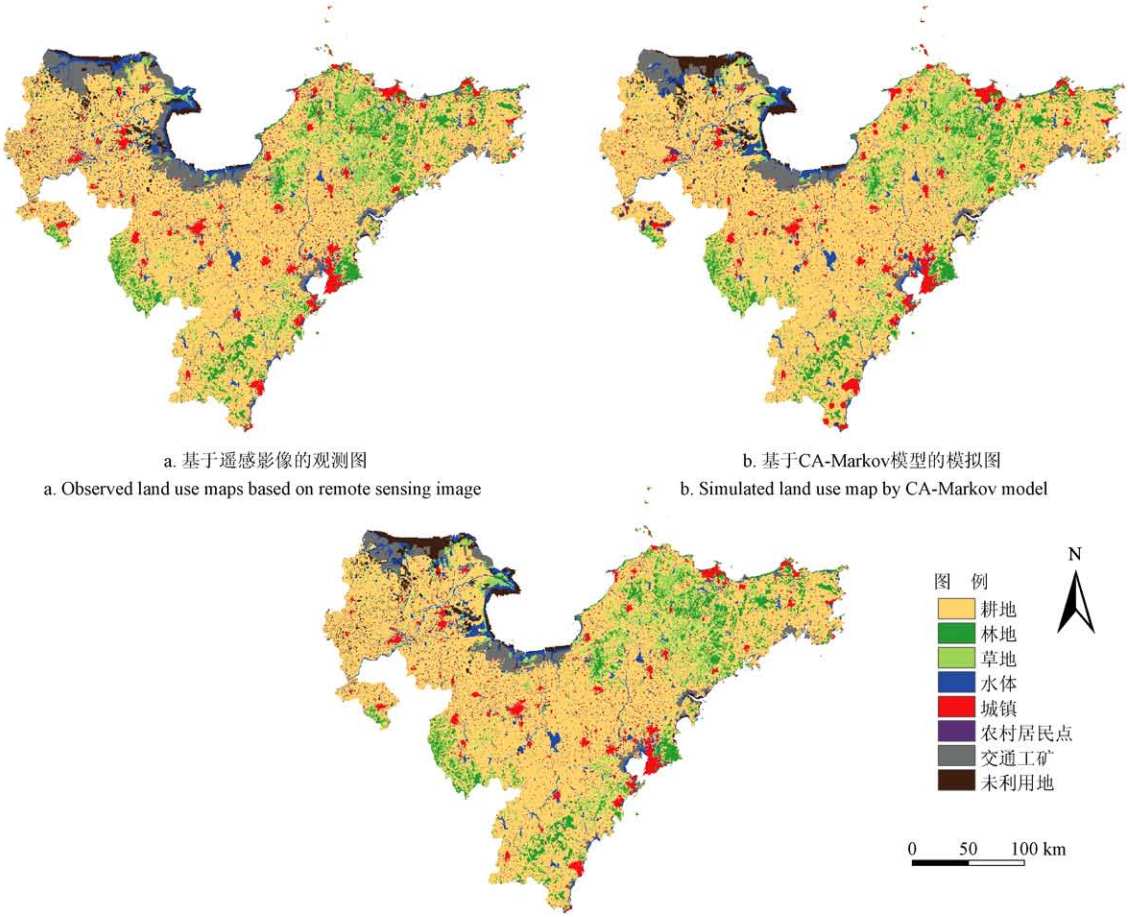
Wu Li[1,2], Hou Xiyong[1※], Xu Xinliang[3], Di Xianghong[1,2]

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai*, 264003, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
3. *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100101, *China*)

Abstract: In this paper, the Spatial-Markov model, which was based on the theory of Markov process and spatial analysis techniques, was proposed to simulate land use change and landscape dynamics. By the Spatial-Markov model, the study area could be divided into numerous lattices and land use change in each lattices was simulated separately by the Markov process model. The outputs of the model include a set of ratio scale images and a nominal scale image. The whole process of the model was fulfilled by compiling programs with AML in ArcGIS 9.3. The coastal area of Shandong province was selected as the case study area. Land use maps were extracted based on Landsat TM/ETM+ images captured in 2000, 2005, and 2010 respectively. Firstly, characteristics of land use change and landscape dynamics were analyzed. It showed that, from 2000 to 2010, urban area and rural settlement expanded dramatically by massively occupying farmland, which, in turn, drove grassland reclaimed to farmland. At the landscape level, the landscape fragmentation increased, and both the diversity and evenness of the landscape increased. Secondly, using land use maps in 2000 and 2005, the Spatial-Markov model was developed to simulate the land use map in 2010 at a spatial scale of 500m. At the same time, the CA-Markov model was selected for model comparison, in specific, eleven driving factors were selected and the Logistic regression method was used to create the transitional maps for CA. Both Kappa coefficient and landscape indices were introduced to evaluate and compare the two models. It showed that the Spatial-Markov model not only achieved much higher Kappa coefficient, but also much better landscape indices than the CA-Markov model. Therefore, the Spatial-Markov model was applied to predict land use change and landscape dynamics in the next decade. Moreover, the prediction result shows that, from 2010 to 2020, areas of urban area and rural settlement will go on increasing, while areas of farmland will continue to decline. At the landscape level, all the landscape indices will follow their historical trend except for fractal dimension. As to the landscape indices at the class level, all landscape types will follow the same trend as before except for water and unused land.

Key words: land use, landscape, modles, coastal areas of Shandong province

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



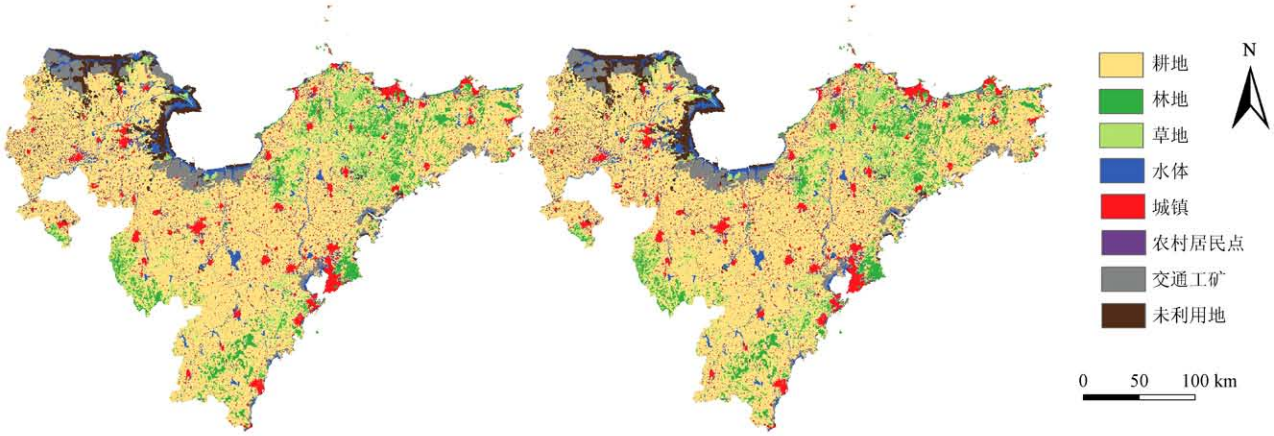
a. 基于遥感影像的观测图
a. Observed land use maps based on remote sensing image

b. 基于CA-Markov模型的模拟图
b. Simulated land use map by CA-Markov model

c. 基于Spatial-Markov模型的模拟图
c. Simulated land use map by Spatial-Markov model

图3 2010年山东沿海区域土地利用观测图与模拟图

Fig.3 Observed and simulated land use maps in coastal area of Shandong province in 2010



a. 2015年

b. 2020年

图4 基于Spatial-Markov模型的山东沿海区域2015年、2020年土地利用模拟图

Fig.4 Land use maps of coastal area in Shandong province in 2015 and 2020 simulated by Spatial-Markov model

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net