

# 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

杨 俊<sup>1,2</sup>, 解 鹏<sup>1</sup>, 席建超<sup>2</sup>, 葛全胜<sup>2</sup>, 李雪铭<sup>1</sup>, 马占东<sup>1</sup>

(1. 辽宁师范大学 自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室, 大连 116029;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 元胞自动机模型已经成为模拟土地利用变化的重要方法。传统土地模拟方法中侧重于通过分析影响土地利用变化的因素来构建预测模型, 较少从土地利用类型变化及其相互作用的空间角度来关注模型构建。本文以1998年、2004年和2009年1:10000土地利用数据, 利用Python语言结合GDAL与Numpy类库实现局部土地利用竞争的元胞自动机模型原型开发, 并用于模拟大连市经济技术开发区1998-2009年土地利用变化模拟。研究结果: ①建立了发掘多地类之间相互作用关系的试验方法, 研究适用于具有明确物理意义的多地类元胞自动机模拟模型; ②该模型具有好的模拟精度, 对建设用、农用地和林地等3种不同类型用地进行同时模拟, 其对应Kappa系数分别为0.762, 0.634和0.678; ③该模型建立了研究不同种地类协调作用的基本方法, 可以用于进一步研究土地利用变化地类之间驱动原理。

**关键词:** 局部土地利用竞争; 元胞自动机模型; 土地利用变化; 模拟; 大连市经济技术开发区

DOI: 10.11821/dlxb201503009

## 1 引言

近年土地利用变化模拟成为国内外学者研究的一个热点。土地利用变化动态模拟的模型较多, 比如系统动力学模型、Markov模型、Agent模型、CLUE-S模型和元胞自动机模型等。系统动力学模型注重从系统论和控制论的角度分析土地利用变化的驱动因素, 黄庆旭和史培军等学者利用该方法对中国北方地区干旱化情境下土地利用变化进行模拟, 成功预测出土地利用面积总量的变化趋势<sup>[1]</sup>。Markov模型以多年土地利用转移面积矩阵数据为基础, 计算土地利用转移概率矩阵, 进而预测未来土地利用面积总量的变化趋势<sup>[2]</sup>。系统动力学与Markov模型能从时间维度分析土地利用变化的驱动机制和变化趋势, 但很难从空间维度模拟土地利用变化, 需要与其他具有空间模拟能力模型结合才能进行土地利用时空动态模拟。基于Agent的土地利用变化模拟模型, 充分考虑不同群体对土地利用变化的决策作用, 能够反映社会人文因素对土地利用变化的影响作用, 刘小平与黎夏等人利用该方法对居民居住用地变化进行了模拟<sup>[3]</sup>。CLUE-S模型具有很强的时空动态模拟的能力, 从土地利用需求、区位特征、土地利用转换顺序以及区域限制等方面入手, 分析土地利用在时间和空间两个维度上的变化规律<sup>[4]</sup>。但是Agent模型与

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2015-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471140) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41471140]

作者简介: 杨俊(1978-), 男, 湖北孝昌, 博士后, 副教授, 主要从事区域地表过程、城市人居环境与地理信息系统应用研究。E-mail: yangjun@lnu.edu.cn

通讯作者: 席建超(1972-), 男, 河南确山人, 博士后, 副研究员, 主要从事旅游环境效应、区域旅游发展规划等研究。E-mail: xijc@igsnnr.ac.cn

CLUE-S 模型都是注重从宏观角度分析土地利用变化过程,对土地利用变化的局部作用难以模拟。近年来元胞自动机模型在时空动态模拟领域受到广泛关注,元胞自动机提供了时空动态模拟运算框架,利用自下而上的模拟方式,由局部规则演化出全局的变化模式,实现了受宏观地理条件和土地利用局部变化双重作用下的土地利用变化模拟。同时,元胞自动机模型可与统计学方法和人工智能方法结合,实现更加精确、智能的复合模型。因此,利用CA模型对城市发展演变过程开展研究,具有重要的理论和实践意义<sup>[5]</sup>。

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 于 20 世纪 40 年代末由 Von Neumann J 和 Stanislaw M. Ulam 提出,就像许多的相同图灵机放置在格网之中并彼此连接在一起<sup>[6]</sup>。Wolfram 证明 CA 模型能够模拟复杂的自然现象,并建立元胞自动机理论的基础<sup>[7-8]</sup>,元胞自动机被定义为一个离散的动力学模型,由个体之间局部的行为演化出时间与空间上全局的变化模式。因此元胞自动机被广泛的应用于土地利用变化<sup>[9-10]</sup>、城市扩展模拟<sup>[11-14]</sup>、火灾模拟<sup>[15-18]</sup>、生态<sup>[19-22]</sup>和交通流<sup>[23-25]</sup>模拟等领域。土地利用变化过程是一个复杂的非线性变化过程,为了使元胞自动机与研究主题更好的契合,需要将元胞自动机模型的许多限制条件适当放宽<sup>[26-27]</sup>。Lauf 以系统动力学为基础,将家庭因子和住房因子作为驱动力探讨住宅建设用地扩展,指出人口流动以及年龄结构变化,是目前欧美国家城市增长或萎缩的重要原因<sup>[28]</sup>; Jokar Arsanjani 等人研究逻辑回归与马尔科夫链相结合的元胞自动机模型,实现了城市用地扩展模拟,强调将马尔科夫模型、逻辑回归模型以及元胞自动机模型三者结合极大的提高了模拟精度<sup>[11]</sup>; Mitsova 等人利用元胞自动机技术研究了在城市发展过程中如何有效的保护休憩资源用地的问题<sup>[29]</sup>; Robinson 等人利用元胞自动机模型针对土地利用格局与居民居住环境做了研究<sup>[30]</sup>; Pan 等人对不同尺度下元胞自动机模拟土地利用变化精度问题做了研究<sup>[31]</sup>; Yu 等人详细研究了经济、人口及土地管理因素对土地利用格局转变的影响作用<sup>[32]</sup>。

这种通过放宽模型的限制条件、加入各种地理控制变量的方法,极大的提高了模型模拟的精度。但是,这也导致转换规则变得更加复杂,更加不容易发掘出来。为解决这个问题,有学者指出需要建立转换规则自动获取方法。例如,黎夏提出了分别基于人工神经网络、蚁群算法的元胞自动机模型,对珠江三角洲地区进行了多次模拟,对利用人工智能技术自动提取元胞转换规则的研究,取得了突破性进展<sup>[33-39]</sup>; Kheder 等人将模糊理论与元胞自动机结合以多时相遥感数据研究 Indianapolis 地区的城市扩展模拟,结果显示该方法很好的提高了模拟精度<sup>[40]</sup>; 冯永玖等人利用核主成分分析方法 (KPCA) 在高维特征空间下多重共线变量进行降维建立的地理元胞模型,体现出城市化过程的非线性特征<sup>[41]</sup>。随着智能方法的引入以及模型条件不断的放宽,很多基于元胞自动机的模型大大减弱了元胞自动机的基本特征<sup>[42]</sup>。主要原因是大量的精力集中于如何设计约束条件以及影响因子及其智能获取方法、改进元胞自动机的模拟效果,而忽略了邻域内局部作用效果这个重要特点。局部作用及其原理发掘的缺失,在某种程度上就失去了通过局部作用模拟全局变化的优势。解决这个问题一个重要的方法就是,在引入众多地理限制条件的同时,注重局部范围空间相对关系的研究。Batty 等人在设计元胞自动机模型时对元胞地类向多方向转换做了重点研究,设计并实现了多地类方向转换概率的计算方法,证明虽然对于任意时刻任意的一个元胞,其土地利用类型有且仅有一种,但在一下时刻其土地利用类型却具有多种可能性,依据概率大小确定其最终转换的输出地类,对提高模拟精度具有很大帮助<sup>[43]</sup>。Gong 等人设计了基于 matter-element 理论的元胞自动机模型,对广州市增城进行模拟,证明元胞级别上影响因子的差异对改进模型的模拟精度具有很大帮助<sup>[44]</sup>。

基于上述研究成果,提出局部土地利用竞争元胞自动机模型 Localized Land-use

Competition Cellular Automata Model (LLCCA) 理论体系, 以1998年、2004年和2009年1:10000土地利用数据、土地利用规划、地形、遥感影像数据等数据为基础, 利用Python语言结合GDAL与Numpy类库实现局部土地利用竞争元胞自动机模型系统, 模拟大连市经济技术开发区1998-2009年土地利用变化。

## 2 模型与方法

基于局部土地利用竞争的元胞自动机模型模拟土地利用变化包含数据预处理与输入, 子系统参数校正以及地类变化决策与输出3大阶段。数据预处理与输入阶段, 处理土地利用数据、基础要素数据、地形数据以及规划数据, 得到数据结构一致、地理坐标统一的综合地理信息数据库。子系统校正用于获取LLCCA模型系统应用的参数, 分别是: 元胞邻域尺度局部土地利用竞争 (Localized Land-use Competition, LLC) 影响下元胞土地利用变化潜力矩阵、利用多准则判断 (Multi-criteria Evaluation, MCE) 方法计算各土地利用驱动因子权重矩阵和利用Markov模型预测的土地利用转移概率矩阵。地类变化决策与输出阶段综合上述各项参数, 利用最优概率选择策略 (Optimum Transition Rule, OTR) 以输入土地利用地图为基础, 逐一裁定元胞土地利用类型变化。该基于局部土地利用竞争元胞自动机模型的原型, 以Python为开发语言, 利用GDAL与Numpy库函数实现。图1是基于局部土地利用竞争元胞自动机模型的土地利用变化模拟研究框架。

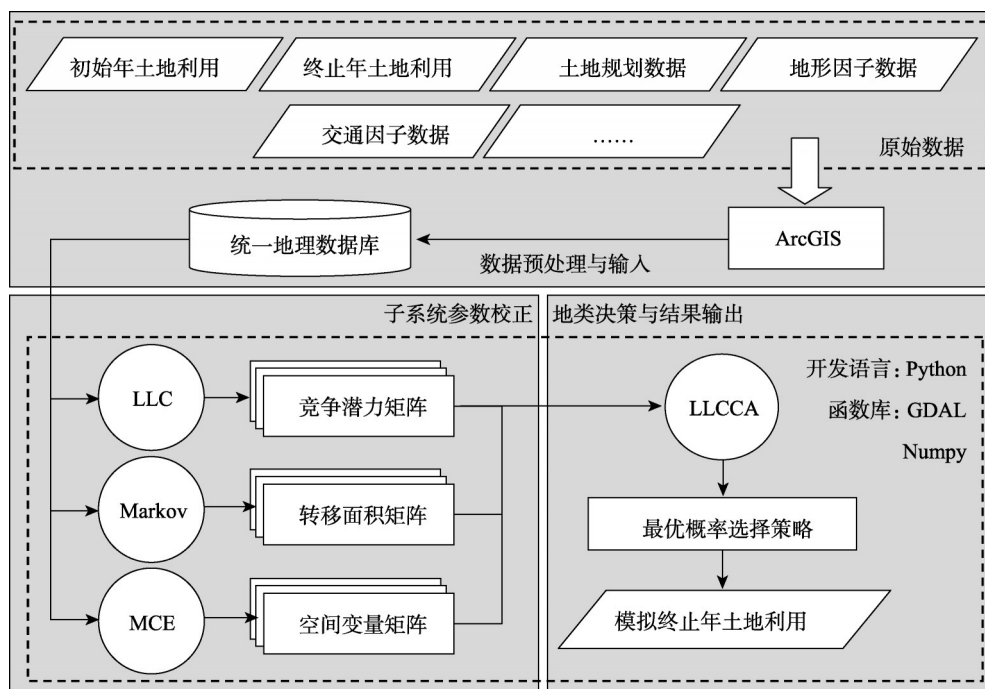


图1 局部土地竞争力元胞自动机模型的土地利用变化模拟研究框架

Fig. 1 Land-use change simulation framework of localized land-use competition cellular automata model

### 2.1 局部土地利用竞争

土地利用变化过程涉及诸多土地利用类型之间的互相转换。区域内的空间自相关关系, 不仅在同种土地利用类型的地块之间发生作用, 在不同的土地利用类型的地块之间

也同样发挥着作用。基于局部土地利用竞争的元胞自动机模型,以元胞邻域内各土地利用类型元胞数量为邻域情景,以中心元胞模拟输入地类为输入变量,以中心元胞模拟输出地类为输出变量,研究不同邻域情境下中心元胞输入地类与输出的地类的函数关系。在LLCCA模型中,选取面积比重大、变化明显的建设用地(B)、农用地(A)和林地(F)3种土地利用类型作为研究对象,研究它们之间的互相竞争关系;选取水体(W)作为重要自然资源要素地类,但因其面积变化小且位置稳定,在模拟过程中该类型元胞不发生土地利用类型转化,其他元胞亦不向该地类转化。不同地类元胞用不同的颜色表示,各种地类间的相互作用关系(图2)。其中,Num(A)=2表示该情景中邻域范围内农用地元胞数量为2,其它情景可以此类推。因为中心元胞的地类转化是基于其独立的邻域情景,因此土地利用类型之间的影响关系具有不对等性。元胞邻域类型采用Moore邻域。

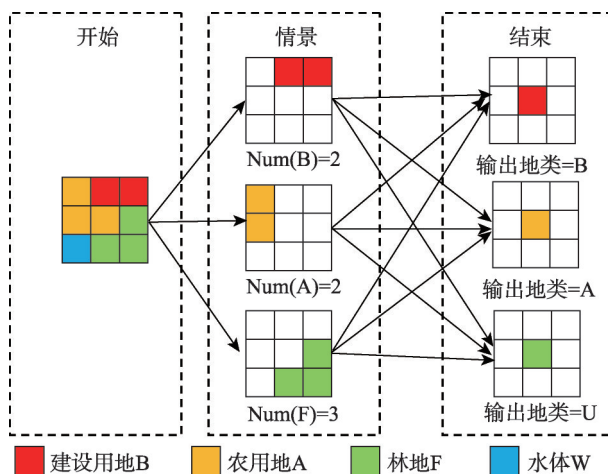


图2 多地类相互作用

Fig. 2 The interaction of multiple land-use types

如图2,中心元胞输入土地利用类型为农用地,邻域情景中建设用地元胞数为2,农用地元胞数为3,林地元胞数为3。受邻域情景影响,中心元胞输出土地利用类型为建设用地、农用地、林地的概率不同。利用研究区发展水平的连续性,在模型校正阶段,利用两期土地利用数据计算各邻域情景下中心元胞土地利用类型变化概率。计算方法如下:记一次土地利用变化过程为  $Entry()$

$$Entry(LU_i \rightarrow LU_j | LU_k = n) \quad (1)$$

式中:  $LU_i \rightarrow LU_j$  表示中心元胞土地利用类型由地类  $i$  转化为地类  $j$ ;  $LU_k = n$  表示邻域内土地利用类型  $k$  元胞数量为  $n$  的邻域情景。计算研究区内全体元胞输入地类、输出地类及邻域情景表示如下:

$$Count(LU_i \rightarrow LU_j | LU_k = n) \quad (2)$$

式中:表示邻域内土地利用类型  $k$  数量为  $n$  的且中心元胞由土地利用类型  $i$  转变为  $j$  的案例数量。进一步可以表示出邻域范围内土地利用类型  $k$  数量为  $n$  时,中心元胞由土地利用类型  $i$  转变为  $j$  的潜力如下:

$$P(LU_i \rightarrow LU_j | LU_k = n) = \frac{Count(LU_i \rightarrow LU_j | LU_k = n)}{Count(LU_i | LU_k = n)} \quad (3)$$

针对  $n$  取值不同,转换潜力通过以下集合表示:

$$C_{i \rightarrow j|k} = \{P(LU_i \rightarrow LU_j | LU_k = n) | n \in [0, \eta]\} \quad (4)$$

式中:  $\eta$  表示邻域内中心元胞以外元胞数量之和。包含全部邻域情景的中心元胞土地利用类型由地类  $i$  转化为地类  $j$  的潜力通过下式表示:

$$I_{i \rightarrow j} = \sum_k^m C_{i \rightarrow j|k} \quad (5)$$

式中:  $m$  表示该邻域内各地类的数量。由此局部地类竞争潜力矩阵表示如下:



$$\pi_i = \begin{vmatrix} I_{i \rightarrow i} & I_{i \rightarrow j} & \cdots & I_{i \rightarrow m} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\pi = \begin{vmatrix} I_{i \rightarrow i} & I_{i \rightarrow j} & \cdots & I_{i \rightarrow m} \\ I_{j \rightarrow i} & I_{j \rightarrow j} & \cdots & I_{j \rightarrow m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m \rightarrow i} & I_{m \rightarrow j} & \cdots & I_{m \rightarrow m} \end{vmatrix} \quad (7)$$

注意, 转换潜力表示中心元胞发生此类型变化的竞争优势程度, 故  $\pi_i$  中所有值之和并不等于1。综上所述, 局部土地利用竞争关系表达式如下:

$$R = f(LU_c, LU_1, LU_2, \cdots, LU_m) \quad (8)$$

式中:  $LU_c$  表示中心元胞的输入土地利用类型,  $LU_1, LU_2, \cdots, LU_m$  分别代表邻域内第1到第  $m$  类土地利用类型的元胞数量。模型应用阶段, 以邻域情景与输入地类为输入参数, 即可得到输出地类对应概率 (图3)。

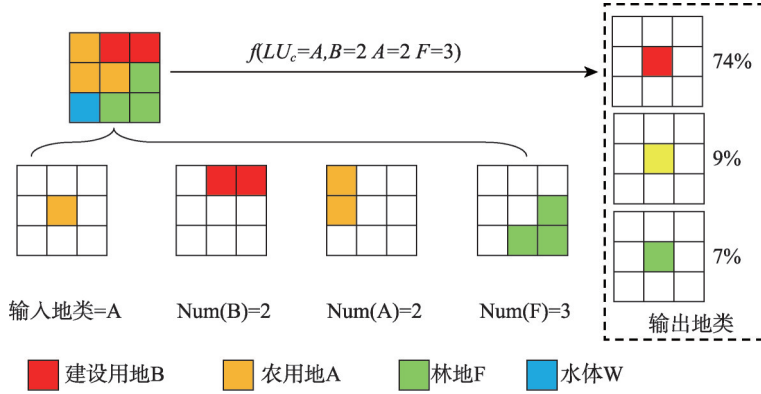


图3 局部土地利用竞争模型原型

Fig. 3 The prototype of localized land-use competition model

## 2.2 土地利用适宜性与综合转换概率

土地利用变化过程十分复杂, 除邻域作用以外自身的适宜条件对土地利用类型的转化也具有十分重要的作用<sup>[45]</sup>。因此本模型针对每一种土地利用类型分别建立其对应的土地利用适宜性图层  $L$ 。

$$L_i = \left( \sum_{k=1}^{\alpha} F_{i,k} W_{i,k} \right) \prod_{j=1}^{\beta} F_{i,j} \quad (9)$$

式中:  $1 < k < \alpha$  表示非限制性适宜条件, 由一组空间距离变量组成;  $1 \leq j \leq \beta$  表示限制性适宜条件, 由水体、地形图、土地用途分区和建设用地管制区组成;  $F_{i,k}$  表示对第  $i$  类土地利用类型非限制性适宜条件  $k$  的评分;  $W_{i,k}$  表示对第  $i$  类土地利用类型非限制性适宜条件  $k$  的权重;  $F_{i,j}$  表示对第  $i$  类土地利用类型限制性适宜条件  $j$  的评分, 该评分取值范围为  $\{0, 1\}$ 。在每一次模拟过程中, 每个元胞地类的综合转换概率, 依据经由邻域地类竞争作用下产生的地类转化潜力与土地利用适宜性结合求得, 通过下式表示。

$$p_{i \rightarrow j} = \exp \left[ a \left( \frac{\pi_i \times L_j}{\max(\pi_i \times L_j)} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

式中:  $p_{i \rightarrow j}$  表示由第  $i$  类土地利用类型向第  $j$  类土地利用类型转化的概率;  $a$  表示离散程度的变量, 取值  $0 \sim 1$ 。

2.3 全局地类转换决策

界定元胞是否发生地类转换，需要引入一个阈值表示地类转换的阻力。当元胞的综合转换概率大于该阈值时，元胞地类发生转化<sup>[46]</sup>。为了更好的控制模拟速度以及实现模拟过程定量化，出现很多针对性研究。其中一个有效的方法是将CA与马尔科夫模型结合实现模拟过程中元胞转换数量定量控制<sup>[47]</sup>。基于局部土地利用竞争的元胞自动机模型，在每次迭代过程中每个元胞可计算出向不同地类的转换潜力。如果使用统一的阈值对全体元胞统一处理，会发生一个元胞向多个方向转化的情况。如果一一记录这些数据，必然导致生成数量极其庞大的模拟结果。这在算法效率与计算机存储空间上都是不允许的。由此以CA-Markov模型为基础，采用最优概率选择策略，优先选取综合转换概率最大的元胞发生转换。直到输出地类元胞数量达到Markov预测数量时终止该类型地类转换，以整体角度从优判断对元胞的转化方向。图4为最优概率选择策略示意图。

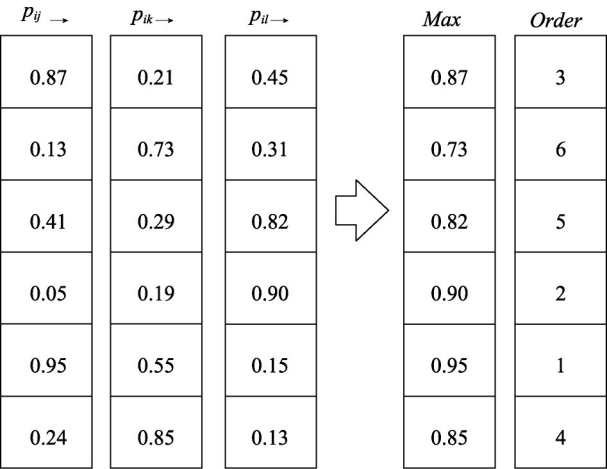


图4 最优概率选择策略  
Fig. 4 Optimal probability selection policy

3 研究案例

3.1 研究区

大连经济技术开发区地处辽东半岛南端，处辽宁沿海经济带内重要位置。全域面积1074.6 km<sup>2</sup>，位于38°56'N~39°11'N与121°34'E~122°11'E之间（图5）。向南与大连市中心城区毗邻，掌握大连市中心城区与沈阳等内陆重要城市交通运输咽喉，该区近20年来经济发展迅速，土地利用变化剧烈，具有较高的研究价值。

3.2 数据源

模型使用多时相土地利用数据进行模拟，土地利用数据来自大连市国土资源和房屋局提供的符合中华人民共和国土地利用现状分类标准（GB/T 21010-2007）的1998、2004以及2009年1:10000矢量土地利用数据库（表1）。通过ArcGIS进行重分类、格式转换之后得到包含建设用地（B）、农用地（A）、林地（F）和水域（W）4种地类栅格格式土地利用数据。建设用地、农用地、林地面积大且变化剧烈，因此作为研究对象分析其变化机理，水域是重要自然资源要素但是其变化微小，因此在模拟过程中其面积设为保持不变，土地利用类型重分类方法（表2）。道路、街道中心、海岸线数据来源于大连市国土

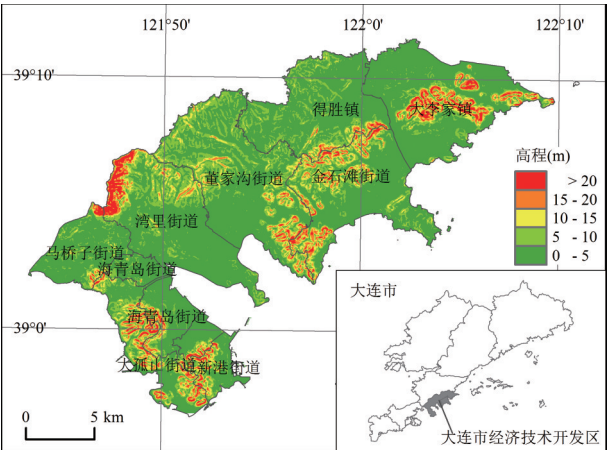


图5 研究区位置图  
Fig. 5 The location of the study area

表 1 数据来源与说明  
Tab. 1 Data sources and description

数据	数据特征	数据来源
土地利用	1:10000 面矢量数据	大连市国土资源和房屋局
道路	线矢量数据	大连市国土资源和房屋局
街道中心	点矢量数据（含省县乡三级道路）	大连市国土资源和房屋局
海岸线	线矢量数据	大连市国土资源和房屋局
土地利用分区	2006 年—2020 年规划矢量数据	大连市国土资源和房屋局
建设用地管制区	2006 年—2020 年规划矢量数据	大连市国土资源和房屋局
地形图	1:10000 矢量数据	大连市国土资源和房屋局

表 2 土地利用分类及含义  
Tab. 2 Classification of land-use types

一级类型	二级类型	含义
B 建设用地	B1 城乡及其他建设用地 B2 交通水利用地	指建造建筑物、构筑物的土地。包括居民点用地、独立工矿用地、特殊用地、风景旅游用地、交通用地、水利设施用地等。
A 农用地	A1 耕地 A2 其他农用地	指直接用于农业生产的土地，包括耕地、园地、草地及其他农用地
F 林地	F1 林地	除去农用地、建设用地等受人类干扰较少或尚未开发利用的林地、以及极少量荒草地等。
W 水域	W1 水域 W2 滩涂沼泽	指河流水面和湖泊水面以及滩涂沼泽。

资源和房屋局提供的基础数据综合数据库；土地用途分区，建设用地管制分区数据来自大连市国土资源和房屋局提供的土地利用规划数据；1:10000 地形图数据来自大连市国土资源和房屋局（表 1）。

3.3 模拟过程

数据处理：整合土地利用矢量数据与遥感影像解译土地利用数据进行修正与归一化处理，得到 1998 年、2004 年与 2009 年 3 期土地利用数据。模型校正：根据 1998 年和 2004 年土地利用数据，分别以建设用地、农用地、林地为研究对象，利用上文公式 2 计算方法，统计各类型元胞的土地利用转换方向、数量以及邻域范围内建设用地、农用地、林地的元胞数量并排序，得到如下 3 个表格：

根据公式 3 以及表 3 数据计算在局部土地利用竞争作用下土地利用类型转换方向及其概率。在计算时首先计算具有相同输入地类、邻域地类和邻域地类元胞数量的三个数据之和，然后计算出三种输出地类发生次数所占比重（表 4）。图 6 表示计算过程。

根据表 4 内容绘制各土地利用类型转换方向与概率曲线图 7。其中纵轴表示地类转换的概率，横轴表示邻域内建设用地、农用地、林地元胞数量。由图 7 可知：① 从 1、5、9 三个子图可以看出邻域范围内与中心元胞地类相同的元胞越多，中心元胞保持地类不变的概率越大。传统元胞自动机也正是利用这一点进行模拟。但从子图 9 看出在邻域林地较少是中心元胞为林地的有稍大于 50% 的概率转化为农用地，说明该区有对孤立零星林地进行开垦的活动。② 横向对比各图发现，当元胞邻域内某种异于中心元胞地类的元胞占优势时，中心元胞地类向该地类发生转移概率增大，其中建设用地向农用地和林地的最大转移概率均为 50%，农用地向建设用地和林地最大转移概率为 60.9% 和 67.8%，林地向建设用地和农用地最大转移概率为 100% 和 67.2%。这表示土地利用率的稳定性由强到弱依次是建设用地、农用地、林地。同时可以看出建设用地向农用地、林地转移概率

表3 土地利用类型流转统计表  
Tab. 3 Statistics transfer of land-use types

输入地类	邻域地类	输出地类	邻域地类元胞数量								
			0	1	2	3	4	5	6	7	8
B	B	B	146	366	747	1419	2302	4799	3282	3724	19126
B	B	A	76	133	213	332	419	355	210	140	264
B	B	F	78	122	212	278	367	362	253	219	377
	合计		300	621	1172	2029	3088	5516	3745	4083	19767
B	A	B	29519	1954	1498	1316	861	470	215	58	20
B	A	A	505	221	299	372	346	209	123	39	28
B	A	F	1196	354	231	203	152	76	32	16	8
	合计		31220	2529	2028	1891	1359	755	370	113	56
B	F	B	30476	2305	1292	959	500	228	101	42	8
B	F	A	1317	430	221	89	44	28	7	5	1
B	F	F	1134	299	255	231	168	81	65	26	9
	合计		32927	3034	1768	1279	712	337	173	73	18
A	B	B	3643	785	640	614	319	191	98	44	28
A	B	A	23630	2871	1741	1279	535	249	90	38	13
A	B	F	5545	740	394	255	120	37	16	4	5
	合计		32818	4396	2775	2148	974	477	204	86	46
A	A	B	145	238	420	650	887	1128	917	862	1115
A	A	A	78	294	701	1459	2616	3985	4727	6139	10447
A	A	F	170	261	404	693	943	1100	1055	1121	1369
	合计		393	793	1525	2802	4446	6213	6699	8122	12931
A	F	B	2821	1353	886	586	358	199	104	40	15
A	F	A	15337	6555	3900	2385	1249	593	287	116	24
A	F	F	2135	1314	1074	928	704	454	255	170	82
	合计		20293	9222	5860	3899	2311	1246	646	326	121
F	B	B	3542	776	591	580	328	126	55	26	5
F	B	A	3816	530	349	215	100	41	21	5	0
F	B	F	35875	1801	996	740	299	58	20	4	0
	合计		43233	3107	1936	1535	727	225	96	35	5
F	A	B	3070	823	626	531	399	269	178	99	34
F	A	A	544	460	553	685	713	650	677	512	283
F	A	F	29816	3347	2200	1658	1125	777	471	295	104
	合计		33430	4630	3379	2874	2237	1696	1326	906	421
F	F	B	213	408	467	540	689	781	638	691	1602
F	F	A	532	800	818	664	665	567	424	288	319
F	F	F	216	508	762	1116	1757	2612	2790	3926	26106
	合计		961	1716	2047	2320	3111	3960	3852	4905	28027

基本相同，农用地向林地转移概率大于向建设用地转移概率，林地向建设用地转移概率大于向农用地转移概率。③ 分组对比子图2和4、3和7、6和8，发现中心元胞向与中心元胞地类和邻域地类都不相同的第三类地类转移概率较稳定，在0到20%之间波动。④ 对比子图3和7发现，在建设用地和林地相互作用的过程中，林地明显处于劣势。⑤ 从图中整体可以看出，各地类转换概率与其邻域范围内其他地类统计数成线性关系，通过一元一次方程就能很好的拟合。公式4可以通过以下公式实现：



表4 土地利用转换方向与概率表  
Tab. 4 Land-use change directions and probability

基础地类	邻域地类	输出地类	概率								
			0	1	2	3	4	5	6	7	8
B	B	B	0.487	0.589	0.637	0.699	0.745	0.870	0.876	0.912	0.968
B	B	A	0.253	0.214	0.182	0.164	0.136	0.064	0.056	0.034	0.013
B	B	F	0.260	0.196	0.181	0.137	0.119	0.066	0.068	0.054	0.019
B	A	B	0.946	0.773	0.739	0.696	0.634	0.623	0.581	0.513	0.357
B	A	A	0.016	0.087	0.147	0.197	0.255	0.277	0.332	0.345	0.500
B	A	F	0.038	0.140	0.114	0.107	0.112	0.101	0.086	0.142	0.143
B	F	B	0.926	0.760	0.731	0.750	0.702	0.677	0.584	0.575	0.444
B	F	A	0.040	0.142	0.125	0.070	0.062	0.083	0.040	0.068	0.056
B	F	F	0.034	0.099	0.144	0.181	0.236	0.240	0.376	0.356	0.500
A	B	B	0.111	0.179	0.231	0.286	0.328	0.400	0.480	0.512	0.609
A	B	A	0.720	0.653	0.627	0.595	0.549	0.522	0.441	0.442	0.283
A	B	F	0.169	0.168	0.142	0.119	0.123	0.078	0.078	0.047	0.109
A	A	B	0.369	0.300	0.275	0.232	0.200	0.182	0.137	0.106	0.086
A	A	A	0.198	0.371	0.460	0.521	0.588	0.641	0.706	0.756	0.808
A	A	F	0.433	0.329	0.265	0.247	0.212	0.177	0.157	0.138	0.106
A	F	B	0.139	0.147	0.151	0.150	0.155	0.160	0.161	0.123	0.124
A	F	A	0.756	0.711	0.666	0.612	0.540	0.476	0.444	0.356	0.198
A	F	F	0.105	0.142	0.183	0.238	0.305	0.364	0.395	0.521	0.678
F	B	B	0.082	0.250	0.305	0.378	0.451	0.560	0.573	0.743	1.00
F	B	A	0.088	0.171	0.180	0.140	0.138	0.182	0.219	0.143	0.00
F	B	F	0.830	0.580	0.514	0.482	0.411	0.258	0.208	0.114	0.00
F	A	B	0.092	0.178	0.185	0.185	0.178	0.159	0.134	0.109	0.081
F	A	A	0.016	0.099	0.164	0.238	0.319	0.383	0.511	0.565	0.672
F	A	F	0.892	0.723	0.651	0.577	0.503	0.458	0.355	0.326	0.247
F	F	B	0.222	0.238	0.228	0.233	0.221	0.197	0.166	0.141	0.057
F	F	A	0.554	0.466	0.400	0.286	0.214	0.143	0.110	0.059	0.011
F	F	F	0.225	0.296	0.372	0.481	0.565	0.660	0.724	0.800	0.931

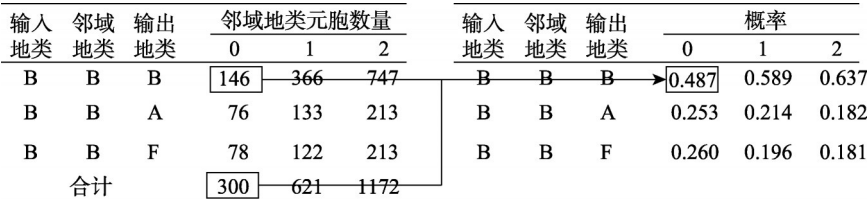


图6 不同邻域情景下中心元胞地类转换概率计算示意图  
Fig. 6 The center cell convert probabilities calculation with different neighborhood condition

$$C_{i \rightarrow j|k} = aN_k + b$$

(11)

式中： $N_k$  是邻域范围内k地类元胞数量； $a$ 、 $b$  是方程系数（表5）。

土地利用变化还与一系列非限定性适宜条件、限定性适宜条件有关。结合研究实际情况，选取的变量如表6。Markov模型可以有效的预测模拟时间段内土地利用变化总量。利用1998年与2004年土地利用数据，提取土地利用转移概率矩阵（表7），作为每次迭代元胞转换数量上限的决策依据，同时表中数据从全局的角度印证了图7的分析结果。

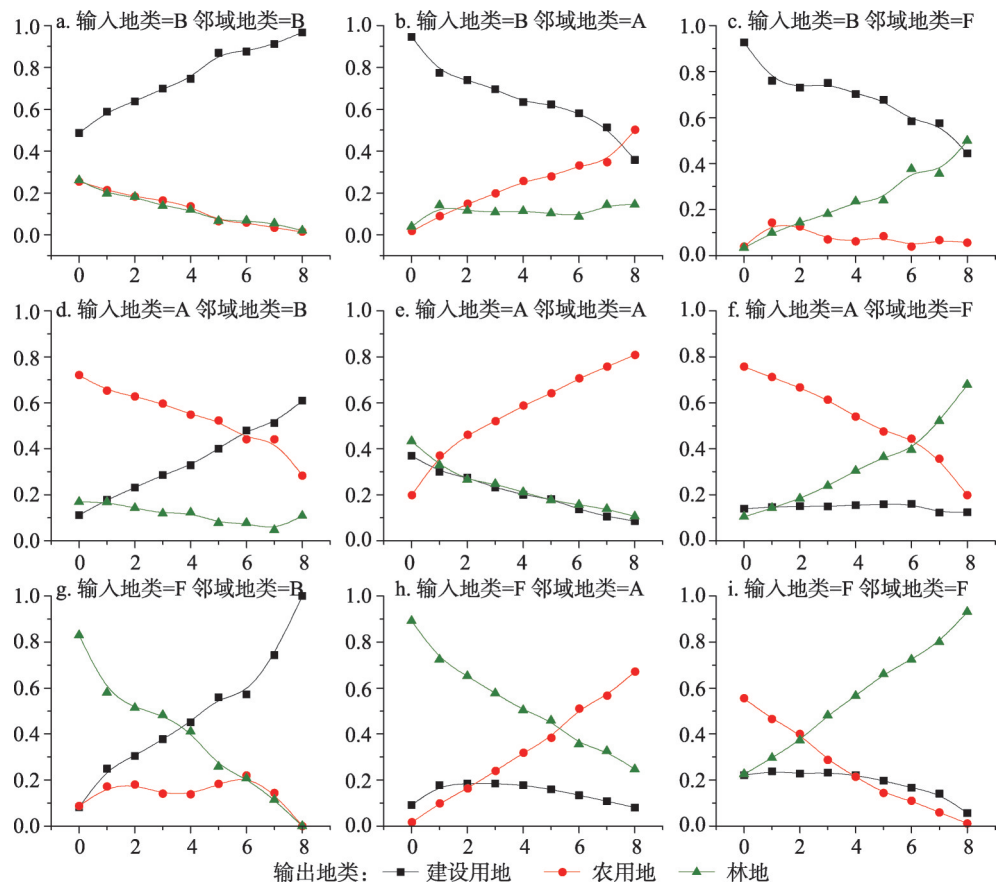


图7 用地转换与概率曲线图

Fig. 7 Land-use conversion and probability curves

表5 局部土地利用竞争潜力方程系数矩阵

Tab. 5 Equation coefficient matrix of localized land-use competition potential

		ToB			ToA			ToF		
		B	A	F	B	A	F	B	A	F
B	a	0.059	-0.059	-0.047	-0.028	0.053	-0.005	-0.028	0.006	0.053
	b	0.459	0.945	0.920	0.263	-0.024	0.102	0.263	0.079	-0.023
A	a	0.060	-0.034	-0.002	-0.047	0.070	-0.065	-0.013	-0.034	0.066
	b	0.048	0.380	0.154	0.773	0.211	0.852	0.179	0.380	-0.006
F	a	0.098	-0.006	-0.019	-0.005	0.081	-0.069	-0.093	-0.075	0.087
	b	-0.007	0.176	0.282	0.167	-0.075	0.592	0.840	0.899	0.126

表6 元胞适宜性因子与权重

Tab. 6 Cellular suitability factors and weights

类别	因子	建设用地	农用地	林地
适宜条件	至街道中心距离	3.7	-3.1	-3.5
	至道路距离	2.3	1.1	-4.1
	至海岸线距离	1.2	-1.2	1.1
	坡度	2.1	2.3	1.2
限制条件	土地用途分区	✓	✓	✓
	建设用地管制区	✓	-	-

模拟阶段：以2004年土地利用数据为初始化数据，以Markov模型预测的转移面积为模拟上限，通过计算机自动机判别迭代次数，获得2009年模拟土地利用数据。

3.4 结果验证

土地利用变化是一个十分复杂的地理过程，受到自然条件、人文因素以及社会经济等诸多方面的影响，精确模拟土地利用变化是非常困难的，因此模拟土地利用变化的整体格局显得更加重要。如图8所示为大连经济技术开发区2009年实际土地利用与模拟土地利用的对比图，模拟结果整体空间布局与实际整体空间布局比较接近，其中南部地区建设用地模拟精度最为突出。北部建设用地分布分散周围多环绕农业用地，模拟结果误差相对较大。

表 7 土地利用转移概率矩阵

Tab. 7 Land-use transition probability matrix

输入地类	输出地类		
	B	A	F
B	0.891	0.053	0.056
A	0.145	0.693	0.162
F	0.118	0.100	0.782

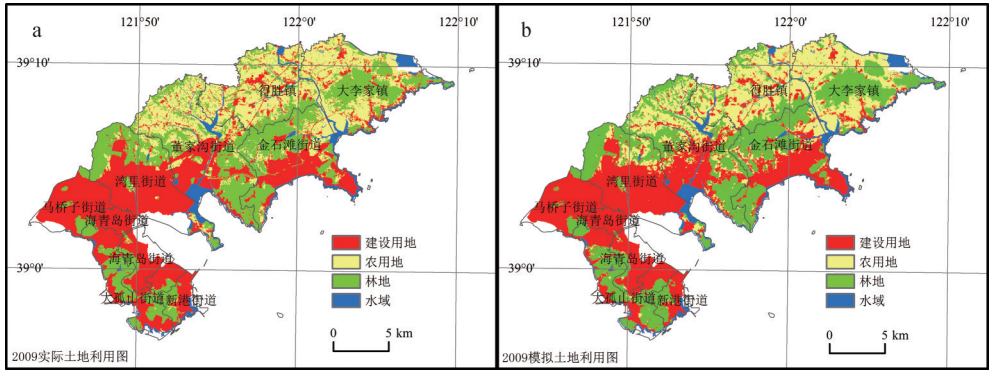


图8 实际土地利用与基于LLCCA模型的模拟土地利用的对比图  
Fig. 8 Comparison of actual and simulated land use based on LLCCA model

为定量验证模型精确程度，首先对模拟土地利用图与实际土地利用图做点对点对比分析，结果显示建设用地、农用地和林地准确率分别为85.06%、72.81%和79.56%。然后对模拟土地利用图与实际土地利用图进行Kappa系数检验，检验结果如表8所示，从表中可以看出建设用地、农用地和林地对应Kappa系数分别为0.762，0.634和0.678，具有一定的可信度。范强等人对大连市经济技术开发区内部的金石滩街道从景观格局的旅游用地做了相关研究<sup>[48]</sup>，虽然其研究区域只覆盖金石滩街道，但从模拟的用地格局来看与本研究具有较好的一致性。

表 8 LLCCA模型模拟精度评价表

Tab. 8 Accuracy assessment of LLCCA model

真实数据	模拟数据		Kappa
	建设用地	非建设用地	
建设用地	49664	8725	0.762
非建设用地	7940	79696	
	农用地	非农用地	Kappa
	农用地	非农用地	
农用地	27821	10389	0.634
非农用地	10212	97603	
	林地	非林地	Kappa
	林地	非林地	
林地	39321	10105	0.678
非林地	11067	85532	

为验证模型的改进效果，利用传统元胞自动机模型对研究区2009年土地利用进行模拟（图9）。从图中可以看出总体模拟较好，但是大李家镇、得胜镇与董家沟3个街道建设用地模拟效果较差，分别存在增长面积过大和模拟位置不准确的问题。董家沟西北部林地出现较大面积扩展不符合实际情况，该区域地形条件较复杂更利于林地发展，因此在没有考虑邻域内农用地比重的条件下，大量现有农用地转化为林地。





地)进行同时模拟,其对应Kappa系数分别为0.762、0.634和0.678,具有较好的一致性。

## 4.2 讨论

本文提出基于元胞局部土地利用竞争力元胞自动机模型能够实现多地类综合演化模拟,对于城市用地扩展和农用地、林地等未利用地的开发与保护提供了分析与预测的手段。同时,对推动元胞自动机的研究重点向邻域作用方向过度具有一定的积极意义。对于社会、经济、自然三者作用关系驱动土地利用演化,转化规则在不同时间间隔的连续性和变异性以及其作用指标等工作上,有待进一步研究。

## 参考文献(References)

- [1] Huang Qingxu, Shi Peijun, He Chunyang et al. Modelling land use change dynamics under different aridification scenarios in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(12): 1299-1310. [黄庆旭, 史培军, 何春阳等. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟. *地理学报*, 2006, 61(12): 1299-1310.]
- [2] Lei Shi, Quan Bing, Ouyang Hong et al. Prediction and comparison of the land use changes in Changsha city and Quanzhou city based on Markov model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6): 224-229. [雷师, 全斌, 欧阳鸿等. 基于Markov模型的长沙市和泉州市土地利用变化预测及对比研究. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 224-229.]
- [3] Liu Xiaoping, Li Xia, Chen Yimin et al. Agent-based model of residential location. *Acta Geographic Sinica*, 2010, 65(6): 695-707. [刘小平, 黎夏, 陈逸敏等. 基于多智能体的居住区位空间选择模型. *地理学报*, 2010, 65(6): 695-707.]
- [4] Liang Youjia, Xu Zhongmin, Zhong Fanglei. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou district of Zhangye city. *Geographical Research*, 2011, 30(3): 564-576. [梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于SD和CLUE-S模型的张掖市甘州区土地利用情景分析. *地理研究*, 2011, 30(3): 564-576.]
- [5] He Chunyang, Chen Jin, Shi Peijun et al. Study on the spatial dynamic city model based on CA (cellular automata) model. *Advance In Earth Sciences*, 2002, 17(2): 188-195. [何春阳, 陈晋, 史培军等. 基于CA的城市空间动态模型研究. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 188-195.]
- [6] Neumann J V.. *Theory of self-reproducing automata*. University of Illinois, 1966.
- [7] Wolfram S. *Universality and complexity in cellular automata*. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1984, 10(1): 1-35.
- [8] Wolfram S. *A new kind of science*. Urbana-Champaign, IL: Wolfram Media, 2002.
- [9] Lambin E F, Geist H, Rindfuss R R. *Land-Use and Land-Cover Change*: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [10] Wang Y, Li S. Simulating multiple class urban land-use/cover changes by RBFN-based CA model. *Comput. Geosci-Uk*, 2011, 37(2): 111-121.
- [11] Jokar Arsanjani J, Helbich M, Kainz W et al. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 265-275.
- [12] Sun J, Zhang L, Peng C et al. CA-based urban land use prediction model: a case study on orange county, Florida, US. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2012, 12(6): 85-92.
- [13] Long Ying, Han Haoying, Mao Qizhi. Establishing urban growth boundaries using constrained CA. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 999-1008. [龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性CA制定城市增长边界. *地理学报*, 2009, 64(8): 999-1008.]
- [14] Qiu Bingwen, Chen Chongcheng. Land use change simulation model based on MCDM and CA and its application. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(2): 165. [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. *地理学报*, 2008, 63(2): 165-174.]
- [15] Berjak Stephen G., Hearne John W. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. *Ecological Modelling*, 2002, 148(2): 133-151.
- [16] Perry G. Current approaches to modelling the spread of wildland fire: A review. *Progress in Physical Geography*, 1998, 22(2): 222-245.
- [17] Quartieri J, Mastorakis N E, Iannone G et al. A cellular automata model for fire spreading prediction. *Latest Trends on Urban Planning and Transportation*, 2010: 173-178.
- [18] Yassemi S, Dragičević S, Schmidt M. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model

- to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modelling*, 2008, 210(1/2): 71-84.
- [19] Muci A L, Jorquera M A, Ávila Á I et al. A combination of cellular automata and agent-based models for simulating the root surface colonization by bacteria. *Ecological Modelling*, 2012, 274: 1-10.
- [20] Rasmussen R, Hamilton G. An approximate Bayesian computation approach for estimating parameters of complex environmental processes in a cellular automata. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 29(1): 1-10.
- [21] Perez L, Dragicevic S. Landscape-level simulation of forest insect disturbance: Coupling swarm intelligent agents with GIS-based cellular automata model. *Ecological Modelling*, 2012: 53-64.
- [22] Yang J, Wang Z, Yang D et al. Ecological risk assessment of genetically modified crops based on cellular automata modeling. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(6): 1132-1136.
- [23] Han Y, Ko S. Analysis of a cellular automaton model for car traffic with a junction. *Theoretical Computer Science*, 2012: 54-67.
- [24] Jin X, White R. An agent-based model of the influence of neighbourhood design on daily trip patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012, 36(5): 398-411.
- [25] Lárraga M E, Alvarez-Icaza L. Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(23): 5425-5438.
- [26] Zhou Chenghu, Sun Zhanli, Xie Yichun. *The Research of Geography Cellular Automata*. Beijing: Science Press, 1999: 1-163. [周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999: 1-163.]
- [27] He Chunyang, Shi Peijun, Chen Jin et al. A study on land use/cover change in Beijing area. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 679-687. [何春阳, 史培军, 陈晋等. 北京地区土地利用/覆盖变化研究. 地理研究, 2001, 20(6): 679-687.]
- [28] Lauf S, Haase D, Hostert P et al. Uncovering land-use dynamics driven by human decision-making: A combined model approach using cellular automata and system dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 27/28: 71-82.
- [29] Mitsova D, Shuster W, Wang X. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape And Urban Planning*, 2011, 99(2): 141-153.
- [30] Robinson D T, Murray-Rust D, Rieser V et al. Modelling the impacts of land system dynamics on human well-being: Using an agent-based approach to cope with data limitations in Koper, Slovenia. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012, 36(2): 164-176.
- [31] Pan Y, Roth A, Yu Z et al. The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling. *Computers Environment and Urban Systems*, 2010, 34(5): 400-408.
- [32] Yu W, Zang S, Wu C et al. Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 600-608.
- [33] Li X, Lao C, Liu Y et al. Early warning of illegal development for protected areas by integrating cellular automata with neural networks. *Journal of Environmental Management*, 2013, 130: 106-116.
- [34] Li X, Yang Q, Liu X. Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 86(2): 177-186.
- [35] Liu X, Li X, Shi X et al. Simulating complex urban development using kernel-based non-linear cellular automata. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1/2): 169-181.
- [36] Li Xia, Yeh Anthony Gar-On. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 19-27. [黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27.]
- [37] Li Xia, Yeh Anthony Gar-On. Optimal spatial search using genetic algorithms and GIS. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 745-753. [黎夏, 叶嘉安. 遗传算法和GIS结合进行空间优化决策. 地理学报, 2004, 59(5): 745-753.]
- [38] Li Xia, Liu Xiaoping. Case-base cellular automaton for simulation urban development in a large complex region. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(10): 1097-1109. [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. 地理学报, 2007, 62(10): 1097-1109.]
- [39] Li Xia, Yeh Anthony Gar-On. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 159-166. [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. 地理学报, 2002, 57(2): 159-166.]
- [40] Al-Kheder S, Wang J, Shan J. Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multi-temporal satellite images. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(11/12): 1271-1293.
- [41] Feng Yongjiu, Liu Miaolong, Tong Xiaohua et al. Kernel principal components analysis based cellular model for restructuring and predicting urban evolution. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(6): 665-675. [冯永玖, 刘妙龙, 童小华等. 基于核主成分元胞模型的城市演化重建与预测. 地理学报, 2010, 65(6): 665-675.]

- [42] Santé I, García A M, Miranda D et al. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(2): 108-122.
- [43] Maria De Almeida C, Batty M, Vieira Monteiro A M et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2003, 27(5): 481-509.
- [44] Gong J, Liu Y, Chen W. Land suitability evaluation for development using a matter-element model: A case study in Zengcheng, Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 2012, 29(2): 464-472.
- [45] Yang X, Zheng X, Lv L. A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata. *Ecological Modelling*, 2012, 233: 11-19.
- [46] Moreno N, Wang F, Marceau D J. Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2009, 33(1): 44-54.
- [47] Shafizadeh Moghadam H, Helbich M. Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 2013, 40: 140-149.
- [48] Fan Qiang, Yang Jun, Wu Nan et al. Landscape patterns changes and dynamic simulation of coastal tourism town: A case study of Dalian Jinshitan National Tourist Holiday Resort. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1467-1475. [范强, 杨俊, 吴楠 等. 海岸旅游小镇景观格局演变与动态模拟: 以大连市金石滩国家旅游度假区为例. *地理科学*, 2013, 33(12): 1467-1475.]

## LUCC simulation based on the cellular automata simulation: A case study of Dalian Economic and Technological Development Zone

YANG Jun<sup>1,2</sup>, XIE Peng<sup>1</sup>, XI Jianchao<sup>2</sup>, GE Quansheng<sup>2</sup>, LI Xueming<sup>1</sup>, MA Zhandong<sup>1</sup>

(1. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** China has been experiencing the exceptionally drastic land-use/cover changes (LUCC) in the last decades. Many techniques focused on the simulation of the single type of land-use change. However, simulating changes between different types of land-use is much more difficult than simulating change for a single type of land-use. The key to simulations based on the Cellular Automata (CA) model is how to define the transition rules. This paper built a localized land-use competition CA model to examine land-use change rules for several land-use candidates under different localized land-use patterns. By this method, the potential transformation amount of each land-use type was calculated and an optimum transition rule was used to balance the amount of land-use changes of complicated types during the simulation period. The total area of each land-use type was predicted by Markov analysis as the global variable during the whole simulation period. This CA-Markov method was adopted to simulate LUCC in Dalian Economic and Technological Development Zone in 1998 and 2009, followed by a comparative experiment. The results show that: (1) The established test method is feasible for exploring the interaction between various land-use classes; (2) This model had high simulation precision, and the Kappa coefficients in urban area, agricultural area and undeveloped area were 0.762, 0.634 and 0.678, respectively; (3) The model proposed in this paper shows a symbolic way to studying the conversion among different land-use types, which could be used to improve the interactive relationship of LUCC.

**Keywords:** localized land-use competition; cellular automata; land-use change; simulation; Dalian Economic and Technological Development Zone