

# 多层次矢量元胞自动机建模及土地利用变化模拟

孙毅中<sup>1,2,3</sup>, 杨静<sup>1,2,3</sup>, 宋书颖<sup>1,2,3</sup>, 朱杰<sup>4</sup>, 戴俊杰<sup>5</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 4. 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037; 5. 江阴市城乡规划设计院, 江阴 214433)

**摘要:** 城市规划对土地利用变化起着重要的引导作用, 各层次规划相互支撑、互为补充, 自上而下影响着土地利用格局的演变。矢量元胞自动机以不规则的地理实体作为基本单元, 可以更逼真地表达客观复杂的城市用地空间结构。然而, 当面向具有层次协同性、空间引导性和管控传导性等特征的城市规划时, 其元胞多层次体系构造、层次间协同方法和转换规则获取等关键问题凸显出来。本文以江阴市2007年、2012年、2017年3期土地利用现状数据为基础, 在多层次矢量元胞自动机建模基础上, 模拟了2017年土地利用变化, 通过模拟结果与用地现状对比分析, 对模型个别参数进行了修正, 进一步提高了模型的可行性与适用性, 进而预测了2022年城市土地利用格局。模拟结果显示, 中心城片区建设用地发展已经趋于饱和, 澄南、澄东南和澄东片区建设用地扩张较为明显, 有逐步形成“中心城区—城镇组团—村庄”三级城乡空间聚落体系的趋势。最后利用FoM指标对模拟结果进行了评价, 得到整体和各片区的精度基本都大于或接近于0.21, 表明模拟结果精度较高, 其构建的模型在面向多层次规划的用地变化模拟方面具有更好的效果。

**关键词:** 城市规划体系; 多层次矢量元胞自动机; 传导机制; 土地利用变化; 建模与模拟

DOI: 10.11821/dlxb202010009

## 1 引言

城市发展是一个复杂系统的演化过程, 城市用地结构的变化是城市发展最直观的表现。中国正处于快速城镇化阶段, 人类频繁的活动使得用地空间格局正处于动态的变迁与发展之中, 城市空间的重构与调整等面临着巨大的挑战。城市土地利用变化过程的研究, 可以洞察城市发展的基本走向和未来趋势, 对于当前土地利用空间格局中存在的现实问题的解决具有重要意义<sup>[1]</sup>。

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 具有强大的空间运算能力, 可以有效地模拟复杂的动态系统, 已经被广泛应用于土地利用变化、城市扩展模拟等领域<sup>[2-6]</sup>。杨俊等<sup>[7]</sup>设计了一个局部土地利用竞争的CA模型, 并用于模拟大连市经济技术开发区1998—2009年土地利用变化。冯永玖等<sup>[8]</sup>利用KPCA-CA模型, 模拟和重建了快速城市化区域上海市嘉定区1989—2006年城市演化过程, 预测了研究区2010年的城市空间格局。龙瀛等<sup>[9-10]</sup>考虑城市发展的综合因素, 提出了一种约束性CA模型识别城市增长边界的方法, 客观、

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671392, 41871297) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671392, No.41871297]

作者简介: 孙毅中(1957-), 男, 江苏常州人, 教授, 博士生导师, 主要从事时空数据分析与城市规划GIS研究。

E-mail: sunyizhong\_cz@163.com

全面地分析了多个城市发展政策下城市增长的时空动态变化过程,进而实现了对城市形态的分析。上述研究成果主要采用规则的栅格数据或规则格网单元的城市空间表达,然而,现实世界中的大部分地理实体都是不规则的多边形,规则元胞自动机也逐渐曝露出明显的缺陷和不足<sup>[11]</sup>。首先,矢量地块对应客观地理实体,与规则的栅格单元相比可以更逼真地表达客观复杂的城市用地空间结构<sup>[12]</sup>。其次,在城市规划中,矢量地块是用地功能分析和空间管控的最小单元,也是土地利用状态变化和几何形变的基本单元。最后,城市空间的引导、政策的制定和社会统计的数据往往都是建立在矢量单元基础上,尤其是城市土地利用、城市用地格局呈现矢量的实体化<sup>[13]</sup>。因此,采用矢量数据结构构建的CA可以更加合理和精确地模拟土地利用变化,并对城市发展的相关理论、规划、政策等进行检验与评估。

城市规划体系是由总体规划、分区规划、控制性详细规划和修建性详细规划等不同层次的规划组成<sup>[14]</sup>,具有多层次联动、空间引导、内涵关联和指标约束等特征,它们相互支撑、互为补充,并自上而下、从宏观到微观渐近式地引导和约束着城市的发展与空间的优化,进而影响着城市土地利用格局。已有的关于城市土地变化模拟的CA模型研究,虽已有些涉及不规则的城市空间表达,但均是单一层次的。Moreno<sup>[15]</sup>、Yao等<sup>[16]</sup>以土地利用图斑为不可分割的最小矢量单元,实现了矢量CA的单元确定与模拟。Pinto等<sup>[17]</sup>结合人口普查数据和社会经济数据,构建了一个基于人口普查区块的矢量CA模型,精细化地模拟了城市发展变化。Long等<sup>[18]</sup>结合OSM(Open Street Map)和POI(Point of Interest)数据,根据城市道路分割形成的交通小区,实现了基于矢量CA的城市地块识别。Dahal等<sup>[19-20]</sup>和Benenson等<sup>[21]</sup>基于地籍调查定义的矢量地块,动态模拟了城市增长过程。然而,城市规划过程具有多层次嵌套特征,土地利用变化受到自上而下的用地管控和指标约束<sup>[22]</sup>,反之,底层最基本地块的用地状态变化又自下而上影响上层元胞的变化,即元胞的约束条件与转换参数更新。因此,单层次的用地空间模拟并不能解决这种跨层次传递问题,为此,需结合城市规划层次体系特征,构建多层次耦合的矢量CA模型,促进CA在城市土地利用变化模拟方面更加凸显“空间层次化”。

本文提出了多层次矢量CA模型,通过构建面向多层次城市规划的层次嵌套和递归空间单元体系,将多层次的空间管控与传导效应作用到不同层次矢量元胞上,实现对用地转换模拟的全过程、全方位的联动控制,以江阴市2007年、2012年、2017年3期土地利用现状数据为基础,模拟了2017年全市及其分区的土地利用变化,通过模拟结果与用地现状对比分析,对模型个别参数进行了修正,预测了2022年的城市空间格局,并利用FoM(Figure of Merit)指标测算了模拟结果,其精度较高,进一步提高了模型的可用性。

## 2 模型与方法

### 2.1 多层次矢量元胞体系构建

面向城市规划体系下的矢量元胞具有显著的多层次嵌套特征,层次间的连通性使得高层次元胞自上而下制约着低层次元胞的变化,而低层次元胞将动态变化信息自下而上传递给高层次元胞,实现动态更新并调节用地变化的速度与强度。本文应用图论法,结合城市空间规划体系特点,构建了一种适合于用地管控与传导过程的、定性与量化描述的多层次矢量元胞体系。

**2.1.1 层次体系的划分** 城市规划体系是多层次嵌套的,上层次的规划为下层次的规划提

出强制性框架,并给出指导性意见,通过下层次规划的编制达到落实和深化上层次规划的内容与要求,从而使下层次规划成为上层次规划实施的工具和途径,发挥引导城市建设健康发展的作用,如图1所示。结合江阴市市域范围、城市规模、等级和空间规划体系等特点,将矢量元胞体系划分为全局、片区、地块3个层次,利用图论法将层次体系映射到一个树形结构中,每个节点对应一个元胞,节点间采用连线进行空间与层次的关联,以表达层次体系的纵横向连通性:横向上,具有空间和属性相似性的同一层次元胞通过邻接关系进行相互作用的传递;纵向上,具有嵌套关系的元胞之间通过层次连接关系进行跨层次信息传递。

**2.1.2 层次体系的传递机制** 元胞的传递内容和传递方式对于传递机制起着关键作用。针对层次间元胞空间状态的异质性,需要研究层次间内容的自上而下传递方法,以及自下而上的约束规则更新方式;针对空间管控内容及其粒度的差异性,需要定量刻画元胞的空间要素在不同层次的转换规则与转换速率(图1)。

#### (1) 传递内容

用地管控内容是城市用地发展最直观、最基本的约束条件和引导性指标,具有自上而下的尺度效应。根据每个层次规划的空间特征,将管控内容划分为量的传导、二值约束、速度控制和概率转换4个方面。其中全局层次包括总量的控制和二值约束,片区层次包括分量控制和速度控制,地块层次则是相对应地块的转换概率控制。

为实现管控内容在图论模型中的空间传递,层次的元胞状态需要进一步量化表达为:

$$CA_{m,n} = \{v, \Phi_{m,n}, a \in A, \partial, \delta\} \quad (1)$$

式中:  $CA_{m,n}$ 表示第  $m$  层级中第  $n$  个元胞的状态;  $v$  表示元胞的用地转换速率;  $\Phi_{m,n}$  表示元胞对应的转换规则;  $a$  表示元胞的用地属性;  $A$  表示研究区内所有用地类型的集合(表1);  $\partial$  表示用地总量的控制性指标;  $\delta$  表示用地分量的控制性指标。

表1 用地类型集合

Tab. 1 The collection of land-use types

编码	用地类型						
	农用地	山地	村庄建设用	城镇建设用	道路用地	水域	特殊用地
	1	2	3	4	5	6	7

#### (2) 传递方式

鉴于具有层次结构元胞的嵌套性和规划过程的动态性,传递方式可分为自上而下的内容传递和自下而上的转换规则更新两个方面:①自上而下过程是描述纵向元胞之间管控内容的传递过程,按尺度划分为全局、片区和地块。全局尺度的总量约束指标控制片区指标的差异性分解,二值约束规则限制地块向建设用地转变的可能性,片区分解结果和转换速度限制分区内地块的转换总量与转换类型,局部地块通过邻域元胞之间的相互

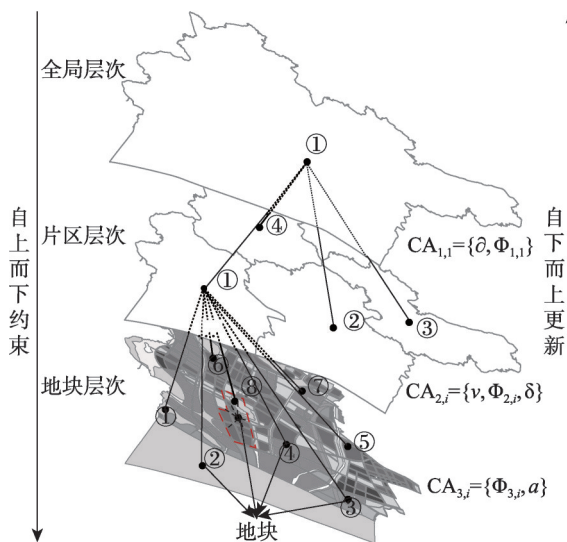


图1 矢量元胞层次体系构建

Fig. 1 The construction of hierarchical system of vector CA

影响而约束转换过程,并控制着地块自组织式增长的转换概率,最终综合多个层次转换概率得到地块类型转换。②一方面,自下而上描述的是底层地块转换结果对上层次约束转换速率的动态更新过程,底层元胞每次迭代都会以用地类型的变化作为结果,进而影响上层次元胞的属性;另一方面,约束条件的更新是通过实际用地情况变化的反馈进行,即从底层地块依次向上执行逐层次约束条件的动态更新。元胞层次体系的这种自上而下和自下而上的空间传递方式与图论的树形结构模型相契合,以此实现层次体系的传递机制。

## 2.2 多层次矢量CA转换规则计算

在多层次元胞体系构建基础上,依据自上而下的传递顺序将转换规则分为全局、片区、地块3个部分,采用先分层、再地块的计算方法:首先计算分层转换概率,然后统计每个地块各类用地转换的综合概率,最后判断地块最终转换类型(图2)。

**2.2.1 全局转换规则** 城市总体规划将城市用地分为近期建设区和禁建区两大类,从整体上实现了对用地转换的顶层控制和强制约束。为此,全局层次对用地变化的影响属于二值约束(刚性约束),存在以下两种情况:

$$P_{whole|i \rightarrow j} = \begin{cases} 1, & j = 3 \text{ or } 4, \text{ 近期建设区} \\ 0, & j = 3 \text{ or } 4, \text{ 禁建区} \end{cases} \quad (2)$$

在近期建设区内,用地向建设用地(村庄建设用地/城镇建设用地)转换的全局概率为1;而在禁建区内,用地向建设用地转换的全局概率为0。

**2.2.2 片区转换规则** 根据每个片区内的规划人口规模将全局层次的建设用地增量按比例进行差异性分解(公式(5)),进而以片区发展为目标,引导城市空间的生长与优化。

片区层次的约束作用可分为用地类型转换概率和转换速度两个方面:首先,依据两期现状栅格数据的用地变化情况,统计各用地类型之间发生转换的个数,得到每个片区的用地类型转移矩阵,利用Markov-chain模型<sup>[23-24]</sup>,计算得到各片区用地类型之间的转换概率 $P_{regli \rightarrow j}$ 。其中 $i$ 表示中心元胞的用地类型, $j$ 表示元胞转换的用地类型。根据每次迭代用地变化的结果,统计得到每一片区内建设用地总量占分区约束总量的比例,然后在基础转换概率上乘以一个建设用地转换速度控制系数 $Con_{speed\_n}$ ,实现模拟过程自上而下的动态更新。其中控制系数只作用于非建设用地向建设用地转换的情况:

$$P_{region|i \rightarrow j} = \begin{cases} P_{regli \rightarrow j} \times Con_{speed\_n}, & i \neq 3 \text{ or } 4 \text{ 且 } j = 3 \text{ or } 4 \\ P_{regli \rightarrow j}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$Con_{speed\_n} = f\left(\frac{Con\_land\_n}{Res_{region\_n}}\right) \quad (4)$$

$$Res_{region\_n} = Res_{total\_area} \times \frac{Pop_{region\_n}}{Pop_{total}} \quad (5)$$

式中: $P_{region|i \rightarrow j}$ 表示在片区层次上中心元胞向各类用地转换的概率,由Markov模型计算得到的转换概率 $P_{regli \rightarrow j}$ 和控制参数 $Con_{speed\_n}$ 决定; $Con_{speed\_n}$ 是关于建设用地增量与建设用地规模比值的函数; $Con\_land\_n$ 是第 $n$ 个片区内建设用地面积; $Res_{region\_n}$ 是第 $n$ 个片区约束性建设用地分解的指标; $Res_{total\_area}$ 是全局约束性建设用地指标; $Pop_{region\_n}$ 表示第 $n$ 个片区内的规划人口; $Pop_{total}$ 表示全局规划人口量。

### 2.2.3 地块转换规则

(1) 邻域影响力。在模型中,元胞局部邻域的确定是矢量CA转换规则的核心内容。本文借鉴现有文献中提出的方法,采用基于空间相邻的几何特征<sup>[25-26]</sup>和促进关系的非



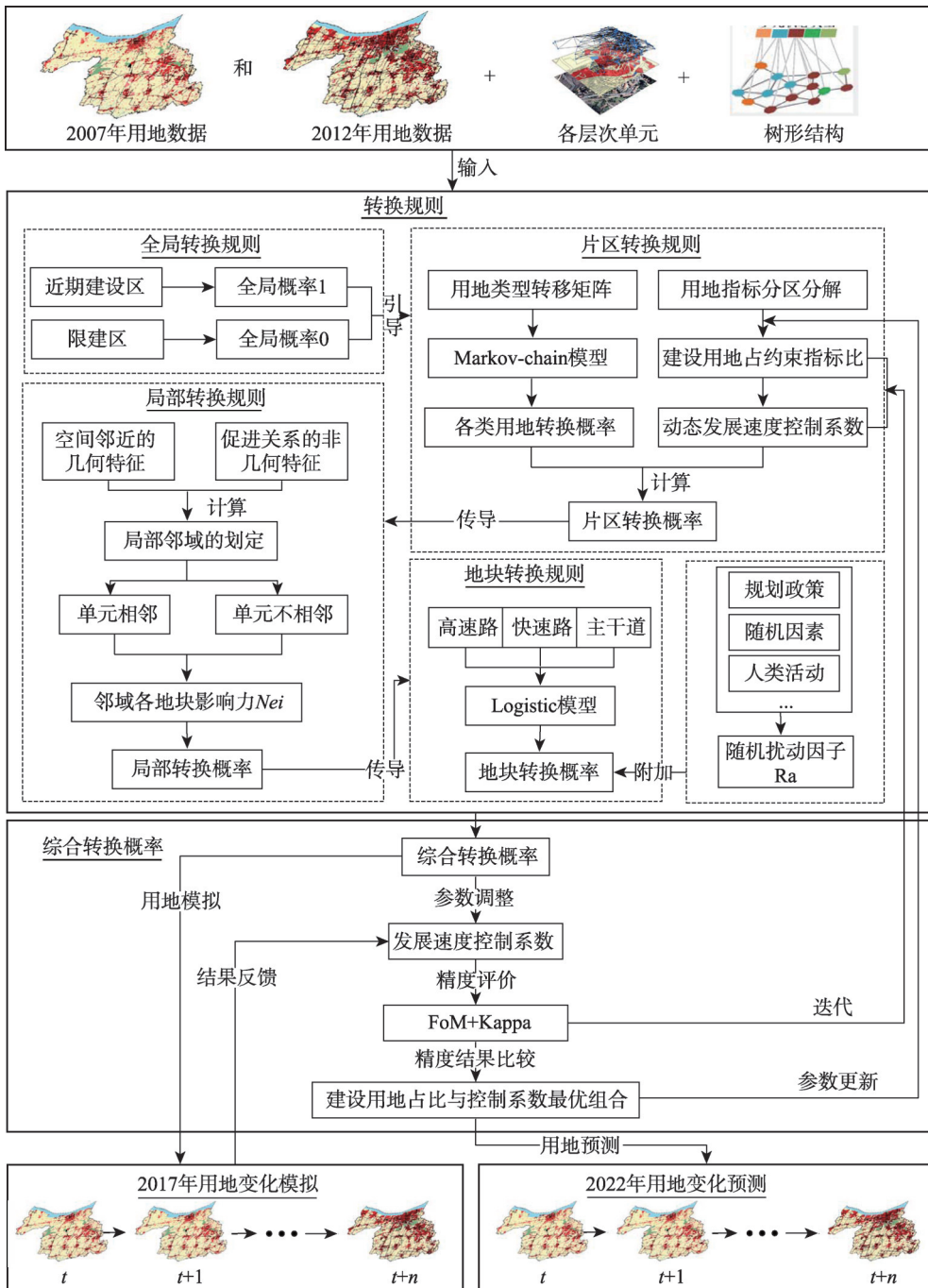


图2 多层次矢量CA流程图  
 Fig. 2 Flow chart of the multi-level vector CA

几何特征<sup>[15]</sup>, 识别中心元胞的“邻近性”地块, 划定局部邻域。如图 3a 所示, 中心元胞 C1 共有两个相邻的邻域地块 (C6, C7) 和两个空间不相邻但是存在促进关系的“邻近性”地块 (C2, C5)。在矢量空间中, 局部邻域对中心元胞用地类型转换影响力的度量需考虑面积、距离、公共边等因素, 如公式 (6) 所示:

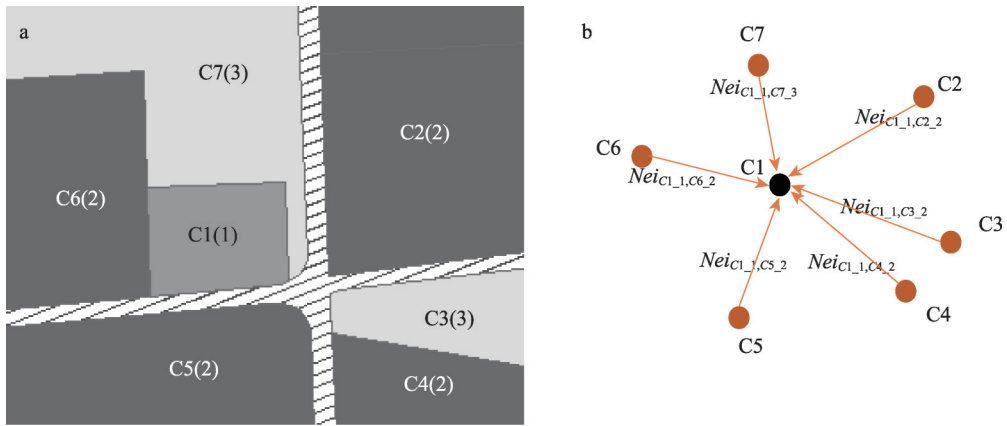


图3 局部影响力(a. 局部层次的邻域, b. 邻域影响力的量化)

Fig. 3 Local influence (a. neighbourhood of local level, b. quantification of neighbourhood influence)

$$Nei_{m_i, n_j} = \begin{cases} e^{-d_{m,n}/d} \times \frac{S_n/S_m - S_{\min}/S_m}{S_{\max}/S_m - S_{\min}/S_m} \times \frac{cb}{C}, & \text{单元相邻} \\ e^{-d_{m,n}/d} \times \frac{S_n/S_m - S_{\min}/S_m}{S_{\max}/S_m - S_{\min}/S_m}, & \text{单元不相邻} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Nei_{m_i, n_j}$  表示中心元胞  $m$  受邻域地块  $n$  的影响力;  $i, j$  分别表示中心单元和邻域单元的用地类型;  $S_m, S_n$  分别表示中心单元和邻域单元的面积;  $cb, C$  分别表示两个单元之间的公共边界长度和中心单元的周长;  $d_{m,n}, d$  分别表示两个单元的中心距离和为邻域所有地块到中心单元之间质心距离的平均值;  $S_{\max}, S_{\min}$  分别为研究区所有地块中面积的最大值和最小值。将图 3a 的邻域影响力量化, 得到图 3b, 按邻域用地类型统计在局部层次上中心元胞向各类用地转换的概率  $P_{local|i \rightarrow j}$ 。比如图 3b 中心元胞 C1 向用地类型 2 转换的概率为  $Nei_{C1,1,C2,2} + Nei_{C1,1,C3,3} + Nei_{C1,1,C4,2} + Nei_{C1,1,C5,2} + Nei_{C1,1,C6,2} + Nei_{C1,1,C7,3}$ 。

$$P_{local|i \rightarrow j} = \sum_j Nei_{m_i, n_j} \quad (7)$$

(2) 局部影响力。用地转换过程除了受上层规划的影响外, 地块所处的地理环境使其自身存在自组织增长的能力, 其中道路对城市发展的影响尤为显著。考虑到在城市建设发展过程中, 不同等级的道路对土地利用的影响范围存在差异, 本文选取不同等级的道路, 以 250 m 为间隔构建从 250 m 到 1000 m 的统计范围, 统计非建设地块到不同等级道路的距离。以非建设用地单元到不同等级道路的距离为自变量, 地块是否发生用地转换为因变量, 进行 Logistic 回归分析, 通过卡方值 (自变量和因变量的相关性) 的大小确定不同等级道路对用地的最显著影响范围。然后在最显著影响范围内, 利用 Logistic 模型度量地块在多级道路环境中向建设用地转换的综合概率<sup>[27-28]</sup>:

$$P_{block|i \rightarrow j} = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-z}}, & j=3 \text{ or } 4 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$z = a + \sum_n \beta_n d_n \quad (9)$$

式中:  $P_{block|i \rightarrow j}$  表示地块在道路建成环境中的转换概率;  $d_n$  是地块到不同等级道路距离;  $\beta_n$  表示逻辑回归参数;  $a$  为回归常数。

**2.2.4 随机扰动因子** 城市用地转换的过程中受到规划政策、随机因素、人类活动等各类事件的影响,使得整个转换过程更加复杂。因此,需进一步纳入随机项来反应CA模型的不确定性,可表示为<sup>[29]</sup>:

$$Ra = \left[ 1 + (-\ln \gamma)^a \right] \quad (10)$$

式中:  $\gamma$ 为(0, 1)范围内的随机数;  $a$ 为控制随机影响大小的参数。

**2.2.5 综合转换概率** CA是一种基于综合概率判断地块是否变换和如何变换的模型。在上述各层次转换规则约束下,利用公式(11)对用地转换概率进行综合运算:

$$P_{transi \rightarrow j} = Ra \times (P_{whole|i \rightarrow j} \times P_{region|i \rightarrow j} \times P_{local|i \rightarrow j} \times P_{block|i \rightarrow j}) \quad (11)$$

式中:  $P_{transi \rightarrow j}$ 表示用地类型为*i*的中心元胞向*j*类用地转换的概率。其次,对每个地块的转换概率进行排序,最大的转换概率所对应的用地类型转换方向( $lu\_aim$ )即为此地块的潜在转换方向:

$$P_{transi \rightarrow lu\_aim} = \max (P_{transi \rightarrow j}) \quad (12)$$

按照规划编制的分区为集合单元,对每个单元内同一潜在转换方向地块的转换概率进行排序,确定转换起点和转换次序如下:

$$seq_{aj} = (P_{cell=n}, P_{cell=m}, P_{cell=k}, \dots, P_{cell=w}) \quad (13)$$

式中:  $seq_{aj}$ 表示片区*a*内潜在转换方向为*j*的所有地块转换概率的集合;  $n, m, k, \dots, w$ 是这些地块对应的编码,  $P_{cell=n}, P_{cell=m}, P_{cell=k}, \dots, P_{cell=w}$ 表示这些地块向用地类型*j*转换的概率,存在  $P_{cell=n} > P_{cell=m} > P_{cell=k} > \dots > P_{cell=w}$ 的关系。确定地块转换概率的顺序后,根据每个片区内建设用地的分解指标进行转换总量的控制与约束,当达到片区所制定的用地约束指标时,则后面转换概率较低的地块就不再发生转换,最终实现模拟运算过程中对用地类型转换的总量控制和分区转换速率的差异控制。

### 2.3 模型精度评价

规划因子驱动的土地利用变化是多方面因素综合作用下的复杂的地理过程,因此对于模拟结果的分析不仅要从定量的角度去度量,更要结合实际发展情形与规划约束条件进行分区的定性解读与分析。本文采用全局点对点分析和变化差异对比两种分析方法。

全局点对点分析通过构建混淆矩阵求Kappa系数的方法进行模型的精度评价。通常Kappa是落在(0, 1)间,可分为5组来表示不同级别的一致性:0.0~0.20为极低的一致性、0.21~0.40为一般的一致性、0.41~0.60为中等的一致性、0.61~0.80为高度的一致性和0.81~1为几乎完全一致。

但混淆矩阵是针对全局所有单元进行的统计分析,当发生转换的单元占全部研究区的比重是相对较小时,Kappa系数的值就没有很高的参考价值<sup>[30]</sup>。为解决此问题,Pontius等<sup>[30]</sup>提出通过统计模拟结果和实际数据之间差异区和共性区,构建FoM指标,对模拟结果的动态变化过程进行精度评价。FoM的计算公式如下:

$$FoM = \frac{B}{A+B+C+D} \quad (14)$$

式中:  $A$ 表示实际变化但模拟结果未发生变化的单元(面积);  $B$ 表示实际变化同时模拟结果也发生变化的单元(面积);  $C$ 表示实际变化同时模拟结果也变化,但是变化方向不一致的单元(面积);  $D$ 表示实际未变化但模拟结果变化的单元(面积)。

Pontius进一步通过分析13个模型模拟结果的FoM指标,指出当FoM大于0.21时,模型具有一个较高的模拟精度,可认为此模型具有较强的适用性。本文利用公式(14)通过全局变化差异分析对片区模拟结果进行了定量化分析。

本文也将FoM指标用于建设用地转换速度控制系数 $Con_{speed_n}$ 的确定,利用迭代法,设定迭代步长为0.1,统计每个片区每次迭代后建设用地占分区总面积的比例与不同发展速度控制系数组合下的FoM值,以片区模拟精度(FoM)最大为目标,筛选出不同建设用地比例与发展速度控制系数最优组合,即可得到模型参数 $Con_{speed_{no}}$

### 3 研究案例

#### 3.1 研究区域及数据

江阴市是一座滨江港口花园城市,位于中国江苏省南部,长江三角洲平原北端,总面积达987.53 km<sup>2</sup>,涵盖了15个行政区划单元(图4)。本文以江阴市市域为研究区,以2007年、2012年和2017年3期现状用地数据为基础,结合道路、规划地块、行政区划、片区划分等辅助数据和《江阴市城市总体规划(2011—2030)》《江阴市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(2016—2020)》《江阴市生态红线区域保护规划(征求意见稿)》等文本数据,对江阴市用地变化进行了模拟和分析。

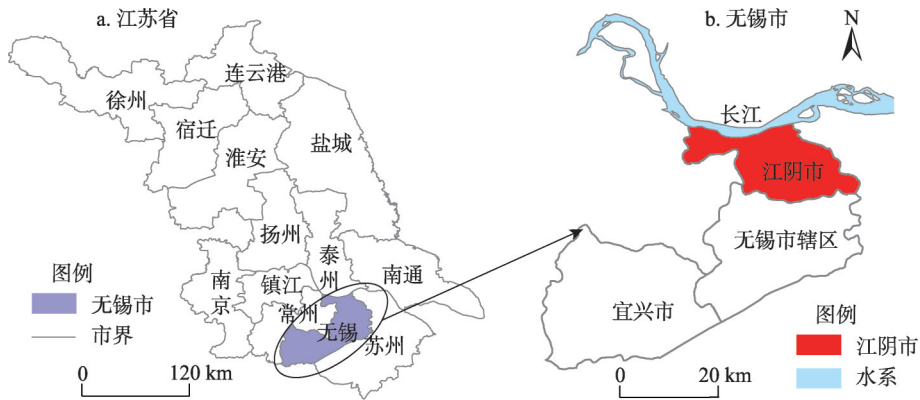


图4 中国江阴市区位图

Fig. 4 Location of Jiangyin City, China

#### 3.2 元胞层次体系的确定

通过梳理江阴市土地利用数据和规划文本,本文构建了一个由“全局—片区—地块”3个层次组成的,覆盖江阴市域范围的多层次矢量元胞体系,其中全局层次由江阴市市域内的近期建设单元和禁建单元构成(图5a),根据江阴市“一城四片区”的空间结构,片区层次由中心城区、澄东片区、澄西片区、澄南片区和澄东南片区5个片区单元组成(图5b),2007年与2012年用地数据的矢量图斑对应着局部层次的基本单元(图5c)。

#### 3.3 模拟过程及参数识别

通过建立的2007年和2012年两期土地利用数据的全局用地转移矩阵(表2),可以发现用地之间的转换主要发生在农用地、山地、村庄建设用地和城镇建设用地4类用地之间,因此实验中选择这4个用地类型进行变化模拟。

全局转换概率属于一种二值约束,受研究区单元的可建性限制。根据《江阴市城市总体规划(2011—2030)》《江阴市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(2016—2020)》和《江阴市生态红线区域保护规划(征求意见稿)》中的要求,江阴市市域范围被划分为近期建设区(187.5 km<sup>2</sup>)和禁建区(500 km<sup>2</sup>)两种类型,在近期建设区域内



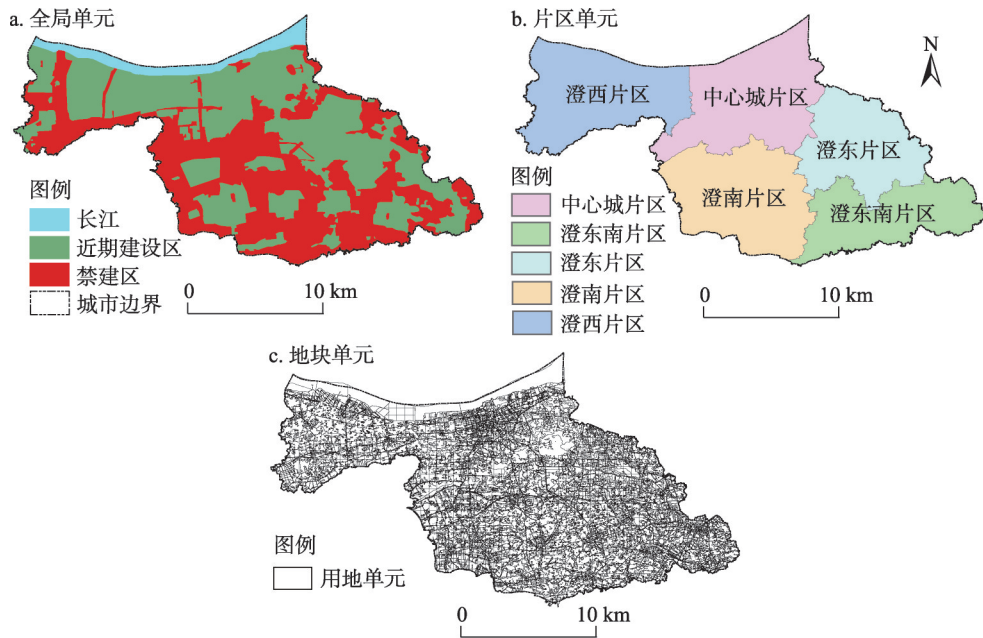


图5 江阴市层次体系

Fig. 5 Hierarchical system of Jiangyin City

表2 2007—2012年江阴市全局用地转移矩阵

Tab. 2 Land-use transition probability matrix at global level in Jiangyin City from 2007 to 2012

		2007年用地类型			
		1	2	3	4
2012年用地类型	1	0.7244	0.2263	0.2017	0.0946
	2	0.0156	0.5439	0.0009	0.009
	3	0.0592	0.0179	0.6148	0.0704
	4	0.2008	0.2119	0.1825	0.8251
合计		1	1	0.9999	0.9991

用地向建设用地转换的全局概率 ( $P_{whole|i \rightarrow 3/4}$ ) 为1, 在禁建区域内用地向建设用地转换的全局概率 ( $P_{whole|i \rightarrow 3/4}$ ) 为0。

在地块层次, 地块向建设用地转换的概率受Logistic回归模型构建的空间适宜性评价和邻域影响力的约束。选取江阴市域中的高速路、快速路和干线公路为转换的局部影响因子, 分别统计各道路250 m、500 m、750 m、1000 m范围内模型的卡方值(自变量和因变量的相关性), 获取各等级道路的最显著影响范围, 再在最显著影响范围内确定各级道路对用地转换的综合影响, 构建Logistic回归模型, 确定各级道路对用地转换概率的回归参数(表3)。回归系数值为负数, 表示影响因子到地块的距离和其对地块向建设用地转换的影响力为负相关, 即距离越小, 对地块的影响力越强, 呈现促进作用。利用公式(8)和(9), 计算每个地块向建设用地转换的概率( $P_{block|i \rightarrow j}$ )。同时, 基于“空间邻近性”, 划定每个地块的局部邻域, 利用公式(6)和公式(7), 统计每个地块受邻域地块影响, 向各类用地转换的局部概率  $P_{local|i \rightarrow j}$ 。

在片区层次上, 由于片区间空间环境和政策的差异性, 需要定量化表示不同片区间的转换概率和发展速度控制系数。利用Markov-chain模型, 计算得到2007—2012年间各

表3 最显著影响范围及 Logistic 回归模型参数  
Tab. 3 Optimal impact range and parameters of Logistic regression model

道路	距离(m)	分级道路影响参数			最显著影响范围(m)	分级道路影响参数	
		回归系数	回归常数	卡方值		回归系数	回归常数
高速路	250	2.407	-4.459	2.407	1000	-1.668	2.879
	500	0.002	-0.040	0.002			
	750	4.977	-1.076	4.977			
	1000	4.981	-0.676	4.981			
快速路	250	-5.174	-1.996	2.228	500	-1.346	
	500	-1.346	-2.413	6.241			
	750	-0.926	-2.490	5.074			
	1000	-0.609	-2.575	4.569			
干线公路	250	-1.668	-2.922	1.663	750	-4.459	
	500	-1.136	-2.975	0.262			
	750	-0.523	-3.077	5.638			
	1000	-0.086	-3.198	3.936			

片区内用地转移概率 ( $P_{regli \rightarrow j}$ ), 由表4可见不同片区内用地类型之间的转移概率存在较大的差别, 这一现象说明规划分区之间的建设强度具有差异性, 所以对地块单元模拟速度进行分区控制是很必要的。

为了控制分区用地增长速度, 结合片区的规划人口指标和市域建设用地面积约束指标, 利用公式(5), 对全局建设用地指标进行了差异性分解(表5)。

发展速度控制系数获取流程为: ① 结合各层次转换概率, 基于各片区建设用地控制指标进行模拟, 计算各片区的建设用地占比; ② 利用迭代法, 设定迭代步长为0.1, 以不同发展速度控制系数分别进行模拟; ③ 选择模拟结果中片区模拟精度(FoM)最大的控制参数为最优控制参数, 并与对应的建设用地占比作为最优组合; ④ 绘制如图6所示的不同建设用地比例下发展速度控制系数的最优组合相关性曲线。

以2012年土地利用数据为初始化数据, 结合以上识别的参数与构建的多层次元胞模型, 获得江阴市2017年模拟土地利用数据, 如图7所示为江阴市2017年实际土地利用与

表4 江阴市片区转移概率矩阵  
Tab. 4 Land-use transition matrices of different districts in Jiangyin City

片区	用地类型	用地类型				片区	用地类型	用地类型			
		1	2	3	4			1	2	3	4
市域范围	1	0.7244	0.4961	0.5237	0.5413	中心片区	1	0.5305	0.5765	0.4053	0.3094
	2	0.0565	0.5439	0.0025	0.0557		2	0.1574	0.5764	0.0135	0.2155
	3	0.2149	0.0394	0.6148	0.4030		3	0.0874	0.0324	0.5682	0.4751
	4	0.7286	0.4646	0.4738	0.8251		4	0.7552	0.3911	0.5812	0.8887
澄西片区	1	0.7176	0.6332	0.3400	0.7916	澄东片区	1	0.6770	0.3333	0.4370	0.5457
	2	0.0023	0.2536	0.0005	0.0014		2	0.0178	0.6673	0.0037	0.0379
	3	0.1394	0.0309	0.5742	0.2070		3	0.2132	0.0473	0.6151	0.4164
	4	0.8584	0.3359	0.6595	0.8546		4	0.769	0.6193	0.5593	0.8119
澄南片区	1	0.8561	0.2582	0.7488	0.5366	澄东南片区	1	0.855	0.7424	0.5604	0.5303
	2	0.0103	0.1947	0	0.0203		2	0.0003	0.1852	0	0.0232
	3	0.3635	0.0329	0.7325	0.4431		3	0.3959	0	0.8172	0.4465
	4	0.6263	0.7089	0.2521	0.7834		4	0.6038	0.2576	0.4396	0.8064

表5 全局性和片区性建设用地约束指标

Tab. 5 Control index of construction land at global and district levels

	片区					市域范围
	中心片区	澄西片区	澄东片区	澄南片区	澄东南片区	
规划人口(万人)	130	17	46.5	25	26.5	245
建设用地指标(km <sup>2</sup> )	226.27	29.59	80.93	43.51	46.12	426.42

模拟土地利用的对比图。从用地空间分布的整体格局来看，2017年的模拟结果与实际基本一致。从总体规划所构建的“中心城区—城镇组团—村庄”三级城乡空间聚落体系来看，建设用地集中的中心城片区和澄西片区的沿江开发区模拟精度较高，而澄南、澄东南和澄东片区的建设用地的空间分布则存在一定的差异，主要是村镇地区的零星建设用地在空间和范围上有所不同。

为定量验证模型模拟的精确，将模拟结果与2017年实际的土地利用现状图进行点对点的统计分析，构建混淆矩阵，计算市域范围和各分区的模拟精度(FoM)。由表6可知，总体上各区域的FoM值都大于或接近于21%，这说明模拟结果具有一定的可信度。

虽然3个片区(包括中心城区)模拟结果的FoM值大于21%，但是澄南片区和澄东南片区相对于其他片区的模拟精度较差，其FoM值分别为19.87%和20.27%。这两个片区都位于南部生态开敞区，其生态控制和规划管控力度较大，而模拟过程中对建设用地管控力度的设置与实际发展过程存在着差异，造成了建设用地面积增长过大以及转换位置不一致问题。中心片区和澄西片区FoM值分别为28.08%和25.7%，模拟精度较高，这

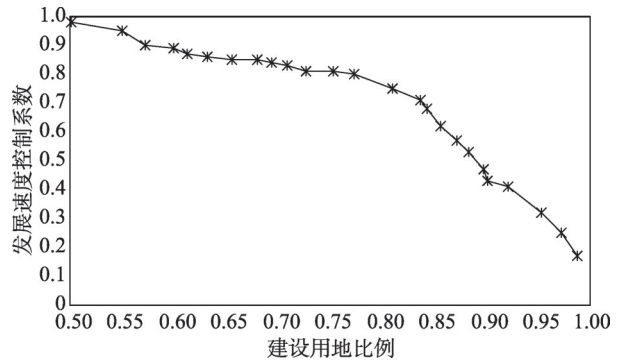


图6 江阴市建设用地比例与发展速度控制系数曲线图

Fig. 6 Curve plot of the proportion of construction land and the control coefficient of development speed

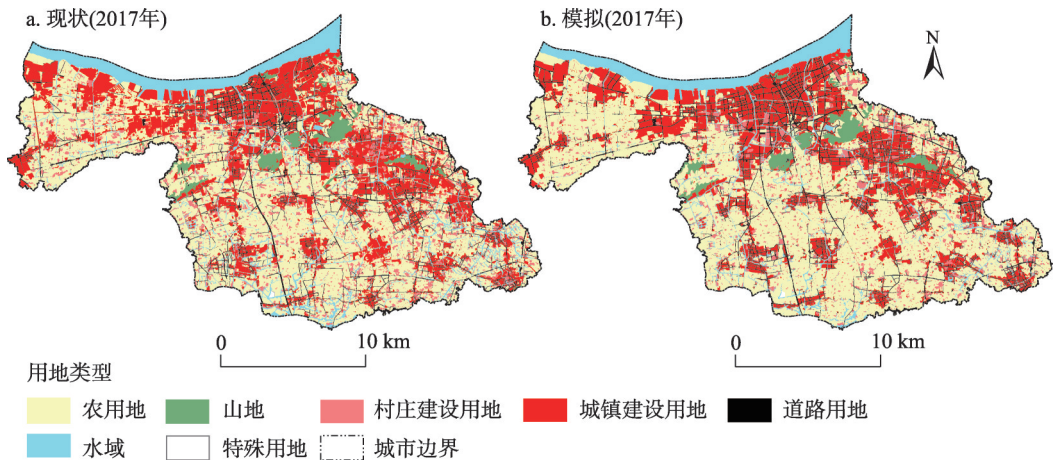


图7 2017年江阴市实际的土地利用与模拟的土地利用对比图

Fig. 7 Comparison of actual and simulated land-use in Jiangyin City in 2017

表6 2017年江阴市分区精度统计结果

Tab. 6 Accuracy assessment of multi-level vector CA of different districts in Jiangyin City in 2017

	市域范围		中心城区		澄西片区		澄东片区		澄南片区		澄东南片区	
	现状	模拟	现状	模拟	现状	模拟	现状	模拟	现状	模拟	现状	模拟
建设用地面积(km <sup>2</sup> )	419.45	425.37	227.19	226.27	28.47	29.59	80.84	80.93	42.19	43.51	40.76	45.07
FoM(%)	24.11		28.08		25.70		23.46		19.87		20.27	
Kappa	0.82		0.86		0.81		0.84		0.82		0.82	

两个片区位于北部沿江集聚地区,以城市已建区和适建区为主,属于城市中发展较为快速、城镇化水平较为成熟的地区,且城镇建设用地是以优化布局和结构调整为主,其建设用地的增长是有序蔓延发展为主,因此模型运算的结果与实际用地分布的一致性较高。

通过上述模拟结果与用地现状对比分析,对模型个别参数进行了修正,进而预测了2022年城市土地利用格局。表7显示,2017—2022年江阴市建设用地增长主要为3个片区,依次是澄东南片区、澄西片区和澄南片区,分别增长了11.29%、8.74%和7.73%,反映了城市用地主要向东向西、次要向南发展战略;中心城区用地增量最小,仅为2.96%,反映了从增量发展到存量优化的转变明显。中心城区主、副城的“双城”空间布局结构趋势明显,“两主两副、组团发展”的空间格局进一步加强。从图8与图9对比可以看出,江阴市通过两轮城市总体规划(2002—2020)和(2011—2030)的空间布局与用地引导,在“一城四片区”的空间结构基础上,按照远期规划的“南北两片区”发展:中心城片区、澄西片区、澄东片区逐步整合为北部沿江集聚片区;澄南片区、澄东南片区、澄东片区整合为南部生态开敞片区。“中心城区—城镇组团—村庄”三级城乡空间聚落体系进一步加强。

表7 2022年江阴市土地利用变化预测分区用地面积统计

Tab. 7 The statistical result of land-use change simulation of different districts in Jiangyin City in 2022

	市域范围	中心城区	澄西片区	澄东片区	澄南片区	澄东南片区
2022年预测建设用地面积(km <sup>2</sup> )	431.87	227.45	30.96	82.65	45.45	45.36
2017年实际建设用地面积(km <sup>2</sup> )	419.45	227.19	28.47	80.84	42.19	40.76
预测增量(km <sup>2</sup> )	12.42	0.26	2.49	1.81	3.26	4.60
增长率(%)	2.96	0.11	8.74	2.24	7.73	11.29

## 4 结论与展望

本文提出了多层次矢量CA模型。该模型通过构建具有层次结构的矢量元胞体系,形成了既考虑横向平面元胞间,又兼顾了竖向规划层次间的相互作用机制,在结合自上而下的用地引导和自下而上的发展速度更新的基础上,开展了江阴市2017用地变化模拟,并预测了2022年的城市空间格局。结果表明不同片区的发展速度存在明显的差异性,而同一片区的发展速度是动态变化的。模拟结果

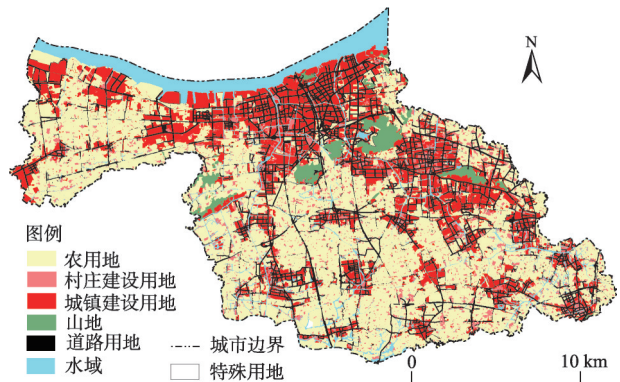


图8 2022年江阴市土地利用变化预测

Fig. 8 The land-use change simulation of Jiangyin City in 2022



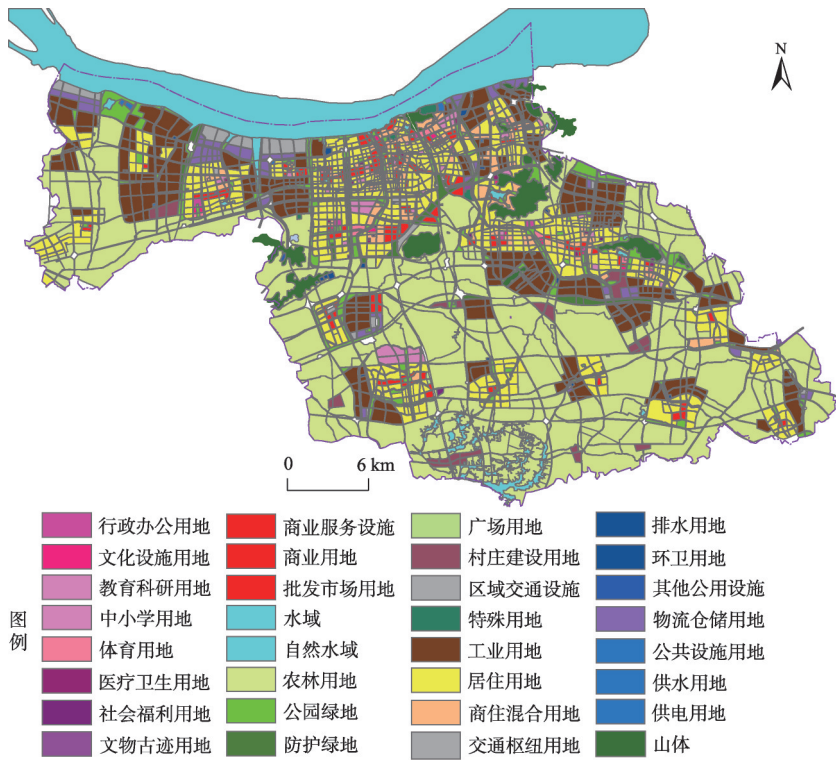


图9 江阴市市域用地规划图(2011—2030年)

Fig. 9 Land-use planning map of Jiangyin City (2011-2030)

与实际的用地空间格局非常相似，说明耦合了规划用地管控与传导协同机制的多层次矢量CA模型，更适用于面向多层次规划的用地变化模拟和未来城市发展的情景模拟，这不仅进一步丰富了地理元胞自动机理论与方法，也促进了CA在城市土地利用变化模拟方面更加“空间层次化”。

本文构建的多层次矢量元胞体系，适用于城市市域范围内的土地利用变化模拟，对于宏观的、区域层面的研究，则需要克服跨区域的规划编制对土地利用变化模拟结果的影响。对于把城市看成点来研究，如城镇体系、城市群、大都市带和城市连绵区，则需要考虑城市之间的相互影响。再者，尽管不同类型、不同等级的城市规划体系与规划编制空间单元划分原则基本相似，但层次划分的数量以及空间单元大小会有所不同，尤其是在空间单元范畴内叠加的政策与管控内容不同，因此，需要针对不同城市，构建模型对应的多层次元胞体系，并建立相应的传导机制。此外，城市在不同的发展阶段，其总体发展战略，发展重点和发展方向不同，如采用生态优先，或增量扩张，或存量优化等不同发展战略，相应的城市规划的引导与用地的管控策略不同，本文模型参数需要做相应的调整与修正。

当前，中国城市规划正从“增量扩张”向“存量优化”方式转型，新的国土空间规划体系强调了规划的层级传导，强化了底线（诸如各类管控边界、约束性指标等）管控，因此该模型对于存量规划下的城市更新、空间优化、城市增长边界精细划定，多情景下的用地模拟等有着重要的实际应用意义。然而，进一步研究方向有：首先，如何针对不同类型城市，构造具有通用性的多层次元胞体系和具有层次结构的元胞邻域，并与

纵向传递过程相衔接;其次,如何更好地定量刻画尺度效益,以获取多尺度转换规则;再者,在模拟过程中如何体现地块既可能发生几何形态变化又可能发生属性状态改变的问题。

### 参考文献(References)

- [1] Tang Huajun, Wu Wenbin, Yang Peng, et al. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 456-468. [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. *地理学报*, 2009, 64(4): 456-468.]
- [2] Batty M, Xie Y. From cells to cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 1994, 21(7): 31-48.
- [3] Liao Jiangfu, Tang Lina, Wang Cuiping, et al. Measuring and calibrating extended neighborhood effect of urban cellular automata model based on particle swarm optimization. *Progress in Geography*, 2014, 33(12): 1624-1633. [廖江福, 唐立娜, 王翠平, 等. 城市元胞自动机扩展邻域效应的测量与校准研究. *地理科学进展*, 2014, 33(12): 1624-1633.]
- [4] Huang Jinchuan, Lin Haoxi. Spatial evolution analysis and multi-scenarios simulation of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 506-517. [黄金川, 林浩曦. 京津冀城市群多情景空间演化模拟. *地理研究*, 2017, 36(3): 506-517.]
- [5] Chen Baofen, Zhang Yaomin, Jiang Dong. Urban land expansion in Fuzhou City based on coupled cellular automata and agent-based models (CA-ABM). *Progress in Geography*, 2017, 36(5): 626-634. [陈宝芬, 张耀民, 江东. 基于CA-ABM模型的福州城市用地扩张研究. *地理科学进展*, 2017, 36(5): 626-634.]
- [6] Jiao Limin, Yang Ludi, Liu Jiafeng, et al. Construction and application of cellular automata model based on urban spatial structure information. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(8): 1276-1283. [焦利民, 杨璐迪, 刘稼丰, 等. 顾及城市空间结构信息的元胞自动机模型构建及其应用. *地理科学*, 2019, 39(8): 1276-1283.]
- [7] Yang Jun, Xie Peng, Xi Jianchao, et al. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: A case study of Dalian Economic and Technological Development Zone. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 461-475. [杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 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. *地理学报*, 2015, 70(3): 461-475.]
- [8] 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.]
- [9] Long Ying, Shen Zhenjiang, Mao Qizhi, et al. Form scenario analysis using constrained Cellular Automata. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(6): 643-655. [龙瀛, 沈振江, 毛其智, 等. 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析. *地理学报*, 2010, 65(6): 643-655.]
- [10] 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.]
- [11] Zhao Li, Yang Jun, Li Chuang, et al. Geographic cellular automata model research progress. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(8): 1190-1196. [赵莉, 杨俊, 李闯, 等. 地理元胞自动机模型研究进展. *地理科学*, 2016, 36(8): 1190-1196.]
- [12] Stevens D, Dragicevic S, Rothley K. iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(6): 761-773.
- [13] Lu Y, Cao M, Zhang L. A vector-based cellular automata model for simulating urban land use change. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(1): 74-84.
- [14] Wu Tinghai. A discussion on urban planning in the territorial and spatial planning system. *City Planning Review*, 2019, 43(8): 9-17. [武廷海. 国土空间规划体系中的城市规划初论. *城市规划*, 2019, 43(8): 9-17.]
- [15] 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.
- [16] Yao Y, Liu X, Li X, et al. Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(12): 2452-2479.
- [17] Pinto N N, Antunes A P. A cellular automata model based on irregular cells: Application to small urban areas.

- Environment and Planning B: Planning and Design, 2010, 37(6): 1095-1114.
- [18] Long Y, Shen Y, Jin X. Mapping block-level urban areas for all Chinese cities. *Annals of the Association of American Geographers*, 2015, 106(1): 96-113.
- [19] Dahal K R, Chow T E. Characterization of neighborhood sensitivity of an irregular cellular automata model of urban growth. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(3): 475-497.
- [20] Dahal K R, Chow T E. An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(11): 2281-2303.
- [21] Benenson I, Omer I, Hatna E. Entity-based modeling of urban residential dynamics: The case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2002, 29: 491-512.
- [22] Chen Chen, Zhao Min. Discussions on urban non-development land and its planning control. *Urban Planning Forum*, 2011(4): 39-45. [陈晨, 赵民. 对“非城市建设用地”及其规划管控问题的若干探讨. *城市规划学刊*, 2011(4): 39-45.]
- [23] Aburas M M, Ho Y M, Ramli M F, et al. The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 52: 380-389.
- [24] Ghosh P, Mukhopadhyay A, Chanda A, et al. Application of cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017, 5: 64-77.
- [25] Shi W, Pang M Y C. Development of Voronoi-based cellular automata: An integrated dynamic model for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(5): 455-474.
- [26] Semboloni Ferdinando. The growth of an urban cluster into a dynamic self-modifying spatial pattern. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2000, 27(4): 549-564.
- [27] Shahbazian Z, Faramarzi M, Rostami N, et al. Integrating logistic regression and cellular automata-Markov models with the experts' perceptions for detecting and simulating land use changes and their driving forces. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(7): 422.
- [28] Arsanjani J 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*, 2012, 21: 265-275.
- [29] Ma Shifa, Ai Bin, Ou Jinpei. Spatial allocation of construction land with constrained cellular automata model. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(10): 1245-1251. [马世发, 艾彬, 欧金沛. 约束性CA在城乡建设用地指标空间化中的应用. *地理科学*, 2013, 33(10): 1245-1251.]
- [30] Pontius R G, Boersma W, Castella J C, et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *The Annals of Regional Science*, 2008, 42(1): 11-37.

## Modeling of multilevel vector cellular automata and its simulation of land use change

SUN Yizhong<sup>1,2,3</sup>, YANG Jing<sup>1,2,3</sup>, SONG Shuying<sup>1,2,3</sup>, ZHU Jie<sup>4</sup>, DAI Junjie<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 4. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 5. Jiangyin Urban and Rural Planning and Design Institute, Jiangyin 214433, Jiangsu, China)

**Abstract:** Urban planning plays an important guiding role in land use change. The planning at all levels supports and complements each other, and influences the evolution of land-use pattern from top to bottom. Vector cellular automata, which takes irregular geographical entities as its basic units, can express the objective and complicated urban land use structure in a more realistic way, and has become one of the focus in the land use change research. However, when we face urban planning with the characteristics of hierarchical synergy, spatial guidance and controlled conductivity, some key issues are highlighted, such as the establishment of CA hierarchical system, the construction of hierarchical synergy and the acquisition of transition rules. After constructing the multilevel vector CA model, we chose Jiangyin City as the study area and its land use data covering the years 2007, 2012 and 2017 as the basic data to simulate the land use changes from 2012 to 2017. On the basis of multilevel vector cellular automata model, through the comparative analysis between the simulation results and the current situation of land use in 2017, the individual parameters of the model were modified to further improve the feasibility and applicability of the model, and then the urban land use pattern in 2022 was predicted. The simulation results indicated that the development of construction land in Central District has become saturated, while the expansions of construction land in Chengnan District, Chengdongnan District and Chengdong District were obvious. From an overall perspective, there was a tendency to gradually form a three-level urban-rural spatial settlement system "central city area-urban agglomeration-village". Using FoM index, we concluded that the simulation results had great simulation precision and the model had high feasibility and applicability, because the FoM values of the whole city and each district were almost greater than or close to 0.21. This shows that the simulation results are more accurate and the model is more effective in the simulation of land use change based on urban planning.

**Keywords:** urban planning system; multilevel vector cellular automata; transmission mechanism; land use change; modelling and simulation