

# 集成变权与约束性模糊 CA 的城镇 用地扩张情景模拟

舒帮荣<sup>1,2</sup> 刘友兆<sup>2</sup> 张鸿辉<sup>3</sup> 张庆利<sup>1</sup>

(1 江苏师范大学测绘学院,徐州市上海路 101 号,221116)

(2 南京农业大学公共管理学院,南京市卫岗路 1 号,210095)

(3 南京大学地理与海洋科学学院,南京市汉口路 22 号,210093)

**摘要:**引入变权理论、模糊理论、规模及空间约束等,构建了基于变权的约束性模糊元胞自动机(CA),用于城镇用地空间管制边界的模拟,并以太仓市区为例进行应用研究。结果显示,太仓市区城镇用地扩张首先通过内部填充,再进行外部扩张,体现了紧凑式发展模式,其发展方向符合“十一五”规划要求。研究表明,该模型不仅能解决城镇用地扩张的合理规模问题,同时也可灵活处理不同因素的作用程度及空间选择的模糊决策问题,故可更好地满足土地利用规划的需要。

**关键词:**城镇土地利用;约束性模糊元胞自动机;变权理论;情景模拟

**中图法分类号:**P271

就城镇用地规划而言,以往研究大多按城市扩张的历史态势推演未来发展<sup>[1-8]</sup>,而因历史条件不同,城镇用地扩张因素及趋势也有所不同,且城市历史扩张中存在不合理因素,故按原有态势模拟势必难以满足规划要求。其次,城镇用地扩张空间决策具有一定的模糊性,虽模糊理论已被引入元胞自动机(cellular automata, CA)模型<sup>[9]</sup>,但用于确定城市扩张边界的模糊 CA 研究尚较薄弱。第三,已有模型难以体现各因素对城镇用地空间配置影响的变化,由于城镇用地空间决策影响因素中的“瓶颈”因素差到一定程度便会产生更大影响,故需动态处理这类因素的影响力以反映实际决策思维,而变权理论可通过考虑各因素状态值间的组态水平科学地处理其对城镇用地扩张的影响<sup>[10]</sup>。因此,本文遵循城镇用地扩张客观规律,在约束性 CA 的基础上,集成变权及模糊理论对城镇用地扩张的影响因素和规则进行处理,结合基本国情从空间及规模两方面对其发展进行约束,从而构建基于变权的约束性模糊 CA (constrained fuzzy CA, CFCA)对城镇用地扩张边界进行情景模拟,并以地处经济发达地区的太仓市市区为例开展实证应用研究。

## 1 变权理论与 CFCA 模型

### 1.1 变权理论与方法

变权综合决策模型可分为激励型、惩罚型和混合型三种形式<sup>[11]</sup>。因需对较差的因素进行惩罚,故本文选择局部惩罚型变权法,其基本思路为:先给定各因素的基础权重,再根据各因素的组态水平调整权重,从而使参评对象的综合评价降低以达到惩罚目的。变权公式<sup>[12]</sup>为:

$$W_i(X) = W_i^0 S_i(X) / \sum_{j=1}^m W_j^0 S_j(X),$$
$$i, j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中,  $W_i(X)$  为局部惩罚型变权权重;  $X$  为各指标标准化后的指标值;  $S_j(X)$  为状态变权函数;  $W_j^0$  为基础权重;  $\alpha_j$  为惩罚水平。本文采用对数型状态变权函数惩罚较差的因素权重:

$$\alpha_j > 1 \text{ 时,}$$
$$S_j(X) = \begin{cases} 2 - \log_{\alpha_j} [X_j + \lambda], & X_j \in [0, \alpha_j) \\ 1, & X_j \in [\alpha_j, k] \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期:2013-03-12。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41101546, 41201386)。

或

$$0 < \alpha_j < 1 \text{ 时,}$$

$$S_j(X) = \begin{cases} \log_{\alpha_j} [X_j + \lambda], X_j \in [0, \alpha_j) \\ 1, X_j \in [\alpha_j, k] \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\alpha_j$  为  $(0, k]$  上的惩罚水平, 其取值与各指标等级相关;  $X_j$  为各评价因素进行一致化处理后的结果;  $k$  为  $X_j$  的最大值;  $\lambda$  为接近于 0 的常数, 其值越小, 惩罚力度越大, 本文取  $\lambda = 1 \times 10^{-10}$ 。

### 1.2 基于变权的约束性模糊 CA 模型

#### 1.2.1 城镇用地规模约束

在土地稀缺与土地利用粗放并存的中国, 需测算城镇用地合理规模并将其作为约束条件。用地规模由劳动力、投资及土地开发成本等社会经济条件、资源禀赋及相关政策(如征地政策)等决定。为测算不同社会经济条件下城镇用地的合理规模, 本文根据城市经济学原理, 采用以下思路: 首先, 假定区域人口、土地及资本均质分布, 劳动力、资本、土地的规模报酬及生产力水平基本不变, 采用 C-D 生产函数拟合城镇用地效益, 并分析城镇用地扩张边际成本; 再对未来经济发展水平进行情景分析, 求取城镇用地扩张边际效益等于边际成本时的用地规模, 即为所求规模。

由于土地生态服务价值愈加重要, 但目前城镇用地扩张尚较少考虑, 故在分析城镇用地规模时考虑及不考虑生态服务价值两种情景, 生态服务价值参考相关研究<sup>[13]</sup>进行测算。因生态服务价值及非城镇用地征收成本会随可城镇化土地的减少而增加, 故采用粮食需求量进行修正。经分析, 两种情景下城镇用地的合理规模为:

$$l_\theta = \left[ \frac{D_t + U_t + (\theta - 1) \times E_t}{A \times (1 - \alpha - \beta) \times K_t^\alpha \times L_t^\beta} \right]^{-\frac{1}{1-\alpha-\beta}} \quad (4)$$

其中,  $l_\theta$  ( $\theta=1, 2$ ) 分别为第  $t$  年不考虑( $\theta=1$ )和考虑( $\theta=2$ )土地生态服务价值的城镇用地合理规模;  $U_t$  和  $E_t$  分别为修正后第  $t$  年非城镇用地的地均经济价值和地均生态服务价值;  $K_t$  为第  $t$  年资本(以城镇固定资产投资表示);  $L_t$  为第  $t$  年劳动力(以二、三产劳动力表示);  $D_t$  为第  $t$  年地均开发费用;  $A$  为当前技术水平;  $\alpha, \beta, 1 - \alpha - \beta$  分别为资本、劳动及城镇用地产出弹性。

在测算城镇用地合理规模时, 还需分析未来劳动力及投资条件等, 鉴于社会经济发展的不确定性, 采用情景分析法进行设定, 从而根据式(4)得出不同情景下目标年城镇用地规模, 并计算出目标年新增城镇用地规模  $L_{area}$ 。模拟时, 元胞转换面积不能超过新增用地规模约束。

#### 1.2.2 绝对限制因素

绝对限制因素包括悬崖、湖泊、河流、水库等自然要素及相关规划政策(如基本农田)等, 其对应的土地城镇化概率几乎为 0, 故模拟时需进行排除。这类因素的作用  $r'_{i,j}$  为:

$$r'_{i,j} = \begin{cases} 0, \text{元胞 cell}_{i,j} \text{ 为绝对限制性地类} \\ 1, \text{元胞 cell}_{i,j} \text{ 为非绝对限制性地类} \end{cases} \quad (5)$$

#### 1.2.3 生态适宜性约束

城镇扩张中生态因素日益重要, 故引入生态适宜性约束条件。生态适宜性规则综合考虑了地形地貌、水文地质、生态保护及与基本农田的距离等影响城镇用地空间布局的生态因子, 分析步骤为: ① 根据区域实际构建指标体系; ② 采用 AHP 法确定因素基础权重  $W_k^0$ , 并应用变权模型进行处理, 得出各元胞各因素的权重; ③ 采用隶属函数对各元胞生态适宜性进行单因素模糊评判; ④ 采用模型  $M(\cdot, +)$  计算各元胞生态适宜度值  $E'_{i,j}$ :

$$E'_{i,j} = \sum_{k=1}^h [\omega_{(i,j),k} \times r(u_k)] \quad (6)$$

其中,  $u_k$  ( $k=1, 2, \dots, h$ ) 为第  $k$  个因素状态值;  $h$  为因素个数;  $r(u_k)$  为第  $k$  个因素的模糊隶属度;  $\omega_{(i,j),k}$  为第  $k$  个因素变权权重。因所有因素处理后均为正向, 故  $r(u_k)$  采用左半梯形隶属函数进行处理:

$$r(u_k) = \begin{cases} 0, u_k < a \\ (u_k - a)/(b - a), a \leq u_k \leq b \\ 1, u_k > b \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $a, b$  为参数, 且  $a < b$ 。

#### 1.2.4 交通可达性约束

生态限制较小时, 交通可达性在很大程度上决定着土地是否适合于城镇开发。  $t$  时刻元胞  $\text{cell}_{i,j}$  的交通可达性  $T'_{i,j}$  主要受道路及城镇中心等影响。对于道路因素, 由于某元胞与某类道路的距离大但与其他道路的距离较小, 其交通便捷度也较高, 故这类“非瓶颈因素”不会对用地选择产生决定性影响, 无需变权处理, 但其权重会随“瓶颈因素”权重的变化而改变。而对于城、镇中心这类“瓶颈因素”, 一般而言, 当元胞离这类中心的距离大到一定程度时, 即便其毗邻交通道路, 其城镇化概率也较小, 故应进行变权处理。交通可达性与生态适宜性约束确定的思路相同, 不同的是交通可达性采用 logistic 回归法客观确定各变量系数后, 采用归一法确定各因素权重, 从而获取城镇用地空间布局的基本规律。  $T'_{i,j}$  表达为:

$$T_{i,j}^l = \sum_{n=1}^l [\omega_{(i,j),n} \times r(d_n)] \quad (8)$$

其中,  $l$  为因素个数;  $\omega_{(i,j),n}$  和  $r(d_n)$  分别为第  $n$  个因素变权权重和模糊隶属度, 因各类吸引力均为正向, 故  $r(d_n)$  采用式(7)处理;  $d_n$  为道路及城镇中心对元胞  $\text{cell}_{i,j}$  的吸引力, 因其与元胞到各要素的距离 ( $\Delta_n$ ) 有关, 且随距离增加而衰减, 故:

$$d_n = e^{-\beta_n \Delta_n} \quad (9)$$

其中,  $\beta_n$  为衰减系数, 本文取  $\beta_n = 0.0001^{[6]}$ 。

### 1.2.5 元胞邻域作用力

元胞邻域作用选择  $3 \times 3$  扩展 Moore 型邻域元胞对中心元胞的作用力  $N_{i,j}^t$  来表示:

$$N_{i,j}^t = \sum_{3 \times 3} \text{con}(s_{i,j}^t = 1) / (3 \times 3 - 1) \quad (10)$$

其中,  $\sum \text{con}(s_{i,j}^t = 1)$  表示元胞  $\text{cell}_{i,j}$  的邻域元胞中城镇用地元胞的数量。

### 1.2.6 随机因素作用力

为使模拟更接近实际, 引入以下随机扰动项:

$$R_{i,j}^t = 1 - \sigma / 10 \times r \quad (11)$$

其中,  $r$  为  $0 \sim 1$  的随机数;  $\sigma$  为控制随机变量影响的参数, 其值取  $0 \sim 10$  的整数。结合规划要求, 为控制其作用力, 本文取  $\sigma = 7$ 。

### 1.2.7 综合转换规则

$$S_{i,j}^{t+1} = f(L_{\text{area}}, P_{i,j}^t) \quad (12)$$

其中,  $S_{i,j}^{t+1}$  为元胞  $\text{cell}_{i,j}$  在  $t+1$  时刻的状态, 其状态值为 0 (非城镇用地) 或 1 (城镇用地);  $P_{i,j}^t$  为  $\text{cell}_{i,j}$  在  $t$  时刻转为城镇用地的最终概率;  $f$  为转换规则。结合已有研究<sup>[6]</sup>, CFCA 综合转换规则为: 计算  $P_{i,j}^t$  时将城镇元胞转换概率设为 0, 如  $\text{cell}_{i,j}$  的最终转换概率为本次循环中的最大概率  $P_{\text{max}}^t$ , 且已转换元胞数量小于转换需求量  $c_{\text{num}}^t$ , 则将其转换为城镇元胞, 同时更新  $P_{i,j}^t$  及  $P_{\text{max}}^t$ , 进入下一轮循环, 直到转换  $c_{\text{num}}^t$  个元胞为止。

以上规则中,  $c_{\text{num}}^t$  为第  $t$  次迭代需转换为城镇元胞的总数, 且有  $L_{\text{area}} = L_{\text{area}_0} \times \sum c_{\text{num}}^t$ ;  $L_{\text{area}_0}$  为单位元胞面积。对于  $P_{i,j}^t$ , 有:

$$P_{i,j}^t = \varphi(R_{i,j}^t) \times R_{i,j}^t \times (1 - S_{i,j}^t) = \exp[\beta \times (R_{i,j}^t / R_{\text{max}}^t - 1)] \times (1 - 0.7r) \times (1 - S_{i,j}^t) \quad (13)$$

其中,  $\beta$  为  $0 \sim 10$  间的扩散系数, 本文取 5;  $R_{\text{max}}^t$  为  $R_{i,j}^t$  的最大值;  $R_{i,j}^t$  为  $\text{cell}_{i,j}$  在  $t$  时刻转换为城镇用地的全概率, 需同时考虑生态适宜性、交通可达性、元胞邻域作用及绝对限制因素, 则:

$$R_{i,j}^t = E_{i,j}^t \times T_{i,j}^t \times N_{i,j}^t \times r_{i,j}^t \quad (14)$$

模拟时, 因不同时段城镇用地扩张的生态适宜性、交通可达性及绝对限制因素的相关因素可

能会变化, 故这三类作用力需根据实际决定是否分时段更新, 而邻域作用需在循环中不断更新。

根据以上规则, 模拟流程为: ① 确定不同情景下新增城镇用地规模, 计算  $c_{\text{num}}^t$  和迭代次数  $t$ ; ② 设置并获取模型变量及参数, 计算生态适宜度、交通可达性及绝对限制因素; ③ 计算邻域作用及随机作用, 结合②的结果, 计算元胞转换最终概率; ④ 根据前述模型转换规则进行循环; ⑤ 重复③, 动态更新元胞转换最终概率, 重复④, 并依此类推, 不断循环, 直到转换元胞总面积为  $L_{\text{area}}$  为止, 最后更新并输出结果。

## 2 模型应用与结果分析

### 2.1 研究区与数据

以太仓市市区为例, 应用 ArcGIS 中的 Model Builder 实现模型, 采用 1995、2008 年 30 m 分辨率的 Landsat TM 遥感解译图作为模拟所需的土地利用图; 空间约束分析数据源于 30 m 分辨率 DEM 数据、1996 及 2008 年土地利用现状图、太仓市生态市规划(2004~2020)、耕地地力图及第三轮土地利用规划相关成果等; 规模约束分析数据源于《太仓市统计年鉴》(2000~2009)、太仓市国民经济和社会发展“十一五”规划、土地变更调查数据(1995~2006)及《太仓市城市总体规划纲要(2009~2030)》等。所有影像经配准并采用混合分类法将研究区分为城镇用地、其他建设用地、农地、林地、水域及其他土地等类型, 并将解译图与各类因素图层按 30 m 进行栅格重采样。

### 2.2 模拟过程与结果分析

根据研究区实际及研究需要, 本文将城厢、陆渡及双凤三镇作为模拟范围, 并将陆渡、城厢的城镇用地作为市区城镇用地, 元胞状态为 1; 其他土地视为非市区城镇用地, 元胞状态为 0。

#### 2.2.1 规划目标年城镇用地扩张规模情景设定

采用土地利用状况类似的城厢、陆渡、浏河及浮桥四镇 2002~2008 年面板数据, 估计模型各系数值  $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 3.159 6、0.091 4 和 0.636 0。同时, 对未来城镇用地扩张边际成本进行分析: 当不考虑和考虑土地生态服务价值时, 2015 年边际成本分别为 118.56 和 137.77 万元  $\cdot \text{hm}^{-2}$ ; 2020 年边际成本分别为 119.49 和 138.86 万元  $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。进而, 根据研究区发展态势及经济发展阶段, 设定高、中、低速三种经济发展情景及考虑和不考虑生态服务价值两种城镇用地扩张边际成本, 在形成的 6 种情景中选择较合理的 3 种进行

模拟,各情景及城镇用地规模增量见表 1。

表 1 太仓市区城镇用地规模扩张情景

Tab. 1 Scenarios of Urban Land Expansion in Taicang City

增长情景	K/亿元		L/人		L <sub>area</sub> /hm <sup>2</sup>		
	2015	2020	2015	2020	2015	2020	
不考虑生态	中速(A)	185.90	240.23	253 109	287 993	1 190.48	2 040.03
考虑生态	中速(B)	185.90	240.23	253 109	287 993	88.71	778.98
	高速(C)	198.06	268.32	270 473	323 038	416.46	1 444.48

2.2.2 城镇用地扩张空间约束分析

空间约束包括绝对限制因素、生态适宜性及交通可达性约束。根据太仓市实际情况,绝对限制因素为基本农田、生态敏感区及河流水域,其结果可根据相关专题图及式(5)进行赋值。

对于生态适宜性约束,选择坡度( $u_1$ )、与河岸的距离( $u_2$ )、与长江水库的距离( $u_3$ )、与断裂带的距离( $u_4$ )、土地利用现状( $u_5$ )、与基本农田的距离( $u_6$ )、与生态敏感区的距离( $u_7$ )及耕地地力等级( $u_8$ )8个指标,根据专家咨询法及相关研究<sup>[12]</sup>确定其分类范围,并对 $u_1$ 进行正向化: $x' = \max(X) - x$ 。对于正向型定量指标的 $S_j(X)$ , $\alpha_j$ 取B与C类临界值;对于定性指标, $u_8$ 的指标值设置为其等级分值, $\alpha_j$ 取5; $u_5$ 指标值则采用打分法,将A、B、C类土地分别赋值为0、0.5和1, $\alpha_j$ 取0.75,隶属度设为0、0.5和1;其余指标的 $r(u_k)$ 中 $a$ 、 $b$ 分别设置为A与B类、B与C类的临界值(表2分类标准)。经以上参数设置即可根据式(1)~(3)计算变权权重,再结合式(6)、(7)即可得出生态适宜性约束值。表2中变权权重表明,因不同元胞各因素值的组态水平不同,各因素对不同元胞的影响力也有所不同,得到的生态适宜度大小排序较常权结果更为合理。以封三彩图1中的A、B、C、D四个元胞为例,其中,A、C的土地利用现状为处于基本农田保护区中的农地,B、D为处于基本农田保护区中的水域,其余条件基本相当,因而B、D的城镇用地开发生态适宜性更差,但常权结果中4个元胞生态适宜度排序从大到小为B、A、D、C,而变权结果为A、C、B、D。由此可见,变权模型可使生态适宜性分析结果更精确合理,模拟时元胞转换优先序也更加合理。

对于交通可达性,根据实际初步选择高速公路吸引力、国道和省道吸引力、一般公路吸引力、市中心吸引力、镇中心吸引力及航道吸引力6个因素,剔除生态限制较大的区域,并获得区位因素影响下的随机样本36 888个,导入SPSS中进行logistic回归,将结果不显著的因子剔除,最终确定国道和省道吸引力( $d_{gsroad}$ )、一般公路吸引力

表 2 生态适宜性评价指标

Tab. 2 Ecological Suitability Evaluation Index

指标	类别	分类标准	隶属度	基础权重	变权权重
$u_1$	A	$\geq 25^\circ$	0		0.005 7
	B	$10^\circ \sim 25^\circ$	$f(x)$	0.088 4	~
	C	$\leq 10^\circ$	1		0.089 5
$u_2$	A	$\leq 50$ m	0		0.158 2
	B	50 ~ 100 m	$f(x)$	0.129 7	~
	C	$\geq 100$ m	1		0.005 7
$u_3$	A	$\leq 100$ m	0		0.01
	B	100 ~ 500 m	$f(x)$	0.171 5	~
	C	$\geq 500$ m	1		0.361 3
$u_4$	A	$\leq 100$ m	0		0.01
	B	100 ~ 500 m	$f(x)$	0.151 7	~
	C	$\geq 500$ m	1		0.505
$u_5$	A	水域、湿地	0		0.057 5
	B	农地、林地及草地	0.5	0.158 1	~
	C	未利用地、建设用地	1		0.937 6
$u_6$	A	$\leq 50$ m	0		0.005 3
	B	50 ~ 100 m	$f(x)$	0.079 9	~
	C	$\geq 100$ m	1		0.378 1
$u_7$	A	$\leq 100$ m	0		0.005 3
	B	100 ~ 500 m	$f(x)$	0.089 7	~
	C	$\geq 500$ m	1		0.189
$u_8$	A	$\leq 1$ 等	0		0.008 5
	B	1 ~ 5 等	$f(x)$	0.131	~
	C	$\geq 5$ 等	1		0.231 7

( $d_{road}$ )、市中心吸引力( $d_{city}$ )、高速公路吸引力( $d_{highway}$ )4个变量,各因素在1%的水平上显著,总体分类精度为79.2%,ROC值达0.71,故这4个因素对研究区城镇用地历史扩张具有较好的解释能力。在此基础上,将各变量划分为A、B、C三类,其中,A表示某元胞与区位要素的距离 $\Delta_n$ 超过一定阈值,当仅考虑该因素时,该元胞城镇化的概率为0;C为 $\Delta_n$ 小于一定阈值,在仅考虑该因素时该元胞城镇化的概率为1;而B则表示 $\Delta_n$ 介于A与C之间,该元胞被城镇化的概率随距离增加而降低。各变量距离分类临界值根据区域面积及专家咨询而定。在logistic回归系数基础上采用归一法计算出各变量的基础权重,并采用式(3)对 $d_{city}$ 进行变权处理,处理时 $S_j(X)$ 的 $\alpha_j$ 取B和

C类临界值(表3中吸引力分类标准),而其余三因素的 $S_j(X)$ 取1,最后根据式(1)得出各元胞区位因素的变权权重(见表3),其结果同样证明了变权模型在处理不同因素对交通可达性影响上的灵活

性。对于隶属度函数(式7)的参数, $a, b$ 分别设置为A与B类、B与C类的临界值。在此基础上,即可通过式(7)、(8)确定交通可达性。

表3 交通可达性评价指标  
Tab. 3 Traffic Accessibility Evaluation Index

评价指标	类别	分类标准		隶属度	基础权重	变权权重
		距离	吸引力			
$d_{\text{highway}}$	A	$\geq 10\ 000$	0.367 9	0	0.054 3	0.041 2~0.054 3
	B	2 000~10 000	0.367 9~0.818 7	$f(x)$		
	C	$\leq 2\ 000$	0.818 7	1		
$d_{\text{gsroad}}$	A	$\geq 8\ 000$	0.449 3	0	0.289 1	0.219 2~0.289 1
	B	1 000~8 000	0.449 3~0.904 8	$f(x)$		
	C	$\leq 1\ 000$	0.904 8	1		
$d_{\text{road}}$	A	$\geq 6\ 000$	0.548 8	0	0.575 6	0.436 4~0.575 6
	B	500~6 000	0.548 8~0.951 2	$f(x)$		
	C	$\leq 500$	0.951 2	1		
$d_{\text{city}}$	A	$\geq 10\ 000$	0.367 9	0	0.081	0.081~0.303 1
	B	3 000~10 000	0.367 9~0.740 8	$f(x)$		
	C	$\leq 3\ 000$	0.740 8	1		

### 2.2.3 模拟结果分析

根据以上分析,以2008年解译数据为基础数据,以年为时间单位,对2015、2020年城镇用地扩张进行情景模拟(见封三彩图2)。

1) 不考虑土地生态价值下的中速增长方案。此情景下,2015和2020年城镇用地规模将分别增加1 190.48和2 040.03  $\text{hm}^2$ ,模型需分别转换13 228和22 667个元胞。由于未考虑土地生态成本,到目标年新增城镇用地规模相对较大,但土地十分稀缺,应节约集约利用,防止粗放扩张。模拟结果表明,目标年城镇用地扩张主要是先转换市区内夹杂的非城镇用地,再向外扩张,从而改变2008年城镇用地散乱的局面;城镇用地主要沿339省道、224国道及高速公路等向太仓北部及东北方向扩张,这与1995~2008年研究区城镇用地扩展态势及太仓市国民经济与社会发展“十一五”规划中的发展战略一致。

2) 考虑土地生态价值下的中速增长方案。此情景下,城镇用地扩张需考虑土地生态成本,城镇用地扩张规模相对较小,到2015和2020年分别增加88.71和778.98  $\text{hm}^2$ ,模拟需分别转换986和8 655个元胞。结果表明,到2015年所需的城镇用地规模主要是对市区中的非城镇用地进行开发;2015~2020年城镇用地仍以市区内部填充为主,向外扩张的规模较小。

3) 考虑土地生态价值下的高速增长方案。此情景下,2015及2020年需新增城镇用地

416.46及1 444.48  $\text{hm}^2$ ,模拟需分别转换元胞4 627和16 050个。结果表明,2008~2015年,城镇用地扩张仍以市区内部非城镇用地开发为主;而2015~2020年,因城镇用地开发相对较多,且市区城镇用地中仍夹杂着较多非城镇用地,故该时段兼具内部填充和外部扩张两个特点。

通过模拟即可制定出各情景下城镇用地扩张的空间管制边界(见封三彩图3)。封三彩图3显示,到2015年,由于各情景下新增城镇用地大部分靠市区内部填充来满足,因而其扩张边界差异相对较小;而到2020年,各情景下部分新增城镇用地靠外部扩张来满足,不同情景扩张程度不同,因而其城镇用地扩张边界呈现较大的差异。

## 3 结 语

针对土地利用规划中城镇用地空间管制的现实需求,本文构建了基于变权的CFCA模型。应用结果表明,该模型不仅能灵活处理不同因素对不同元胞的作用力,同时也考虑到经济发展对用地规模的合理需求及区位选择的模糊决策问题,可更好地满足城镇用地扩张边界制定的需要。当然,城镇用地扩张边界的制定还受政府意愿及相关利益主体的影响,且本文研究中部分参数的设置(如状态变权函数及其参数设置等)均具有一定的主观性,这在今后的研究中需进一步完善。

## 参 考 文 献

- [1] 冯科,吴次芳,韦仕川,等. 管理城市空间扩展:UGB 及其对中国的启示[J]. 中国土地科学, 2008, 22(5): 77-81
- [2] Gennaio M, Hersperger A M, Bürgi M. Containing Urban Sprawl-Evaluating Effectiveness of Urban Growth Boundaries Set by the Swiss Land Use Plan [J]. Land Use Policy, 2009, 26(2): 224-232
- [3] 刘耀林,刘艳芳,明冬萍. 基于灰色局势决策规则的元胞自动机城市扩展模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 7-13
- [4] 杨青生,黎夏. 基于动态约束的元胞自动机与复杂城市系统的模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(5): 10-15
- [5] 杨小雄,刘耀林,王晓红,等. 基于约束条件的元胞自动机土地利用规划布局模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(12): 1 164-1 167
- [6] 龙瀛,韩昊英,毛其智. 利用约束性 CA 制定城市增长边界[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 999-1008
- [7] 李咏华. 生态视角下的城市增长边界划定方法:以杭州市为例[J]. 城市规划, 2011, 35(12): 83-90
- [8] 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, 2011, 100(1/2): 35-44
- [9] Al-Ahmadi K, Heppenstall A, Hogg J, et al. A Fuzzy Cellular Automata Urban Growth Model (Fcaugm) for the City of Riyadh, Saudi Arabia. Part 1: Model Structure and Validation [J]. Applied Spatial Analysis and Policy, 2009, 2(1): 65-83
- [10] 舒帮荣,黄琪,刘友兆,等. 基于变权的城镇用地扩展生态适宜性空间模糊评价:以江苏省太仓市为例 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 402-412
- [11] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架 (IX):均衡函数的构造与 Weber-Fechner 特性 [J]. 模糊系统与数学, 1996, 10(3): 12-17
- [12] 姚炳学,李洪兴. 局部变权的公理体系 [J]. 系统工程理论与实践, 2000(1): 107-110
- [13] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919

第一作者简介:舒帮荣,博士,讲师,主要从事土地利用规划、土地利用变化模拟研究。

E-mail:bangyunshu@126.com

## Scenario Simulation of Urban Land Expansion Integrate Variable Weight with Constrained Fuzzy Cellular Automata

SHU Bangrong<sup>1,2</sup> LIU Youzhao<sup>2</sup> ZHANG Honghui<sup>3</sup> ZHANG Qingli<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Jiangsu Normal University, 101 Shanghai Road, Xuzhou 221116, China)

(2 College of Public Management, Nanjing Agricultural University, 1 Weigang Road, Nanjing 210095, China)

(3 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, 22 Hankou Road, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** A constrained fuzzy cellular automata model was established to simulate the spatial regulation boundary of urban land expansion. In the model, theories of variable weight and fuzzy set, area constraint and spatial constraint were introduced. A case study was taken in Taicang city by using this model. The results show that urban land expand by the means of inner-fill firstly, and then expand outward, and it is a type of compact development. The urban expansion direction accords with requirement of the eleventh five-year planning. We find that this model could be used not only to solve the problems of rational scale of urban land, but also to deal with problems of different factors' influences on land development and fuzzy decision in spatial location flexibly. So the model could satisfy the current needs of land use planning.

**Key words:** urban land use; CFCA; variable weights theory; scenario simulation

**About the first author:** SHU Bangrong, Ph.D, lecturer, majors in land use planning, land use change and its simulation.

E-mail: bangyunshu@126.com

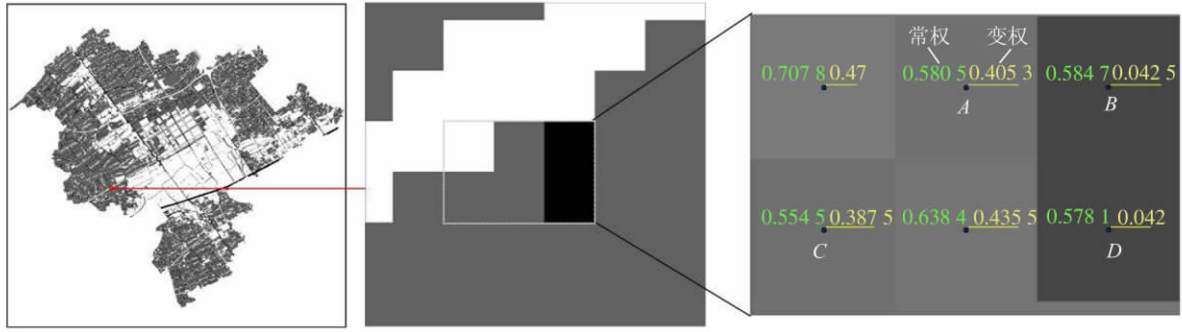


图 1 生态适宜度的变权与常权处理效果比较图

Fig. 1 Ecological Suitability Analysis Results Comparison Between Variable Weights Model and Constant Weights Model

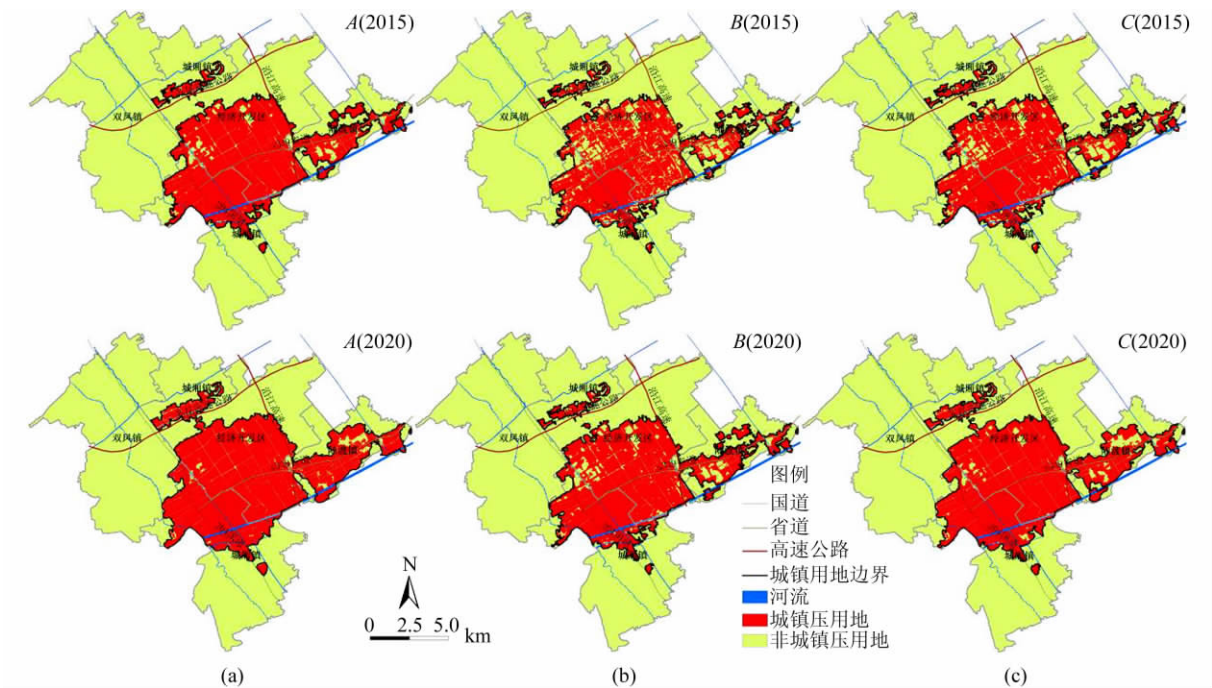


图 2 不同情景下规划目标年城镇用地扩张模拟结果

Fig. 2 Simulation Results of Urban Land Expansion in Planning Target Years Under Different Scenarios

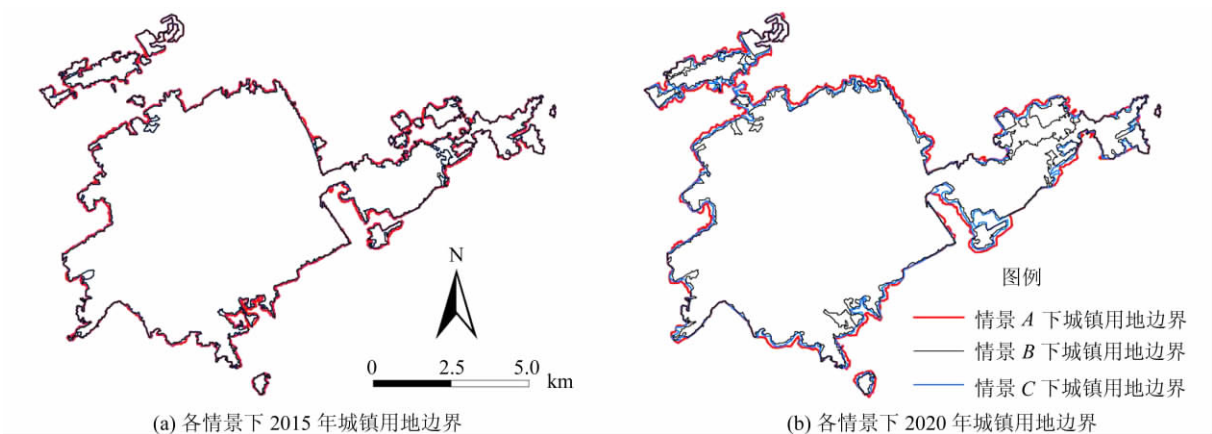


图 3 不同情景下规划目标年城镇用地扩张边界

Fig. 3 Urban Land Expansion Boundaries in Planning Target Years Under Different Scenarios