

# 基于元胞自动机的城市三维空间增长仿真模拟

秦 静<sup>1,2</sup>,方创琳<sup>1\*</sup>,王 洋<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广州地理研究所, 广州 510070)

**摘要:** 目前, 二维的方法不能正确描述现代城市立体空间的发展变化, 因此, 城市三维空间增长的研究对现代城市的发展具有重要意义。本文基于自组织理论及城市发展的自组织性, 改进了 Bengguigui 等的城市空间模拟三维元胞自动机(3DCA)模型, 在模型中添加了中心距离及交通距离评价因子, 建立了城市三维空间增长的中心距离模型和交通距离模型。重点介绍了模型中评价因子的计算方法及其隐含的经济学含义、评价函数的构成和元胞空间状态的转换规则。最后使用 NetLogo 3D 建模工具, 进行城市三维空间增长仿真模拟实验, 结果表明: 添加中心距离与交通距离因子后, 城市三维空间增长模型更符合现实中城市三维空间扩展过程; 进一步证明了城市发展的自组织性, 以及他组织力量对城市向高级别发展的促进作用。

**关键词:** 城市三维空间增长; 3DCA 模型; 城市增长模拟; NetLogo 3D 建模

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2013.00662

## 1 引言

一个城市的形成和发展, 是一个自组织规划过程, 其以自组织方式实现生长繁衍<sup>[1]</sup>。它将在空间分布和保持各部分联系之间不断地进行优化调整。元胞自动机(CA)模型的特点是局部规则(local rules)导致系统全局变化(global change), 很好地体现了城市的自组织性特点。因此, 近年来CA广泛成为利用复杂性科学理论分析城市空间结构的理想切入点<sup>[2-6]</sup>, 其可逼真地模拟城市空间结构的演化<sup>[7-9]</sup>。这些模型可以扩展到模拟真实城市, 探究城市发展过程中不同形式的可能性<sup>[10]</sup>。

目前, 城市CA模型在结构上、逻辑上和表现形式上多是二维空间, 对城市立体空间扩展的研究较少。在高楼林立的当代城市, 如仅用二维空间动态发展的模拟, 则不能正确描述现代城市空间的发展变化<sup>[11-13]</sup>。Portugal, White, Torrens 等城市建模专家曾多次强调三维城市建模在未来城市发展中的重要性<sup>[14-16]</sup>。近年来, 国内外许多专家和著名的城市空间研究机构都开始了城市三维动态模拟研究<sup>[17]</sup>。Semboloni 将 White 的二维 CA 模型进行了三维扩展, 改进二维模型不能使用离散参数表达变化的密度和土地的混合利用状态的缺陷<sup>[18]</sup>。Bengguigui

等的城市空间三维元胞自动机(3DCA)模型, 用不同参数模拟了城市发展的不同阶段并作出合理解释, 但是并没有对模型进行三维的可视化, 而是使用颜色来区分不同楼层的高度, 这种表达有失精确性和直观性, 并且其在建立城市模型时将元胞空间即城市发展的空间视为是同质的, 这与真实城市(不同区域具有异质性)相悖<sup>[19]</sup>。张乐珊对 Bengguigui 模型进行了三维显示, 并结合多主体模型对英国东南部沿海 Cromer 镇进行了城市三维空间增长模拟, 但是其并没有对 Bengguigui 模型进行实质的改进<sup>[11]</sup>。

本文借鉴经典的城市空间增长模拟方法, 以城市发展的自组织性为理论依据, 改进了 Bengguigui 等的城市空间增长三维元胞自动机(3DCA)模型, 在其模型的基础上分别加入中心距离及交通距离评价因子构建新的模型; 使用 NetLogo 3D 建模工具进行城市三维空间增长仿真模拟实验, 用二维和三维两种视图显示实验结果, 进一步探讨了三维城市空间增长的规律。

## 2 城市空间增长三维元胞自动机模型

### 2.1 三维元胞自动机定义

元胞自动机是一种通过简单的局部运算模拟

收稿日期: 2013-01-07; 修回日期: 2013-03-18.

基金项目: 国家社科基金重大项目(13&ZD027); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ22B03-04)。

作者简介: 秦 静(1986-), 女, 山东济南市人, 博士生, 研究方向为城市三维空间增长测度方法与动态模拟。

E-mail: qinj.11b@igsrr.ac.cn

\*通讯作者: 方创琳(1966-), 男, 博士生导师, 研究员, 研究方向为城市与区域规划。E-mail: fangcl@igsrr.ac.cn

空间上和时间上离散的复杂现象的模型<sup>[20]</sup>。元胞自动机由元胞(cell)、状态(State)、元胞空间(lattice)、邻域(neighborhood)、转换规则(rule)及时间(time)6部分组成。元胞自动机的基本运算法则是,某元胞在 $t+1$ 时刻的状态是该元胞在 $t$ 时刻自身及其邻域元胞状态的函数,即 $S^{t+1}=f(S^t, N^t)$ ,其中, $f$ 为转换规则函数, $S^{t+1}$ 为元胞在 $t+1$ 时刻的状态, $S^t$ 为元胞在 $t$ 时刻的状态, $N^t$ 为 $t$ 时刻元胞邻域的状态<sup>[21]</sup>。

三维元胞空间是由二维元胞空间扩展而来,可以用底面的正方形格网和高度来表示。元胞空间的高度取值大于或等于建筑物的最高高度,其中建筑物高度以楼层数表示,最高楼层设定为30层,该数值可以根据实际情况设定。任一立体元胞的索引可以表示为 $Cell_{x,y,h}$ ,其中, $(x,y)$ 为平面坐标, $h$ 为楼层数值。元胞的邻域定义为Moore邻域,即与该元胞直接相邻的8个元胞单元。在三维元胞空间中,每一个立体元胞可以表示一个单体建筑或一个同质的建筑群块。

## 2.2 城市空间增长模型的构建

城市三维空间增长模型,是以城市发展的自组织理论为理论基础<sup>[17,22-25]</sup>,其建模的依据:

(1)城市空间系统具有与生命个体类似的特征,在模型中可将土地单元(元胞单元)类比为城市生命系统的细胞,每个土地单元都具有生长的潜力。

(2)城市三维空间形态的变化具有空间上不连续性和时间上不一致性。

(3)城市三维空间形态主要由不同形式的三维建筑集簇组成。三维建筑集簇可以定义为一定数量的空间上相邻接的具有相似高度的建筑单元聚集体。

(4)城市三维空间的发展演变是跳跃式的过程。三维建筑据集簇最初开始在某个特定位置形成,发展一段时间后,可能又会在新的位置形成建筑聚集体,故城市的发展可以看做是不断形成三维建筑聚集体过程。

(5)距离城市中心越近,地块区位越好,人口密度越高,城市中建筑发展为高层的概率越高。

(6)距离交通线路越近,地块区位越好,地皮价格越高,城市中建筑发展为高层的概率越高。

其中,前4项为Benguigui城市空间增长模型的假设条件,它将城市空间视为无差异的地理表面,即在一块没有区位差异的土地上建设一个城市,在其模型中所有的元胞单元均为同质的,具有相同的

发展概率,没有考虑不同的元胞单元之间的异质性,本文建模时考虑到不同元胞单元之间的异质性,增加了中心距离(距离城市中心的距离)和交通距离两个影响因素,以求更加精确地模拟真实城市空间增长过程。

## 2.3 模型的评价因子

本文模型中,城市三维空间增长评价因子的设定参考了城市经济学、城市地理学基本理论和市场规律,并借鉴了Benguigui城市空间增长三维元胞自动机模型(3DCA)模型,城市发展密度元胞自动机模型<sup>[26]</sup>、约束性单元自动演化CA模型<sup>[27-28]</sup>等二维城市空间扩展模型。模型共设置6个评价因子:初始覆盖率(IC),惯性因子(IF),邻域交互因子(IN),噪声因子(NS),中心距离因子(CD),交通距离因子(TD),三维城市空间增长模型公式如下所示。

$$3DCA=f(IC,IF,IN,NS,CD,TD) \quad (1)$$

6个因子的具体含义如下:

(1)初始覆盖率(IC):该因子描述了城市发展的最初形态。

(2)惯性因子(IF):该因子表达了在特定的地理区域中,城市空间增长过程的连续性和自组织性。如果某个建筑单元在某一时刻发生增长,那么,这个建筑单元在下一时刻将具有继续增长的惯性。惯性因子是对经济地理学中规模经济效应的部分反映。

(3)邻域交互因子(IN):该因子表达了土地单元邻域内建筑开发活动对该土地单元的影响作用,如果某土地单元邻域内建筑开发达到一定比例,那么,该土地单元在下一时刻被开发的概率将会大大增加。邻域交互因子是城市发展的自组织集聚效应的表现,是人们交往活动需要、规模效益要求等多种因素的综合反映。

(4)噪声因子(NS):该因子反映了城市发展中的不确定因素或人为干预因素,可以用来表示城市发展政策、城市规划决策等对城市发展的影响。噪声因子在模型中是不可控的随机参数,与其他因素和过程不相关。

(5)中心距离因子(CD):该因子表达了人口密度对城市建筑增长的影响,距离城市中心越近,人口密度越高,对建筑物容积率的要求也越高,建筑物增长为高层的概率也越高。

(6)交通距离因子(TD):该因子表达了交通因

素对城市建筑增长的影响,距离主要交通路线越近,地区的通达性越好,其邻近的土地单元被开发的概率也越高。

## 2.4 评价函数及规则

### 2.4.1 评价因子取值

在城市仿真模型中,初始覆盖率  $IC$  是一个概率值,可由用户自行设定,模拟的初始化阶段,将按照用户设定的概率随机向三维元胞空间添加高度为1的建筑物(模型中建筑物的初始高度设置为1层)。其他5个评价因子( $IF, IN, NS, CD, TD$ )的取值均为二进制值0或1,下面将详细介绍任一元胞单元的  $Cell_{x,y,h,t}$  在  $t$  时刻评价因子取值的计算方法。

(1) 惯性参数( $IF$ ),计算方法如式(2)。如果  $t=0$ , 惯性值取值为1的概率取决于初始覆盖率;当  $t \neq 0$  时,惯性参数的取值取决于  $t-1$  时刻元胞的建筑高度变化  $\Delta h$ 。如果  $\Delta h \neq 0$ , 惯性参数以  $p=i$  的概率赋值为1;如果  $\Delta h=0$ , 惯性参数取值为0。

$$IF(x,y,h,0)=\begin{cases} 1, p=IC \\ 0, p=1-IC \end{cases} \quad (1)$$

$$IF(x,y,h,t)=\begin{cases} 1, \text{ if } \Delta h(x,y,t-1) \neq 0, p=i \\ 0, \text{ if } \Delta h(x,y,t-1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 邻域交互参数( $IN$ ),计算方法如式(3)。元胞邻域取 Moore 邻域,设定一个阈值  $n$  ( $0 \leq n \leq 8$ ),通过比较  $t-1$  时刻邻域内出现增长( $\Delta h=1$ )的元胞数量与阈值  $n$  的大小来决定邻域交互参数的取值,如果大于或者等于阈值,则  $IN$  取值为1,否则取值为0。

$$IN(x,y,h,t)=\begin{cases} 1, \text{ if } \sum \Delta h(x,y,t-1) \geq n, 0 \leq n \leq 8 \\ 0, \text{ if } \sum \Delta h(x,y,t-1) < n, 0 \leq n \leq 8 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 噪声参数( $NS$ ),计算方法如式(4)。噪声参数在模型中与他参数和过程相互独立,它的取值是由噪声概率  $\eta$  决定。在模型初始化阶段设置噪声参数后,整个运算过程中噪声参数不受其他因子变化的影响,噪声参数取值为1的概率为  $\eta$ , 取值为0的概率为  $1-\eta$ 。

$$NS(x,y,t)=\begin{cases} 1, p=\eta \\ 0, p=1-\eta \end{cases} \quad (4)$$

(4) 中心距离参数( $CD$ ),计算方法如式(5)。许多研究表明,人口密度随着远离市中心而衰减,可利用密度的衰减函数来表达这种关系<sup>[29]</sup>:  $Den_i = Ae^{-\beta x_i}$ , 这里  $Den_i$  为密度,  $x_i$  为离中心的距离,

$A$  和  $\beta$  为衰减函数的参数。中心距离参数值取1的概率参照密度衰减函数定义为  $p = Ae^{-\beta(x^2+y^2)^{1/2}}$ , 其中,元胞距离中心的距离为  $(x^2+y^2)^{1/2}$ ,  $A$  和  $\beta$  为常数参数。

$$CD(x,y,t)=\begin{cases} 1, p=Ae^{-\beta(x^2+y^2)^{1/2}} \\ 0, p=1-Ae^{-\beta(x^2+y^2)^{1/2}} \end{cases} \quad (5)$$

(5) 交通距离参数( $TD$ ),计算方法如式(6)。元胞单元随着距离交通道路的距离增加,参数值取1的概率呈线性衰减,即元胞值取为1的概率为  $p=(z-d_{\min})/(d_{\max}-d_{\min})$ , 其中,  $z$  为元胞距交通道路的距离,  $z=(x^2+y^2)^{1/2}$ ,  $d_{\min}$  与  $d_{\max}$  分别为距离交通道路的最近距离和最远距离。

$$TD(x,y,t)=\begin{cases} 1, p=\frac{z-d_{\min}}{d_{\max}-d_{\min}} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.4.2 评价函数

CA模型的关键是定义转换规则,元胞的状态转换规则是根据当前元胞状态及其邻居状态确定下一时刻该元胞状态的动力学函数,它表述了被模拟过程的逻辑关系,决定了元胞变化的结果。本文中元胞状态转换规则是由元胞生长潜力评价函数  $f$  决定,函数  $f$  是一个布尔离散函数,由上述6个参数的取值决定。以  $t$  时刻,元胞空间中任一元胞  $cell_{x,y,h,t}$  为例,评价函数  $f$  可以由公式(7-9)表示。

$$f_0(x,y,h,t)=IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t) \\ f_0(x,y,h,t)=\begin{cases} 1, IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t) \geq 2 \\ 0, IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t) < 2 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_1(x,y,h,t)=IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t)+CD(x,y,t) \\ f_1(x,y,h,t)=\begin{cases} 1, IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t)+CD(x,y,t) \geq 3 \\ 0, IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t)+CD(x,y,t) < 3 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_2(x,y,h,t)=I(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NE(x,y,t)+TD(x,y,t) \\ f_2(x,y,h,t)=\begin{cases} 1, IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t)+TD(x,y,t) \geq 3 \\ 0, IF(x,y,h,t)+IN(x,y,h,t)+NS(x,y,t)+TD(x,y,t) < 3 \end{cases} \quad (9)$$

其中,公式(7)为城市每个土地单元均为同质,元胞状态转换规则,当  $IF$ ,  $IN$ ,  $NS$  3个参数中有2个或者2个以上时取值为1,则评价函数



$f_0(x,y,h,t)$  取值为1,表明城市会进行新的增长,其余情况  $f_0(x,y,h,t)=0$ ,即城市不作改变保持现状。公式(8)和(9)分别为加入中心距离参数与交通距离参数后,城市土地单元异质的情况下,元胞状态转换规则。在公式(8)中,当  $IF, IN, NS, CD$  4个参数中有3个或者3个以上同时取值为1,评价函数  $f_1(x,y,h,t)$  取值为1,其余情况  $f_1(x,y,h,t)=0$ ;在公式(9)中当  $IF, IN, NS, TD$  4个参数中有3个或者3个以上同时取值为1,评价函数  $f_2(x,y,h,t)$  取值为1,其余情况  $f_2(x,y,h,t)=0$ 。

经计算如果  $cell_{x,y,h,t}$  的生长潜力函数值为1,那么,它的高度  $h$  会在前一时刻高度的基础上增加  $\Delta h$ 。 $\Delta h$  的值可以根据实际需要取一层或者多层,本文中取  $\Delta h=1$ ,那么建筑高度计算公式如下:

$$\begin{aligned} h(x,y,t) &= h(x,y,t-1) + f(x,y,t-1) \\ h(x,y,t) &\leq h_{\max}, t \leq T \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $h_{\max}$  为建筑增长的最高高度限制,本文中取  $h_{\max}=30$ ,当建筑高度增长达到30时,则该建筑停止增长,  $T$  为模型运行的时间,即模型达到稳定状态时系统运行的时间。

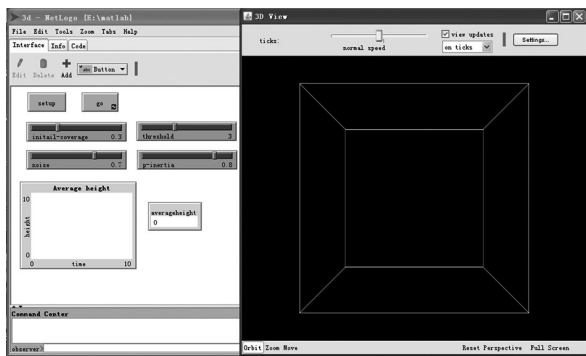


图1 Netlogo 3D建模视图界面

Fig.1 The interface of NetLogo 3D modeling application

### 3 基于NetLogo 3D的实验设计

利用仿真平台开发仿真模型是解决复杂系统问题的重要技术途径之一,常见的仿真平台主要有 Swarm、NetLogo、RePast、Mason 和 AnyLogic 等,每种平台在内部建模机制、模型表现能力和提供的科学支持能力等方面各有特色。其中,NetLogo 平台采用的 Logo 程序语言包括许多高层结构,可有效节约程序编制的时间;Netlogo 模型能够在多种主流平台上运行(Mac、Windows、Linux 等);NetLogo 的建模思想具有元胞自动机和多主体系统的双重

理论基础,有效结合了两种建模思想的优势,特别适合对随时间演化的复杂系统进行建模;NetLogo 是由 Uri Wilensky 在 1999 年发起的,由连接学习和计算机建模中心(CCL)负责持续开发<sup>[30]</sup>,NetLogo 自版本 4.0.2 后添加了 NetLogo 3D 建模工具,能够进行三维元胞自动机建模。综上本文选用 NetLogo 作为城市三维空间增长的建模工具。在 NetLogo 中智能体分为 3 类:海龟(turtles)、块(patchs)和观察员(observer),前两类智能体构成了整个仿真世界,观察员可以观察和控制仿真世界的运行。在二维世界中(NetLogo 2D)海龟(xcor, ycor)可代表现实世界中有活动特性的物体,如一个人、一辆汽车等;而块(pxcor, pycor)则代表了海龟所生存的环境,若干个块构成整个环境,如一条道路、一个城市等。在 NetLogo 3D 中,仿真世界由小正方体组成。块(patchs)是小的正方体,除了二维中拥有  $x, y$  坐标外,还有表示高度的  $z$  坐标,因此,一个块的位置可以表示成(pxcor, pycor, pzc),同样,海龟也拥有三维坐标(xcor, ycor, zcor)。

不同于 Bengguigui 使用不同的颜色在平面上表示三维图像,本文设置了二维,三维两种视图。在 NetLogo3D 中一个元胞可以表示单个的建筑,也可以表示一个同质的建筑群块。本文定义建模空间的大小为  $80 \times 80 \times 80$ ,选取楼层数为 30,当建筑层数增长达到 30 时,该建筑停止生长。NetLogo3D 建模的界面如图 1 所示。其中,包括 4 个用户决定的参数(另外 2 个参数,中心距离及交通距离参数是系统设定的):初始覆盖概率,惯性参数,邻域交互参数的阈值,噪声参数;一个图表,即建筑平均高度随时间变化图表;一个监视器,即建筑平均高度数值的监视器。本文中 NetLogo 3D 建模流程如图 2 所示,其中,虚线框内的步骤是一个仿真周期(to go),元胞(patchs)经过多个周期的生长,直到最后不再变化,达到稳定状态结束。

三维城市空间增长仿真模拟实验的设计如下:

(1)设定 3 种仿真实验的情景,一是将整个城市地表面视为无差异的地表面,不同的地区拥有相同的区位,即元胞空间为无差异元胞空间,即同质元胞单元模型;二是在第一种仿真情景的基础上加入中心距离因子,即中心距离模型;三是在第一种仿真情景基础上加入交通距离因子,即交通距离模型。(2)对每种情景仿真尝试不同的参数设置,观察形成的城市空间结构,并按照不同的建筑高度和建筑集簇的空间分布特点将仿真实验结果分成不同级别的城

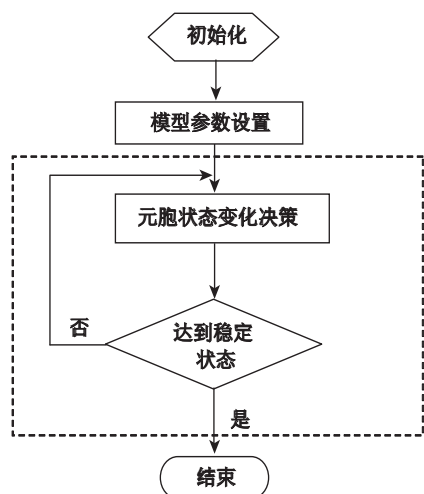


图2 Netlogo 3D 元胞自动机建模流程图

Fig.2 The flow chart of 3D CA modeling in NetLogo 3D

市三维空间形态。(3)对比分析3种模型仿真模拟结果,分析增长形态的差异。

## 4 实验结果及分析

参考“住宅设计规范 GB50096-1999”中住宅层数的划分:低层住宅为1-3层,多层住宅为4-6层,中高层住宅为7-9层,高层住宅为10层及以上。为更好地表达和显示实验结果,我们将1-6层的低层和多层建筑定义为低层建筑,使用红色表示;7-12层定义为中层建筑,使用黄色表示;12-18层定义为高层建筑,使用橙色表示;18层以上定义为超高层建筑,使用蓝色表示。通过对最初的同质元胞单元,与分别加入中心距离参数和交通距离参数3种情况下城市三维空间增长过程进行仿真模拟实验。仿真实验中选取不同的参数组合,可以产生形态各异的城市三维空间建筑分布,本文参照 Benguigui 等模型中城市等级的划分,根据到达稳定形态时建筑高度和建筑集簇的分布特点,对实验结果进行了划分,各等级划分方法如表1所示。

A级城市:如图3(a)与3(b),图4(a)与4(b),图5(a)与5(b)所示。从图中可以看出,在A级城市中,3个仿真实验中均只有少数的建筑生长,仍存在较多空地,大多数建筑都还是保持初始状态的高度,仿真过程中高层建筑没有出现。如表2所示,A级城市的生成是用了较小的惯性参数、邻域交互阈值和噪声参数,平均楼层高度在1-2之间(表3总体平均高度)。A级城市代表了还处于初级发展阶段的

展的最初状态。对比图3(a)与3(b),图4(a)与4(b),图5(a)与5(b)可得:图3(a)与3(b)中建筑物在仿真空间中随机生长和填充;而图4(a)与4(b)中,城市中心区域生长和填充的概率较大,向外部则逐渐递减;图5(a)与5(b)中,沿街道的土地单元建筑生长和填充的概率较大,远离街道则逐渐递减。

B级城市:如图3(c)与3(d),图4(c)与4(d),图5(c)与5(d)所示。在B级城市中,建筑数量与建筑层数较A级有较多增加,出现了较多中层建筑的集簇,有少量高层建筑,但是高层建筑基本彼此分离,没有形成明显的高层建筑集簇,没有超高层建筑。如表2、3所示,B级城市的生成是用了较高的惯性参数、邻域交互阈值和噪声参数,平均楼层高度在4-5之间(表3总体平均高度)。这一级别的城市代表了城市发展的中级阶段,处于城市由初级向高级转化的中间状态。对比图3(c)与3(d),图4(c)与4(d),图5(c)与5(d)可知:图3(c)与3(d)中,中层建筑物随机分布在仿真空间;图4(c)与4(d)中,中层及高层建筑集簇主要出现在了城市中心区域附近,其他区域则较少;图5(c)与5(d)中,中层及高层建筑集簇沿街道分布,离街道较远处则出现较少。

表1 城市分级描述

Tab.1 Description of city pattern types

城市等级	建筑高度	高层建筑
A级城市	低层为主,极少数中层,高层及超高层未出现	没有中层、高层及超高层建筑集簇
B级城市	低层、中层、高层均有,中层为主,无超高层	有少量中层建筑集簇,极少高层建筑集簇,没有超高层建筑集簇
C级城市	低层、中层、高层、超高层均有,高层为主	有高层建筑集簇且部分链接成链状,少量超高层建筑集簇

表2 城市三维空间增长模型参数取值比较

Tab.2 Parameters comparison among three-dimensional urban growth models

城市等级	城市模型	初始覆盖率	惯性概率	邻域阈值	噪声概率
A级城市	同质元胞单元模型	0.3	0.5	2	0.3
	中心距离模型	0.3	0.4	2	0.3
	交通距离模型	0.3	0.4	2	0.3
B级城市	同质元胞单元模型	0.4	0.7	3	0.6
	中心距离模型	0.4	0.7	3	0.6
	交通距离模型	0.3	0.8	2	0.6
C级城市	同质元胞单元模型	0.3	0.8	2	0.7
	中心距离模型	0.3	0.6	2	0.7
	交通距离模型	0.2	0.8	2	0.7



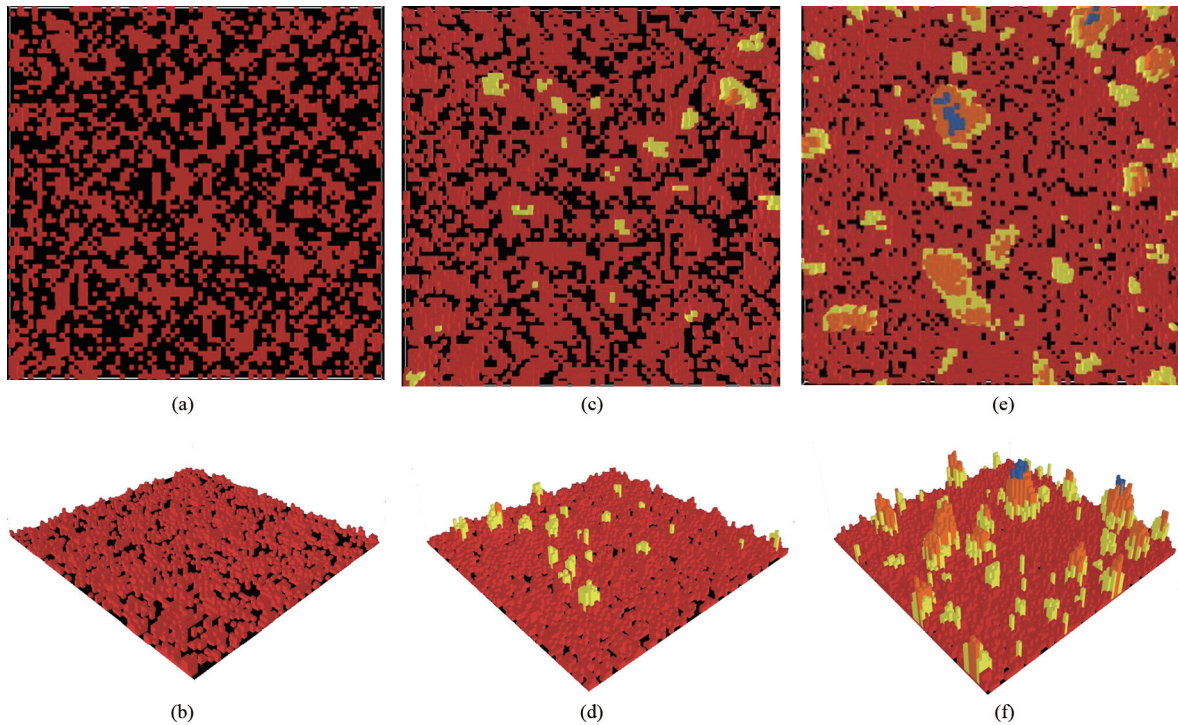


图3 同质元胞单元模型城市三维空间增长仿真模拟示意图:(a)与(b)为A级城市仿真模拟,(c)与(d)为B级城市仿真模拟,(e)与(f)为C级城市仿真模拟。

Fig.3 Illustration of 3D urban growth simulating with homogeneous cellular units: (a) and (b) are the results of A level city, (c) and (d) are the results of B level city, (e) and (f) are the results of C level city.

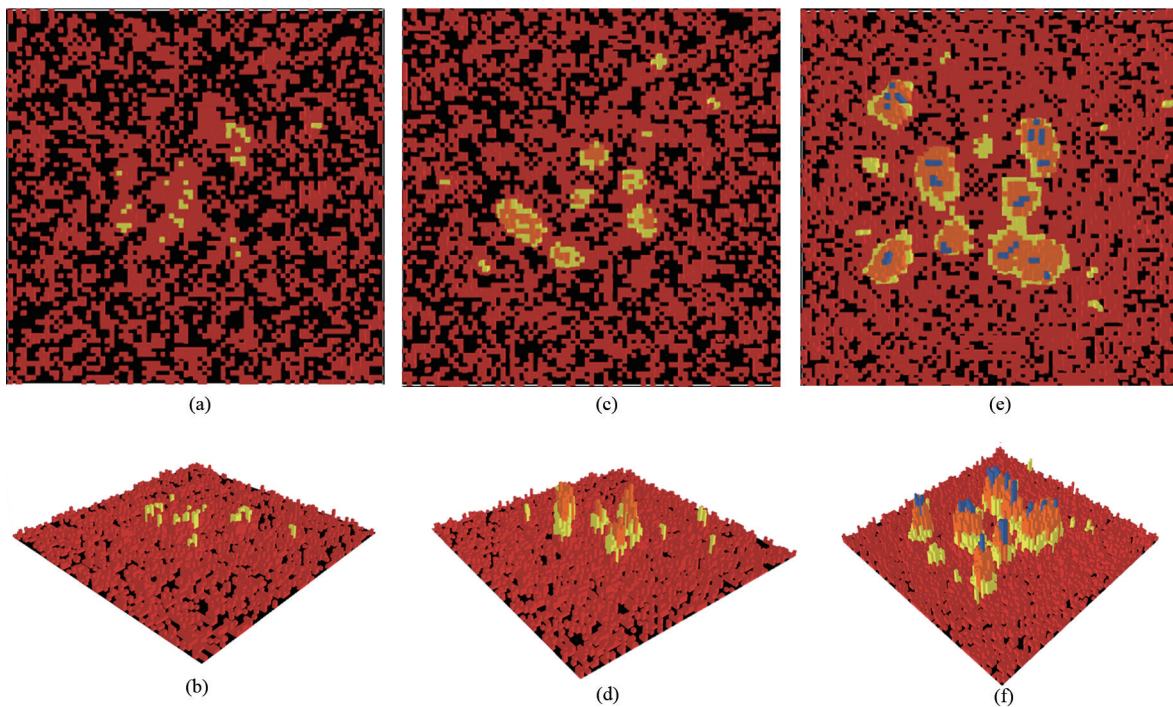


图4 中心距离模型城市三维空间增长仿真模拟示意图:(a)与(b)为A级城市仿真模拟;(c)与(d)为B级城市仿真模拟;(e)与(f)为C级城市仿真模拟。

Fig.4 Illustration of 3D urban growth simulating with the center distance model: (a) and (b) are the results of A level city; (c) and (d) are the results of B level city; (e) and (f) are the results of C level city.

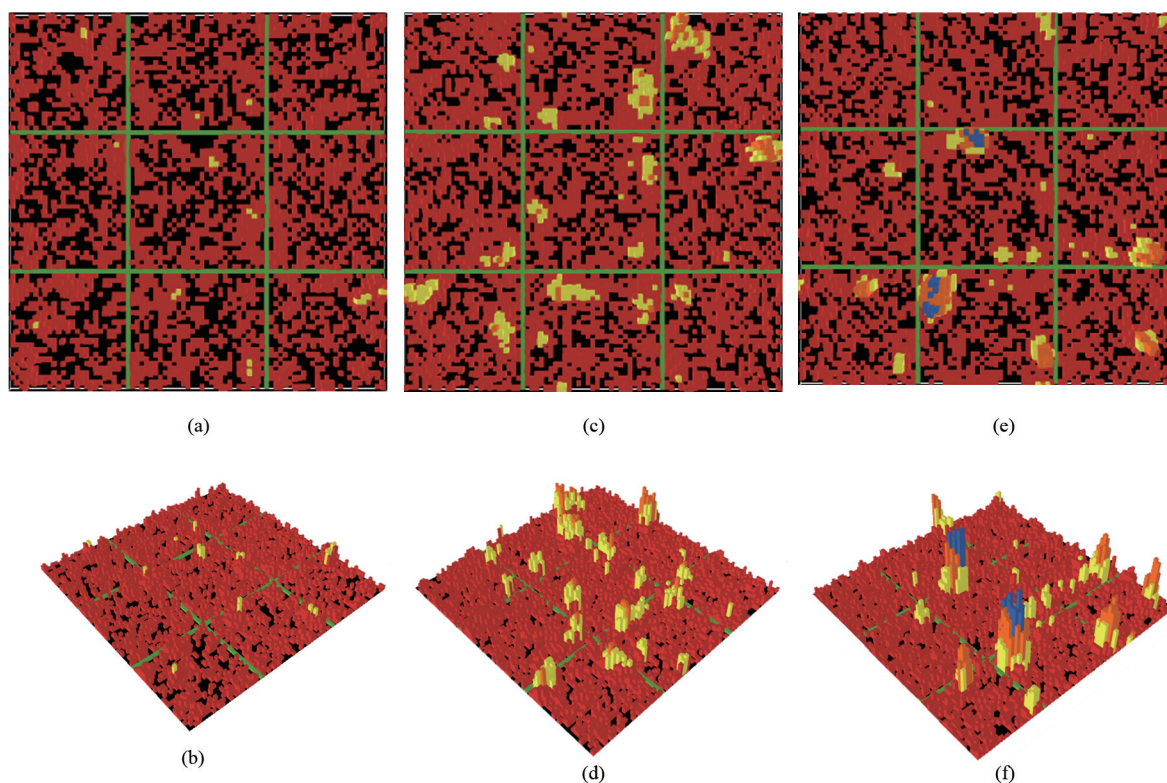


图5 交通距离模型城市三维空间增长仿真模拟示意图:(a)与(b)为A级城市仿真模拟;(c)与(d)为B级城市仿真模拟;(e)与(f)为C级城市仿真模拟。

Fig.5 Illustration of 3D urban growth simulating results with the transport distance model: (a) and (b) are the results of A level city; (c) and (d) are the results of B level city; (e) and (f) are the results of C level city.

C级城市:如图3(e)与3(f),图4(e)与4(f),图5(e)与5(f)所示。在C级城市中,出现高层建筑的数量有显著增加,并且形成大量高层建筑集簇并有少量超高层建筑集簇。这些集簇有大有小,有的相互连接成链状。C级城市表现出与现代都市类似的空间秩序,比如,现代都市中通常会在中心CBD及其他特定区域形成商业建筑群和住宅建筑群等高层建筑聚集群。如表2、表3所示,C级城市的生成是用较高的惯性参数和噪声参数及较低的邻域交互阈值,平均楼层高度在5-7之间(表3总体平均高度)。对比图3(e)与3(f),图4(e)与4(f),图5(e)与5(f),图3(e)与3(f)中,高层建筑物集簇随机分布在仿真空间,城市中心,周边均有较多高层建筑;而图4(e)与4(f)中,高层建筑集簇主要出现在了城市中心区域及附近;图5(e)与5(f)中,高层建筑集簇沿街道分布,离街道较远处则出现较少。

为了进一步对比分析3种模型结果的差异,分别对图3、4、5中3种模型模拟城市三维空间增长的结果进行了统计分析。对于同质元胞模型与中心

距离模型,选取距离元胞空间中心点不同距离的元胞,统计不同距离范围内建筑平均高度,来探讨中心距离对城市三维空间增长的影响;对于交通距离模型,选取了距离交通线路不同距离的元胞统计建筑平均高度,来探讨交通线路对城市三维空间增长的影响。本文选用建模空间的大小为 $80 \times 80 \times 80$ ,因此,元胞边缘距离元胞空间中心点(0,0,0)的距离为40,将其大致分为3等分,分别取距离元胞空间中心 $d_1 < 14$ 的元胞单元计算平均高度1,  $14 \leq d_2 < 28$ 的元胞单元计算平均高度2,  $d_3 \geq 28$ 的元胞单元计算平均高度3;对于交通距离模型将元胞与道路的距离也等分为3段,因4条道路位置距离元胞空间中心点都为15,因此,取 $d_1 < 5$ 的元胞单元计算平均高度1,  $5 \leq d_2 < 10$ 的元胞单元计算平均高度2,  $d_3 \geq 10$ 的元胞单元计算平均高度3;然后对3种平均高度求取标准差,分析3组模型不同距离下建筑平均高度差别大小;最后计算3种模型的整体建模空间建筑平均高度,结果如表3所示。

图6(a)、(b)、(c)分别对A级城市,B级城市,C



表3 不同城市三维空间增长模型建筑平均高度比较

Tab.3 Average height comparison among three-dimensional urban growth models

城市等级	城市模型	平均高度1	平均高度2	平均高度3	平均高度标准差	总体平均高度
A级城市	同质元胞单元模型	1.7	1.4	1.6	0.2	2.0
	中心距离模型	2.0	1.5	1.3	0.4	1.9
	交通距离模型	1.4	1.2	0.9	0.3	1.7
B级城市	同质元胞单元模型	4.2	3.8	3.9	0.2	4.7
	中心距离模型	4.8	2.1	1.6	1.7	4.5
	交通距离模型	4.0	3.3	2.5	0.8	4.2
C级城市	同质元胞单元模型	5.9	5.0	5.5	0.5	6.4
	中心距离模型	12.1	4.5	2.4	5.1	5.3
	交通距离模型	6.9	5.1	4.0	1.5	5.2

级城市,绘制了3组模型的4种平均高度分布图。由图6及表3可以得出,对于同质元胞单元模型,A级城市,B级城市,C级城市中不同距离的3种平均高度值大致相同,平均高度标准差均小于0.5是3组模型中最低的,这说明距离城市中心的远近对建筑平均高度的影响不大,城市中建筑在整个三维空间中随机增长,没有城市中心和边缘之分,所有元胞单元发展的概率都相同,而真实的城市中土地单元往往具有异质性,不同的地区具有不同的增长概率。对于中心距离模型,A级城市,B级城市,C级城市中不同距离的3种平均高度值相差最大,平均高度标准差在3组模型中最高的,其中C级城市平均高度标准差为5.1,这说明加入城市中心距离因子后,城市中建筑的发展有了向城市中心聚集的倾向性,这与现实中单中心城市的发展有一定的相似性,城市空间增长总是由中心向周围扩展,而高层建筑主要集中在城市中心CBD区域。对于交通距离模型,A级城市,B级城市,C级城市中不同距离

的3种平均高度值差别较中心距离模型稍小,平均高度标准差大小处于其他两个模型之间,基本上保持线性递减,这说明加入交通距离因子后,城市的发展有明显的交通导向性,高层建筑主要集中在交通路线的附近,这也符合现实中城市的发展规律,现实中有许多城市的拓展都是由交通线路周围开始的。

对比图6(a)、(b)、(c)中3组实验的总体平均高度折线图,可以得出3组实验总体平均高度相差较小。这说明模型中添加中心距离与交通距离后,城市发展的总体趋势和过程没有特别大的变化,都是由初级阶段遵循一定的经济规律自组织性地随机地进行建设,经过一段时间的发展,日益变成连贯集聚的空间结构,实现向中级和高级阶段的跃迁。而在城市由低级向高级发展的过程中,除去惯性因子,邻域交互因子,中心距离因子,交通距离因子等自组织因素影响外,噪声因子代表的土地政策、城市规划设计等其他组织作用力也在发挥着重要作

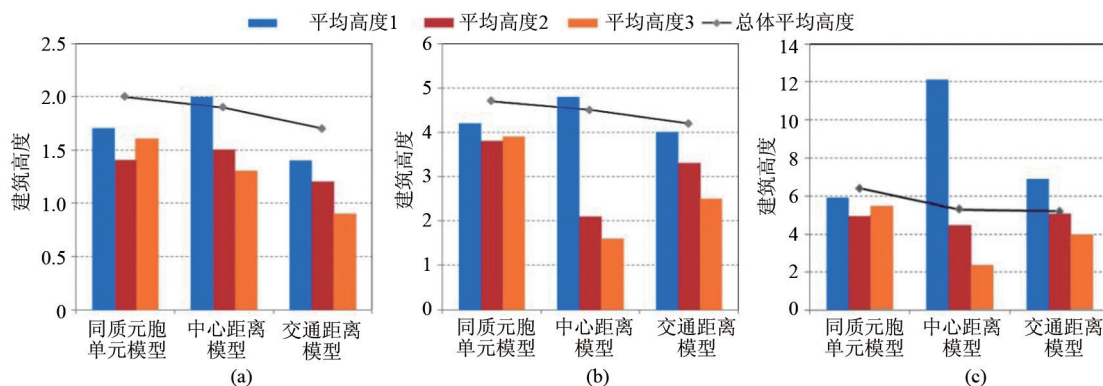


图6 3种城市三维空间增长模型下建筑平均高度对比图:(a)为A级城市3种模型平均高度对比图,(b)为B级城市3种模型平均高度对比图,(c)为C级城市3种模型平均高度对比图。

Fig.6 Average height comparison among three-dimensional urban growth models: (a) Average height comparison in city level A; (b) in city level B; (c) in city level C.



用,这说明城市空间增长是自组织作用和他组织作用结合的过程。

## 5 结论

本文在 Benguigui 模型的基础上,对城市空间增长三维模型做了进一步的改进,添加了中心距离与交通距离影响因子,并分别探讨了2个因子对三维城市空间增长的影响。仿真结果描述了城市空间从低层建筑为代表的初级阶段,到中层建筑集簇为代表的中级阶段,到高层建筑聚集成簇为代表的高级阶段的发展过程,并将结果与 Benguigui 模型进行对比分析,得出添加中心距离与交通距离因子后,城市发展模型更符合现实城市的扩展过程。城市空间增长是一个复杂过程,受到自然因素及经济、社会、政治等人文因素的影响,本文模型在建模时对现实城市作了一定的假设和简化,所以,在实际应用时需要根据城市发展作相应的改进。

### 参考文献:

- [1] 陈洁. 基于复杂性科学的虚拟城市建模研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2008.
- [2] 周成虎, 孙站利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] Couclelis H. From cellular automata to urban models: New principles for model development and implementation [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2):165-174.
- [4] White R, Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2):235-46.
- [5] 张勇强. 城市空间发展自组织研究——深圳为例[D]. 南京: 东南大学, 2003.
- [6] 吴晓军. 复杂性理论及其在城市系统研究中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [7] Ward D P, Murray A T, Phinn S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(6):539-558.
- [8] 郑凯迪, 徐新良, 张学霞, 等. 上海市城市空间扩展时空特征与预测分析[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(4):490-496.
- [9] 卢远, 莫建飞, 韦亮英, 等. 生态约束性城市扩展模型构建与应用分析——以南宁市区为例[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(6):710-715.
- [10] Allen P M. Cities and regions as self-organizing systems: Model of complexity[M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- [11] 张乐珊. 基于元胞自动机和 VR-GIS 技术的城市空间增长三维动态模拟及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [12] Dragičević S. GeoComputation: Modeling with spatial agents[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(6):415-416.
- [13] Portugali J. Complex artificial environments[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [14] Portugali J. Complex artificial environments: Simulation, cognition and VR in the study and planning of cities[M]. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [15] White R, Engelen G. High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(5):383-400.
- [16] Torrens P M. How cellular models of urban systems work (1. theory). Series of Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2000. <http://eprints.ucl.ac.uk/1371/1/paper28.pdf>.
- [17] Portugali, Juval, Haken, *et al.* Self-organization and the city[M]. Berlin, Allemagne: Springer, 1999.
- [18] Sembloni F. The growth of an urban cluster into a dynamic self-modifying spatial pattern[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2000, 27(4):549-564.
- [19] Benguigui L, Czamanski D, Roth R. Modeling cities in 3D: A cellular automaton approach[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2008, 35(3):413-430.
- [20] Batty M, Couclelis H, Eichen M. Urban systems as cellular automata[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2):159-164.
- [21] 杨青生, 黎夏. 多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟[J]. *地理科学*, 2007, 27(4):542-548.
- [22] 赵晔, 姚萍. 从自组织角度重新定位城市规划[J]. *现代城市研究*, 2008, 23(6):25-28.
- [23] 刘安国, 杨开忠. 克鲁格曼的多中心城市空间自组织模型评析[J]. *地理科学*, 2001, 21(4):315-322.
- [24] 陈彦光. 中国城市发展的自组织特征与判据——为什么说所有城市都是自组织的[J]. *城市规划*, 2006, 30(8):24-30.
- [25] 陈彦光. 自组织与自组织城市[J]. *城市规划*, 2003, 27(10):17-22.
- [26] 黎夏, 叶嘉安. 基于元胞自动机的城市发展密度模拟[J]. *地理科学*, 2006, 26(2):165-172.
- [27] 黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟[J]. *地理学报*, 1999, 54(4):289-298.
- [28] Li Xia, Yeh A G O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(2):131-152.

- [29] Clark C. Urban population densities[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General), 1951,114(4): 490-496.
- [30] Tisue S, Wilensky U. NetLogo: A simple environment for modeling complexity[C]. Proceedings of International Conference on Complex Systems, Boston, 2004,16-21.

## The Three-dimensional Urban Growth Simulating Based on Cellular Automata

QIN Jing<sup>1,2</sup>, FANG Chuanglin<sup>\*</sup> and WANG Yang<sup>3</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China)*

**Abstract:** Research of urban growth has focused on the two-dimensional flat space, while the development of the modern city is three-dimensional. So the development and changes of the modern urban space could not be accurately described by two-dimensional method. Therefore, the research of three-dimensional urban growth has great significance to the future development of the city. Based on the theory of self-organization in urban development, the urban growth simulating model using three-dimensional cellular automata (3DCA) which proposed by Bengguigui was improved. The center distance parameter and the traffic distance parameter were added to the model. And new three-dimensional urban growth models were set up: the center distance model and the transport distance model. The two establishment steps of the model are as follows: Firstly, described the calculation methods and the economic interpretations of all the model parameters. Secondly, gave the potential development function of three-dimensional urban growth and the transition rules of the cellular state. The three-dimensional urban growth simulating experiments based on the given models was developed by NetLogo 3D. NetLogo 3D is a programmable modeling environment for natural and social phenomena simulation, which could show simulating results both in two dimension and three dimension view. The experiment results show that the three-dimensional urban growth simulating with the models proposed in this paper is more approximate to the reality city extension progress than Bengguigui's model, and also prove that the urban development is a self-organized process.

**Key words:** three-dimensional urban growth; 3D cellular automata; urban growth simulating; NetLogo 3D modeling

**\*Corresponding author:** FANG Chuanglin, E-mail: fangcl@igsnr.ac.cn