

文章编号:1001-1595(2009)06-0556-06

基于 CA 模型的 3 维虚拟城市构建方法研究

王海鹰¹, 张新长¹, 康停军¹, 曹凯滨²

1. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2. 增城市金站城市建设测量队, 广东 增城 511300

Research on the Methods of 3D Virtual City Construction Based on CA Model

WANG Haiying¹, ZHANG Xinchang¹, KANG Tingjun¹, CAO Kaibin²

1. Geography and Planning School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Survey Team of Zengcheng City Construction, Zengcheng 511300, China

Abstract : This paper unified the urban cellular automata method and the virtual reality technology to construct a three-dimension (3D) virtual city which was based on automata. First, constructing an urban CA model that is based on the data structure of cellular entities can present the plane distribution state of the building in the 3D virtual city. The CA model was used to compute a group of temporal layout data of buildings in the virtual city. Then, DEM and DOM data were used to generate real three-dimensional terrain and produce different type library about 3D building model. Finally, The program was used to load and lay the 3D buildings to the corresponding position in the 3D virtual terrain to obtain a 3D virtual city, according to the cellular entity attribute.

Key words : 3d virtual city; cellular automata; virtual reality

摘 要: 结合城市元胞自动机(CA)方法和虚拟现实(VR)技术, 构建一个基于元胞的 3 维虚拟城市。首先建立基于元胞实体数据结构的城市 CA 模型, 用以表示 3 维虚拟城市中建筑物的平面分布状态。通过 CA 模型生成一组城市建筑物的时空分布数据。然后利用 DEM 和 DOM 数据生成一个真实的 3 维地形, 建立了不同种类的 3 维建筑模型库。最后通过程序调入城市 3 维建筑模型, 根据元胞实体属性将模型布设于 3 维地形的相应位置, 生成 3 维虚拟城市。

关键词: 3 维虚拟城市; 元胞自动机; 虚拟现实

中图分类号: P208 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40971216)

1 引 言

城市是一个具有高度功能化及视觉复杂性的生态系统^[1], 虚拟城市的构建牵涉到 VR、GIS 技术等各个方面。以往的虚拟城市研究多把注意力集中于 3 维模型的构建, 并通过 VR 技术力图展现真实的城市。也有学者在虚拟城市的产生机制与原理上进行了探索, 如 Hillier 和 Hanson 将城市规划的空间社会逻辑概念应用于构建多用户的虚拟城市, 开发出一种 virtual city builder(VCB)的计算机程序用于模拟城市建筑的空间聚集模式, 并能够产生多种类型的城市社区模式^[2]。Stefan Greuter 等人推出了一种生成程序, 来实时产生伪随机虚拟城市, 建筑物生成参数由伪随机数产生器产生, 而种子数则来自于建筑物的位置数据^[3]。文献^[4]提出使用遗传算法(GA)来自动生成虚拟城市, 该方法使用染色体的概念来代表一个虚拟城市的建筑物布局, 使用适应性函数

来量度邻居街区之间的相似性。文献^[5]结合 Kato 和 Greuter 的方法来进行虚拟建筑物和城市的生成, CA 模型用来在虚拟城市中布设建筑物模型, 基因演化算法用来产生整个时间序列中虚拟城市的变化。

本文借助 CA 模型在城市规划功能区层面上产生虚拟城市的建筑用地类型的时空变化与分布。我们认为城市是由一系列的元胞构成, 每一个元胞都有具有一种元胞状态, 这种状态来源于元胞的状态集合: {商业、交通、工业、居住、空闲地、其他用地}。建立元胞实体数据结构记录了每一个元胞的状态属性, 反应了元胞对应的地理单元特征。通过城市建筑种子点布局与元胞转换规则产生元胞的状态变化, 一系列的状态变化最终得到虚拟城市的建筑用地类型时空变化与分布。

通过 DEM 和 DOM 构建真实的 3 维地形, 并设计城市建筑的 3 维模型库。通过土地利用类型选择相应建筑模型种类, 建筑高度域值划定相应

高度值的建筑模型,通过随机数选择一个模型作为元胞对应建筑。采用 VR 技术开发 3 维规划仿真系统,通过运行该系统将相应建筑物按照建筑用地类型的时空分布调入虚拟场景,由此产生一个由多样化建筑物组成的 3 维虚拟城市。

2 基于 CA 原理的城市建筑用地类型的时空布局

2.1 元胞自动机概述

元胞自动机是一个由元胞(cells)、元胞状态(cellular states)、邻域(neighbors)和规则(transition rules/functions)构成的四元组

$$CA=(Z^n, S, N, F) \quad (1)$$

式中,CA 为元胞自动机; Z^n 为 n 维欧氏空间; S 是一个离散的有限集合,表示元胞状态的值域; N 为中心元胞的邻域,是 Z^n 有限的序列子集, $N=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, x_i 为相邻元胞相对于中心元胞的位置; F 为 $S_i \rightarrow S_i^{+1}$ 的转换规则。转换规则基于邻域函数来实现,根据转换规则元胞可以从一个状态转换为另外一个状态。

2.2 元胞实体数据结构

元胞自动机模型(CA)可用于研究自组织系统的演变过程^[6]。城市是一个自组织系统,它的发展同元胞生长有很大的相似性。由于城市系统的复杂性,必须对标准的元胞自动机进行扩展才能满足城市时空模拟的需要,通过改进 CA 模型用于模拟城市发展的过程^[7-8]。

因此,引入元胞实体概念来描述城市地理空间。元胞实体保留标准 CA 模型中关于元胞特性的基本描述,并且定义元胞属性,用于描述元胞对应地理实体的地理特征信息^[9]。定义地理元胞实体与土地利用类型的数据结构。元胞实体结构的成员包括:行号、列号、高程、欲望数组、邻域数组、元胞持续时间、土地利用类型、交通、建设适宜度、建筑高度域值等。土地利用类型结构的成员包括:元胞类型代码、类型名字、类型的寿命、宏观影响因子、邻域影响因子等。

元胞实体反映了土地利用类型层、交通因素层及控制因素层三个层面要素对元胞属性的影响。元胞实体的相关属性通过这三层要素获得,它们在 CA 框架下相互作用实现了城市的演化发展。土地利用类型描述元胞的状态,类型的变化反映了城市建筑物的变化发展。交通条件描述元胞的交通状况,决定其对元胞邻域的选择。建设

适宜度反映了自然、社会经济以及生态方面的特征,需要通过多个控制层数据的叠置分析与综合评价获得^[11]。

2.3 元胞状态转换规则

元胞的状态转换规则是元胞自动机的核心,它表述被模拟过程的逻辑关系,决定空间变化的结果^[8]。城市系统受到区域的和宏观以及局部元胞之间等多方面因素影响,因此必须建立综合的多层次的元胞状态转换规则,才能有效模拟城市地理系统的演化过程。

研究引用“生命机制”概念^[9]。认为城市是一个有生命的系统,城市的每一个土地单元是城市生命系统的细胞,城市生命系统的发展的前提条件是使各细胞之间能和谐共存,最大限度地满足各城市生命细胞的发展“欲望”。将元胞的演化的控制因素分为宏观、邻域、遗传属性。宏观因素是指元胞类型对空间所有元胞的影响,邻域属性是指邻域元胞对于中心元胞的影响,遗传属性指的是中心元胞对于自身转化的影响。

城市土地利用类型演化的推动力正是邻域空间内包括自身在内所有元胞的欲望,使得欲望最高的土地利用类型成为转化的目标。为此,需要引入遗传欲望、邻居欲望和综合欲望三个基本概念。遗传欲望指的是中心元胞保持当前土地利用状态的惯性,邻居欲望指的是邻域元胞对中心元胞演化为各种土地类型的而产生的期望。综合欲望为邻居和遗传两欲望值之和。三种类型均以数组来描述,分别表现对各用地类型的需求分值。

将城市土地类型分为六类:{商业、交通、工业、居住、空闲地、其他用地},各种类型的元胞的欲望存在巨大差异。将欲望的取值规定为 0.00、0.25、0.50、0.75、1.00,分别表示厌恶、反感、无所谓、好感、炽爱等感情因素,参照相关文献并结合专家打分^[9-10],提出土地类型欲望参数表,如表 1。

表 1 土地类型欲望参数表

Tab. 1 Desire for land classification

元胞欲望值	土地利用类型					
	商业 (1)	交通 (2)	工业 (3)	居住 (4)	空闲地 (5)	其他用地 (6)
商业(1)	1.00	0.75	0.25	0.50	0.00	0.50
交通(2)	0.75	1.00	0.75	0.50	0.50	0.50
工业(3)	0.50	0.75	1.00	0.25	0.50	0.25
居住(4)	0.50	0.75	0.25	1.00	0.25	0.50
空闲地(5)	0.00	0.25	0.50	0.50	1.00	0.50
其他用地(6)	0.50	0.50	0.25	0.50	0.25	1.00

例如:当某元胞 i 当前状态为工业,其遗传欲望就记为 $\{0,0,8,0,0,0\}$ 。如果此刻元胞和邻域状态如图 1 所示。

6	3	4
5	3	1
1	2	2

图 1 中心元胞及邻域状态

Fig. 1 The state of central cell and neighbor

根据表 1,得到邻居欲望为 $\{5,5.5,3.5,3.5,2,3.25\}$ 。综合欲望为遗传欲望和邻居欲望之和,这里为 $\{5,5.5,11.5,3.5,2,3.25\}$ 。由此,计算出元胞演化类型的可能性集合,记为 $\rho = \{0.163, 0.179, 0.374, 0.114, 0.065, 0.106\}$,作为元胞实体的欲望数组。

考虑到土地类型转化的随机性,设定一个阈值参数 μ ,只要元胞 i 演化为 m 类型的可能性 ρ_{im} 大于该阈值,就有可能成为演化目标,演化的可能性类型集合为 H ,数学描述如下

$$H = \{x = |x = m, \rho_{im} \geq \mu, m = 1, \dots, M\} \quad (2)$$

元胞 i 的下一个状态只能从集合 H 中得到, H 中各类型的转化概率与该类型的可能性大小成

正比,得到一个最终演化状态概率集合,最后根据蒙特卡罗随机方法确定元胞 i 在 $t+1$ 时刻的状态类型。

记中心元胞 i 的宏观影响因子为 M_i , 领域与遗传影响因子的综合值为 $De_i^{probability}$, S_i^t, S_i^{t+1} 为元胞 i 在时刻 t 和 $t+1$ 的状态。 C 为建设用地适宜性值,表现元胞自然、社会经济以及生态方面的特征。CA 模型的转化规则为

$$f: S_i^{t+1} = M_i \times f(S_i^t, De_i^{probability}, C_i) \quad (3)$$

2.4 城市建筑用地类型的时空分布

本文以广州东部(增城)汽车产业基地(永和区)作为研究实例。它西临广州经济技术开发区永和区,东接增城汽车产业基地,北靠南香山森林公园,南至广惠高速公路,地处广州城市边缘区的东部,是近年来广州城市发展最为迅速的地区之一,整个片区的规划面积为 3 116.25 ha。

将广州东部(增城)汽车产业基地(永和区)的控制性详细规划数据(2006—2020)转为 Arc/GIS 软件的 SHP 格式,设置为 Xian_1980_3_Degree_GK_CM_114E 投影坐标系。土地利用类型归并为空闲地、交通过地、居民地、工业用地、商服用地、其他用地六大类,设定栅格数据网格大小为 30 m。处理得到了 2006 年、2008 年和 2020 年规划建筑用地类型的栅格数据。

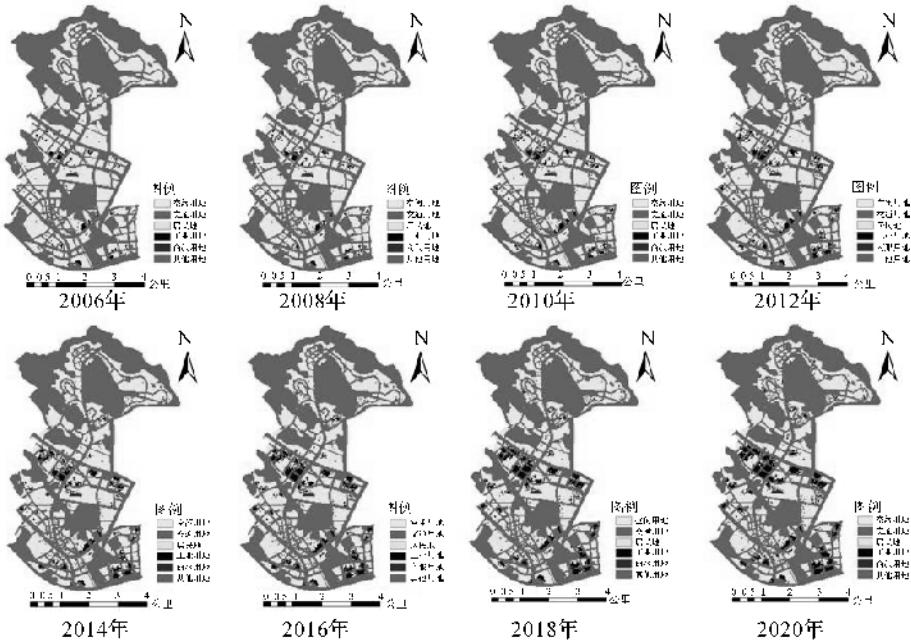


图 2 城市建筑规划用地类型状态时空分布(2006—2020 年)

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of the urban construction land use data for urban planning (2006—2020)

以该研究区 2006 年的规划数据作为种子点,运行 CA 模型。通过对自然、社会经济以及生态等多个控制因素层进行建设适宜性评价,得到一个综合的规划控制层,并将其分为最适宜、较适宜、基本适宜、不适宜与不可城市化区,元胞实体的适宜度属性可以从规划控制层获取。得到 2020 年的研究区的规划路网数据,作为静态图层,元胞交通条件通过路网数据层获取。

选择多个时段的建筑规划用地变化状态作为参照和检验数据,进行参数的优选和调整。以研究区 2006 年的建筑规划用地数据为基准数据,得到了 2006 年至 2020 年的规划建筑用地时空分布数据。

3 3 维虚拟城市模型

如前文所述,通过元胞实体某种状态属性可以构建 3 维虚拟城市。土地利用类型确定建筑模型种类,建筑高度域值划定了相应高度值的建筑模型,通过随机数选择一个模型作为元胞对应建筑。坐标与高程属性确定模型的相应空间位置,时间属性可以获得 3 维模型在虚拟场景的显示时间。根据元胞实体属性,在 3 维地形上加载 3 维建筑模型构建 3 维虚拟城市。

3.1 3 维地形建模

3 维地形是虚拟城市的基本景观,元胞的空间位置必须能和 3 维地形一一对应。首先对地形图进行数字化处理,使用内插方法生成 DEM 数据,选择 Delaunay 三角网剖分法进行地形模型三角化,生成相应地形模型。然后确定 DOM 数据与 3 维地形之间的映射关系。对 DEM 进行重采样,最后经过一系列影像色彩处理后,生成相应的基本地形纹理^[12]。

3 维模型的道路、河流、湖泊等地物模型对应了元胞实体的交通用地、其他用地。道路和河流模型一般可认为是线状地物,而湖泊是面状地物,可以结合地理数据库提供的线状地物代码、宽度等信息自动生成相应模型。如将道路矢量线赋值为道路标识,并设定道路宽度、路面纹理;将河道、湖泊等设置水体标识、水面纹理等;最后,将生成的道路、河流及湖泊模型统一叠加到地形模型中。

3.2 3 维建筑模型

将 3 维建筑模型分为静态建筑与动态建筑,动态建筑来自元胞土地利用类型状态,指的是工业、商服和居住建筑物。静态建筑是指在 CA 模

型运行过程中元胞的状态不会发生改变的建筑物。

3.2.1 静态建筑物模型

构建静态建筑首先利用 CA 模型进行预运算,获得元胞状态类型没有改变的栅格数据,与研究区的建筑规划数据进行空间叠置分析后,得到动态建筑物的面状 shape 文件,与楼层标注信息进行空间关联,给建筑物赋以楼层属性,推算出建筑高度,得到包括建筑几何平面和楼层高度属性的面状 shape 文件,导入 Terra Vista(Terra Vista Getting Started Guide V3.0)生成简单几何形状的静态模型建筑物^[13],再对模型进行纹理编辑和贴图。

3.2.2 动态建筑物模型

根据区域的规划建筑设计要求,得到不同土地用地类型对应建筑的平均高度,建立工业、商服、居住的 3 维模型纹理库,在此基础上制作相应动态建筑物模型。考虑到 3 维虚拟城市系统的实时性要求,在构建模型时必须采用逻辑化层次结构、层次细节(LOD)技术、纹理映射技术、实例化(Instance)技术^[14]对模型进行简化,以满足系统的实时性要求,如图 3、图 4 所示。

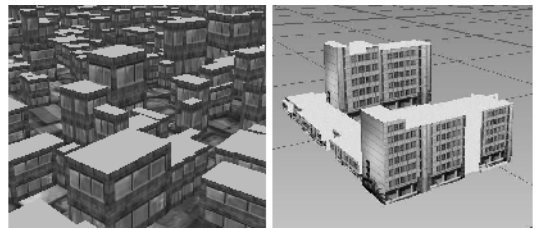


图 3 静态建筑物模型

图 4 动态建筑物模型

Fig. 3 Static building models

Fig. 4 Dynamic building model

4 3 维虚拟城市生成

4.1 虚拟城市生成框架

基于 VS2005 开发平台,采用 VR 与 CA 紧密耦合方式开发了元胞虚拟城市系统,实现了 CA 模型演化、虚拟城市生成、3 维漫游等功能。虚拟城市生成框架如图 5 所示。

4.2 元胞的空间坐标换算

元胞的行列号隐含了坐标信息,利用 2 维数组存储元胞栅格矩阵,可以利用数组行列号来进行栅格的平面坐标换算。数组行列号与平面坐标转换的通用公式为

$$\left. \begin{aligned} X_i &= X_0 + i \times D_X \quad (i=0, 1, \dots, N_X - 1) \\ Y_j &= Y_0 + j \times D_Y \quad (j=0, 1, \dots, N_Y - 1) \end{aligned} \right\} (4)$$

式中, X_0 、 Y_0 为栅格数据左上角格网单元纵横坐标; i 、 j 为当前 2 维数组的行列下标; DX 、 DY 是格网在 X 、 Y 方向上的间距; NX 、 NY 为格网的行数和列数。

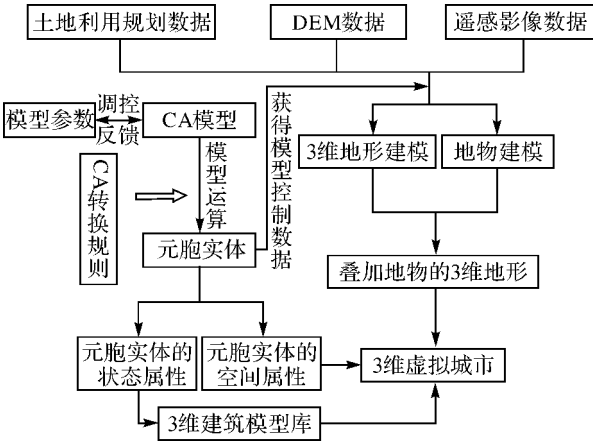


图 5 虚拟城市生成框架

Fig. 5 Virtual city generation frameworks

栅格数据的 DX 、 DY 间距均为 30 m, 式中 X_0 、 Y_0 可以根据左下角栅格的平面坐标求得。

如果左下角栅格平面坐标为 (X', Y') , 那么可以求得

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X' \\ Y_0 &= Y' - (N_x - 1) \times D_Y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

4.3 对象动态管理

虚拟城市的 3 维场景中包含大量的模型对象, 如果不能对这些模型对象进行有效的管理, 那么 3 维虚拟城市的自动构建生成也就无从谈起。因此有必要建立一个全局数组来管理这些实例化的对象。

首先定义一个对象的全局数组, 在模型对象加入场景并完成空间位置设置以后, 将所有对象存入全局数组。完成代码如下:

```
GV_Obi GlobeObject[MAXSIZE];
```

```
: // 中间代码省略
```

```
GlobeObject[i]=instance; // 存入对象数组
```

对象将在数组中被统一管理, 与元胞空间具有对应关系。因此, 元胞空间的状态变化决定了对象的动态变化。随着 CA 模型的运行, 通过对对象的动态管理实现了 3 维虚拟城市的发展变化过程。

4.4 系统实验结果

利用该实验系统对提出的虚拟城市构建方法进行验证的规划建筑用地时空分布数据, 在该系

统平台支持下生成了该区域(2006—2020 年)的 3 维虚拟城市, 取得了较为满意的效果。图 6、图 7 为 2010 年的广州东部(增城)汽车产业基地(永和区)3 维虚拟城市快照图。

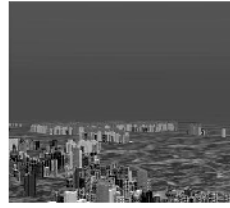


图 6 居住区快照

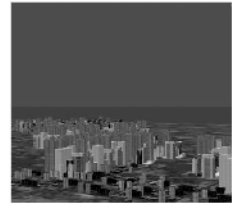


图 7 工业区快照

Fig. 6 Snapshot of residence district Fig. 7 Snapshot of industry district

结果显示, 系统运行效率高; 能够反映在不同时刻城市元胞状态对虚拟城市建筑格局的影响; 具有一定的自动化构建水平, 能够大规模自动生成 3 维城市景观。

5 结束语

本文提出一种基于城市 CA 模型的 3 维虚拟城市构建方法。在 CA 和 VR 技术支持下, 产生了一个由多样化建筑模型组成随时空变化的 3 维虚拟城市。城市 CA 模型多用于模拟城市在 2 维空间的扩展变化, 但对于城市的 3 维属性及其与土地利用时空变化的内在关系缺乏相关的理论论述。但研究目前仅利用 2 维空间的相关属性反映了城市空间在第 3 维的特性, 还需要对两者的内在关系进行更充分的理论探讨。本文中的研究表明, 通过 CA 模型来进行 3 维空间的表达是可行的和有效的, 可以实现 CA 模型从 2 维空间向多维空间表达的扩展。

该系统初步实现了元胞的 3 维可视化, 目前, 该系统可以方便快速的模拟城市不同发展结果, 给城市规划和决策者提供参考依据, 可用于城市规划、城市研究等多个领域。

参考文献:

- [1] PARISH Y I H, MÜLLER P. Procedural Modeling of Cities[C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001. New York: ACM, 2001: 301-308.
- [2] HILLIER B. HANSON J. The Social Logic of Space[M]. Cambridge: CUP, 1984: 52-256.
- [3] GREUTER S, PARKER J, STEWART N, et al. Real-time Procedural Generation of Pseudo Infinite Cities[C] // Proceedings of GRAPHITF 2003. New York: ACM, 2003: 87-

- 94.
- [4] KATO N, OKUNO T, SUZUKI R, et al. Modeling Virtual Cities on Interaction between Cells[C]//International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'2000). Nashville:IEEE, 2000: 143-148.
- [5] LU Chicheng. A Study of Virtual Buildings and Cities Generation[D]. Hualien: Dong Hwa University, 2005: 8-30. (吕家诚. 虚拟建筑物和城市生成之研究[D]. 花莲: 东华大学, 2005: 28-30.)
- [6] VON NEUMANN J, BURKS A W. Theory of Self-reproducing Automata[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1966: 35-39.
- [7] ZHOU Chenghu, SUN Zhanli, XIE Yichun. A Study of Geography Cellular Automata [M]. Beijing: Science Press, 1999. (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.)
- [8] DU Ningrui, DENG Bing. Cellular Automata and Their Application to Modeling Spatial-temporal Process of Urban Development[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2001, 34(6): 8-11. (杜宁睿, 邓冰. 细胞自动机及其在模拟城市时空演化过程中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(6): 8-11.)
- [9] LUO Ping, DU Qingyun, LEI Yuanxin, et al. Cellular Automata Based on Geographic Feature and Urban Land Use Evolvement[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(6): 505-512. (罗平, 杜清运, 雷元新, 等. 地理特征元胞自动机及城市土地利用演化研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(6): 505-512.)
- [10] LUO Ping, DU Qingyun, LEI Yuanxin. Study of Urban Land Use Evolvement Model Based on Extended Cellular Automata[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(4): 48-51. (罗平, 杜清运, 雷元新. 城市土地利用演化 CA 模型的扩展研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(4): 48-51.)
- [11] WANG Haiying, ZHANG Xinchang, KANG Tingjun. Theory and Application of Evaluation on Ecological Applicability for Urban Construction Land Based on GIS [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(1): 14-17. (王海鹰, 张新长, 康停军. 基于 GIS 的城市建设用地适宜性评价理论与应用[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 14-17.)
- [12] TANG Guoan, LIU Xuejun, LV Guonian. The Theory and Method of Digital Elevation Model and Geographic Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006: 166-176. (汤国安, 刘学军, 阚国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 166-176.)
- [13] ZHANG Shanghong, ZHANG Chao, ZHENG Jun, et al. A 3D Watershed Terrain Modeling Method Based on Software Terra Vista[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(3): 36-39. (张尚弘, 张超, 郑钧, 等. 基于 Terra Vista 的流域地形 3 维建模方法[J]. 水力发电学报, 2006, 25(3): 36-39.)
- [14] ZHANG Fan, SHI Qiongfang, DA Hanqiao. The Theory and Practice of Applying Multigen Creator to Building Three-dimension Model in the Virtual City[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(4): 55-57. (张帆, 史琼芳, 达汉桥. Creator 应用于虚拟城市 3 维建模的关键技术与实践[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 55-57.)

(责任编辑: 张燕燕)

收稿日期: 2009-07-03

修回日期: 2009-11-18

第一作者简介: 王海鹰(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事土地利用时空结构演变与数字城市方面的研究。

E-mail: whyhdgis@yahoo.com.cn

First author: WANG Haiying(1980—), male, PhD candidate, majors in the temporal structure change of land use and digital city. E-mail: whyhdgis@yahoo.com.cn