

# 遥感及 CA 模型支持下的吉隆坡及其周边地区 城市扩展分析与预测

史晓霞<sup>1</sup>, 李京<sup>1</sup>, 陈云浩<sup>1</sup>, 曲延<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 资源学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 吉林省 白山市二十一中学, 吉林 白山 134300)

**摘要:** 利用长时间序列高分辨率 Landsat TM 影像, 对吉隆坡及其周边地区城市扩展模式特征及驱动机制进行了分析, 确定了其影响因子和限制因素, 并基于 CA 模型原理对该研究区的城市扩展进行了模拟与预测。结果表明, 吉隆坡及其周边地区城市扩展一直处于多经济核心支持下的中高速扩展阶段。吉隆坡内部的填充式扩展模式在整个城市扩展期间受周边的集中式扩展影响较大。在地形、经济及行政政策的交互影响下, 研究区的扩展方向主要为西北、南、东南方向, 其中以南部的城市扩展在各个时期最为突出。

**关键词:** 不变特征点法; 二次差值法; CA 模型; 吉隆坡; 城市扩展

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)02-0121-06

中图分类号: X833

## Analysis and Prediction of Urban Expansion in Kuala Lumpur Based on Remote Sensing and CA Model

SHI Xiaoxia<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, CHEN Yunhao<sup>1</sup>, QU Yan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. The Twenty-First Middle School of Baishan City of Jilin Province, Baishan, Jilin 134300, China)

**Abstract:** Urban expansion pattern and driving mechanisms in Kuala Lumpur was analyzed by using long time sequence and high resolution Landsat TM images. After the influence factors and limiting factors were confirmed, simulation and prediction of urban expansion for the study area were made based on the CA model theory. Results show that urban expansion in Kuala Lumpur is in a high speed period and is supported by the multi-economic centers. The filling expansion pattern in Kuala Lumpur inner city is greatly affected by centralized expansion pattern around Kuala Lumpur. Urban expansion is mainly toward northwest, south, and southeast for the influences of terrain, economy, and government policies. Urban expansion to the south is most obvious.

**Keywords:** pseudo-invariant features(PIFs) method; twice difference method; CA model; Kuala Lumpur; Urban expansion

城市是人类社会经济活动的主要载体。随着人类社会经济活动活跃性的不断增强, 城市随之表现出建设用地不断向外扩展的态势。城市扩展是人地系统相互作用的结果, 因此城市扩展模式、形态及扩展强度从根本上反映出城市空间形态特征、城市经济模式、区域社会经济联系等特性<sup>[1]</sup>, 同时影响到城市环境、交通状况及居民生活水平。由此, 国内外众多

地理学者表现出对城市扩展研究的极大热情, 以便获得城市扩展内在驱动机制、经济特征等, 进一步指导城市规划、人口规划、区域经济规划以及城市发展建设。李正国等研究城市扩展模型在土地供应空间决策中的应用时, 对城市扩展的相关研究类型进行了总结, 主要包括城市扩展模型本身的构建; 城市扩展机制与预测研究; 城市扩展动态监测以及城市生态效应

收稿日期: 2007-10-11

修回日期: 2007-11-29

资助项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAJ05A01, 2006BAJ09B01, 2006BAJ09B06)

作者简介: 史晓霞(1978-), 女(汉族), 吉林省白山市人, 博士生, 主要从事遥感与 GIS 地学应用模型研究。E-mail: shixx897@gmail.com。

通讯作者: 李京(1956-), 男(汉族), 北京市人, 硕士生, 博士生导师, 主要从事地学遥感应用。E-mail: lijing@ires.cn。

研究<sup>[2]</sup>。遥感的出现及其具有多时相和宏观观测能力等诸多特点,为城市空间扩展的定量研究提供了时序数据支持与保障。因此,基于遥感的城市空间扩展模式及驱动机制分析,针对不同研究区的研究成果相对较多<sup>[3-8]</sup>。随着城市扩展分析研究手段的不断发展,基于元胞自动机的城市扩展模拟与预测成为主要研究方法之一。目前在国内,张显峰、何春阳等在该方面做了大量的研究工作,取得很好的成果。其中,何春阳的基于影响、限制因子及概率的城市扩展元胞自动机模型能够较为理想的对北京市城市扩展进行模拟与预测<sup>[9-10]</sup>。

基于遥感的城市扩展研究中,城市扩展信息提取主要依赖于分类手段,应用常用分类方法,如监督分类法、非监督分类法、NDBI(归一化建筑直属)法等,而后进行比较<sup>[7,11-13]</sup>。本文以吉隆坡及其周边地区为研究区,通过对研究区覆盖类型分析,利用二次差值法获得城市扩展变化信息,针对研究区空间扩展模式及特点,进行了驱动机制分析。并基于元胞自动机原理,对研究区城市扩展进行了模拟与预测,为该研究区的城市发展、规划研究提供了有利的科学依据。

## 1 研究区概况及扩展信息提取

### 1.1 研究区概况及数据来源

研究区包括了马来西亚吉隆坡市及其周边居民地。研究区位于赤道附近的马来半岛西南沿海,东经 $101^{\circ}41'$ ,北纬 $3^{\circ}09'$ ,总面积为 $2\,052.40\text{ km}^2$ ;西北、正北、东北3面为丘陵和山脉;气候属热带雨林气候,覆盖着丰富的热带森林,年平均气温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;降雨量丰富,年平均降雨量为 $2\,000\sim 2\,500\text{ mm}$ ;该区经济作物以油棕树、橡胶树为主。本文采用数据包括3部分。(1)多时相Landsat TM影像。包括1990年,1994年,1996年,1998年以及2002年;(2)空间数据。主要为吉隆坡及其周边地区30 m分辨率数字高程模型(DEM)和交通矢量数据;社会经济数据有吉隆坡及周边地区的人口、GDP等。

### 1.2 城市扩展变化信息提取

1.2.1 研究区覆盖类型分析 从研究区的土地覆盖类型来看,主要包括空地、居民地、原始林地、人工作物、水体,同时有一定范围的火烧迹地和小部分稀疏林地。研究区特殊的地理位置决定居民地的环境背景常年以植被为主,同时有小面积的水体、火烧迹地和稀疏林地。林地火烧迹地的存在是由于更换经济作物的需要,人为烧过的森林、油棕林或橡胶林。通过研究发现,研究区的城市扩展过程主要是对植被和

水体的侵蚀过程,该过程主要是先将植被和水体变为空地,在此基础上建造房屋或停车场,进一步发展为居民地,因此,这里将空地视为居民地。

1.2.2 数据处理 基于遥感影像的城市扩展变化信息提取对多时相影像几何纠正要求较高,保证几何误差为 $0.2\sim 0.5$ 个像素。通过比较分析发现不变特征点法(PIFs, pseudoinvariant features)比较适合城市研究<sup>[14]</sup>。PIFs法是在研究区内选取 $16\sim 20$ 个不变纯像元,如旧的机场、广场等,然后通过线性归一化函数,做不同时相的辐射归一化处理。由于研究区从1990年至今,地物类型变化较大,很难找到如此多的纯像元。针对该研究区,本文所采用的变化监测信息提取方法为二次差值法,是在差值法基础上发展起来的,该方法对辐射归一化精度要求不高,主要是在不同覆盖类型区(居民地、原始森林、人工种植地以及远离市区的水体)选取 $2\sim 3$ 块覆盖类型不变的小区域,做线性回归,完成辐射归一化。

1.2.3 基于二次差值法的变化信息提取 Landsat TM影像的第三波段是可见光最佳波段,能很好地反映植被、水体,尤其是城市区域。因此,在第3波段上,城市区域的灰度值要比其它土地覆盖类型的灰度值大的多。而在第二波段上,水体、植被的灰度值较高,城市区域的灰度值较低。根据该理论,在辐射归一化后,利用公式(1)来提取城市扩展变化信息:

$$\frac{[TM_{3后} + (TM_{3后} - TM_{2后})] - [TM_{3前} + (TM_{3前} - TM_{2前})]}{TM_{3后} - TM_{2后} - (TM_{3前} - TM_{2前})} \quad (1)$$

式中:“后”代表变化后影像,“前”代表变化前影像。通过 $(TM_3 - TM_2)$ 可以得到任意土地覆盖类型在两个波段间的灰度差值;再加上 $TM_{3后}$ ,城市区域与其它土地覆盖类型间的灰度差值将被扩大;然后利用门限值 $K$ 提取城市扩展变化区域。门限值 $K$ 包括两部分:一部分是在 $(TM_3 - TM_2)$ 后的城市区域与其它土地覆盖类型间的灰度差异;另一部分是城市区域与其它土地覆盖类型在 $TM_3$ 上的灰度差异。

利用二次差值法变化信息提取方法,分别进行1994—1990年,1996—1994年,1998—1996年,2002—1998年的变化信息提取。通过随机点方法进行精度评价,该方法提取的变化信息精度都在90%以上。与其它变化信息提取方法比较后发现,该方法提取的该研究区变化信息精度最高,满足研究需要。将提取后的变化信息进行16pixels过滤分析,得到最终研究所需结果。

1.2.4 谱间关系法的城市建设用地提取 除城市扩展变化信息的提取外,还分别提取了1990年,1994

年, 1996 年, 1998 年以及 2002 年的研究区城市建设用地, 辅助城市扩展研究。研究区的土地覆盖类型主要为居民地、高密度植被、水体、稀疏林地及火烧迹地。由于居民地的遥感信息提取还存在不稳定性, 而植被、水体的提取方法相对较为稳定, 且为该研究区的主要覆盖类型。通过理论分析与实验, 本研究采用剔除法除去植被、水体、稀疏林地及火烧迹地, 提取居民地。通过误差矩阵进行精度评价, kappa 系数均在 82 以上, 满足精度要求。

## 2 城市扩展分析

### 2.1 城市扩展模式分析

2.1.1 城市扩展强度分析 城市扩张强度指数 (urbanization intensity index,  $u$ ) 是城市土地利用扩展特

征重要度量指标之一, 表示为公式(2)

$$U = [(I_{t+n} - I_t) / n] \times 100 / A \quad (2)$$

式中:  $U$ ,  $I_{t+n}$ ,  $I_t$  ——分别为空间单元在  $t-t+n$  时段内的城市扩展强度指数以及  $t+n$  及  $t$  年时的城市土地利用面积;  $A$  ——空间单元面积的总面积<sup>[1]</sup>。城市扩展强度划分标准见表 1<sup>[15]</sup>。

通过分析发现, 1990 年, 1994 年, 1996 年及 1998 年的城市化比例分别为 15.02%, 17.64%, 23.34%, 32.97%。表 2 为研究区从 1990 年至 2002 年的城市扩展面积及扩展强度指数。从表 2 中可以看出, 从 1990 年至 1998 年, 研究区的城市扩展强度一直保持大于 2% 的水平稳步增长, 属于持续的高速扩展期。到 1998 年, 扩展速度开始减慢, 1998 年至 2002 年的城市扩展速度为 1.73%, 进入中速扩展期。

表 1 城市扩展强度划分标准

扩展速度	> 1.92	1.05~ 1.92	0.59~ 1.05	0.28~ 0.59	0~ 0.28
扩展类型	高速扩展	快速扩展	中速扩展	低速扩展	缓慢扩展

表 2 1990—2002 年研究区城市扩展强度

项目	1990—1994	1994—1996	1996—1998	1998—2002
扩展面积/km <sup>2</sup>	230.586 2	109.911 7	120.451 7	170.121 7
年均扩展强度/%	2.350 0	2.240 0	2.460 0	1.730 0
年均扩展面积/km <sup>2</sup>	57.646 6	54.955 8	60.225 8	42.530 4
扩展类型	高速扩展	高速扩展	高速扩展	中速扩展

吉隆坡市内部的城市扩展在区域的整个扩展时期来看, 特征极为明显。从 1990 年开始, 吉隆坡内部的填充式扩展保持着强烈的增长趋势, 在 1994—1996 年期间扩展速度达到顶峰; 而在 1996—1998 年期间, 扩展速度突然下降, 达到整个时期的最低点; 从 1998 年开始, 这种城市内部的填充式扩展才有所好转(表 3)。

将所提取的不同时期城市扩展空间数据根据像元组进行组团式分析, 按照大于 5 000 像元, 2 000~ 5 000 像元间, 1 000~ 2 000 像元间, 500~ 1 000 像元间, 小于 500 像元进行组团个数统计(见表 4)。通过不同时期各种组团数百分比可以看出, 1990—1994 年以及 1994—1996 年这两个时期的城市扩展模式中, 集中式扩展较为明显, 主要表现为大组团所占比例较大。

表 3 研究区各时期城市扩展速度

时期	面积/km <sup>2</sup>	扩展速度/(km <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
1990—1994 年	12.238 1	3.059 525
1994—1996 年	15.509 1	7.75 455
1996—1998 年	3.535 9	1.767 95
1998—2002 年	8.110 0	2.027 50

2.1.2 城市扩展格局分析 以吉隆坡市的行政几何重心为中心进行方向划分, 主要为 8 个方向: 东、南、西、北、东南、西南、东北、西北。从不同时期的吉隆坡及其周边城市扩展方向性格局可以看出(见图 1—2), 从 1990—2002 年, 城市扩展主要集中在吉隆坡的东南面、南面、以及西南面, 其中, 南面的扩展最为突出, 在各时期都表现出高速扩展。1990—1994 年期

间,各方向的扩展差距相对较小,1994年后,南面一直表现出高速扩展,与其它方向的扩展差距明显扩

大。与其它时期的城市扩展有一点不同,1990—1994年间,城市扩展在西北方向表现也较明显。

表 4 研究区城市扩展像元的组团特征

时段	≤500		500~1 000		1 000~2 000		2 000~5 000		>5 000		总数
	像元数	比例	像元数	比例	像元数	比例	像元数	比例	像元数	比例	
1990—1994年	893	93.51%	32	3.35%	18	1.88%	10	1.05%	2	0.21%	955
1994—1996年	1 105	95.01%	27	2.32%	15	1.29%	11	0.95%	5	0.43%	1 163
1996—1998年	562	93.81%	13	2.17%	11	1.84%	9	1.51%	3	0.50%	598
1998—2002年	926	94.03%	27	2.75%	16	1.63%	10	1.02%	3	0.31%	982

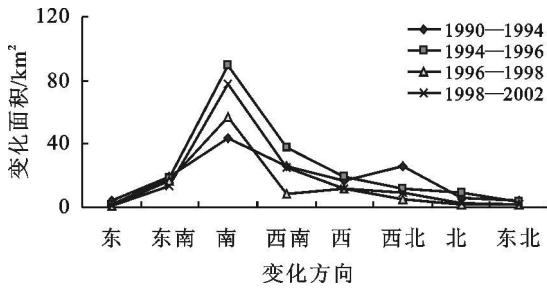


图 1 不同时期各方向的城市扩展变化

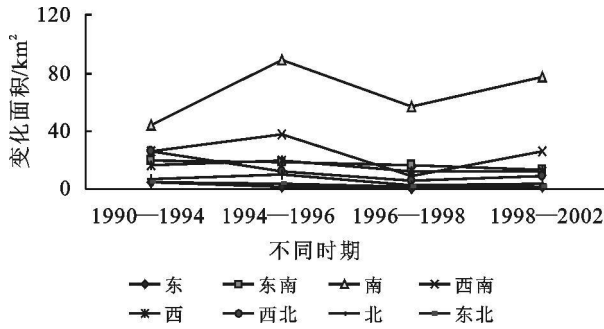


图 2 各方向不同时期的城市扩展变化

综合上述分析,1990—1994年期间,整个研究区的扩展面积为 $145.57 \text{ km}^2$ ;扩展速度为 $36.39 \text{ km}^2/\text{a}$ ,扩展速度相对较快;城市扩展方向以南部、西南部和西北部为主;周边式扩展是其主要的扩展类型,同时伴随着一定的填充式扩展。

1994—1996年期间,吉隆坡内部及其周边的城市扩展速度突然增大,达到最大值。城市扩展方向主要集中在南部,同时西南方向也较为明显。南部和西南部的新开发居民地较多,吉隆坡内部的填充式发展也达到最大。

1996—1998年期间,城市的扩展速度开始减慢,降低为 $51.81 \text{ km}^2/\text{a}$ ,比上一时期减少很多,南部依旧是主要的城市扩展方向。吉隆坡内部的城市填充发展突然降低,达到最低值。

1998—2002年期间,城市化水平呈现上升趋势,

吉隆坡城市内部的填充式发展有所回升,新开发区域与填充式发展模式同时存在。

## 2.2 吉隆坡及周边城市扩展机制分析

2.2.1 地形因素 该研究区的城市扩展在很大程度上受限于地形因素。从研究区的地貌来看,吉隆坡东部、东北部以及北部是山脉,山脉的存在制约了城市向该方向扩展。因此,在整个研究区的城市扩展分析中发现,吉隆坡东部、东北部和北部的城市扩展很微弱。

2.2.2 经济因素 该研究区的城市扩展模式是多经济核心支持下的共同扩展,因此受经济中心影响较大。吉隆坡是马来西亚的首都,也是马来西亚经济文化中心。它在发展的过程中,早已与其周边的雪兰俄州居民地连成整体。在Shah Alam与吉隆坡之间是雪兰俄州一重要县——八打灵。这3个区域经济中心点支持了该研究区最初的城市扩展。

沿吉隆坡、八打灵、Shah Alam这条线延伸到西部海岸是马来西亚一重要港口——巴生港。这一港口的存在促进了该区西南部城市的扩展。芙蓉城位于吉隆坡东南部,是与雪兰俄州相邻的马来西亚另一州政府所在地,两者距离很近,且路网发达,因此,这在一定程度上带动了沿这一方向的城市扩展。

表5和表6分别反映了研究区人口变化状况和人均拥有机动车变化情况。通过数据可以看出,研究区人口一直处于快速增长状态,虽然人均拥有机动车呈现下降趋势,但其下降程度远低于人口增长程度,因此,机动车总量仍呈现快速增长状态。通过表7也可以看出,道路密度和道路发展指数也呈增长状态,但增长幅度不大。因此,人口、机动车的迅猛增长与道路指标的低速增长形成矛盾。吉隆坡与雪兰俄州居民地之间的关系等同于母城与卫星城之间的关系,因此,在交通拥堵状况日益严重的情况下,铁路沿线附近及主要公路附近成为城市扩展的主要区域。

表 5 研究区人口数量  $10^3$  人

年份	1990	1995	2000	2005
人口数量	2 331.4	3 210	4 175	5 069

表 6 研究区每千人机动车辆拥有量 辆

年份	1995	2000
数量	399.4	367.9

表 7 研究区道路发展指标

年份	1995	2000	2005
道路密度	0.19	0.20	0.21
道路发展指数	0.74	0.75	0.76

2.2.3 行政政策 该研究区的行政政策对该区的城市扩展产生了重要影响。新机场在 1994 年前开始动工修建,同时,沿吉隆坡一直通往机场的高速公路得以修建。新的行政首都 Putrajaya 的修建与使用,使得 1996—1998 年期间,以新机场以及 Putrajaya 为中心的周边式发展极为明显,这是该期间吉隆坡内部的填充式发展突然下降,以及南部扩展较为突出的主要原因。

### 3 吉隆坡及其周边地区城市扩展预测

元胞自动机模型(CA 模型)是在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上,按照一定局部规则,在离散的时间维上演化的动力学系统。它不仅可以用来模拟和分析一般的复杂系统,而且对于具有空间特征的地理复杂系统更具有优势,可以用来进行预测。根据 CA 模型的组成,按照研究区的实际驱动机制,分别进行了元胞、状态、邻居、规则以及时间的定义:元胞对应于 Landsat TM 影像  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的像元;状态分为两种,即居民地与非居民地;邻居采用了标准的八邻居的 Moore 模型<sup>[10]</sup>。规则的设置较为复杂,由于城市扩展受动力驱动机制与阻力机制的相互作用,因此本研究中城市扩展的综合影响因子包括了道路、经济中心、惯性与邻居。综合元胞转化的影响因子,非居民地转化为居民地的概率公式为:

$$p = \left[ k_1 \frac{1}{1 + D_1/a_1} + k_i \frac{1}{1 + D_i/a_2} + k_{i+1} \frac{1}{1 + D_{i+1}/a_3} + k_{i+2} \frac{n}{n+1} \right] (1 + r_a) \quad (3)$$

式中:  $k_1, k_i, k_{i+1}, k_{i+2}$  ——分别为不同影响因子的转化权重,其值是由 Monte Carlo 方法确定的;  $D_i$  ——分别为元胞与道路、经济中心点、居民点的最近距离;  $a_r$  ——修订距离衰减的通达性系数,在该处的值为 100;  $n$  ——中心元胞的 8 个邻居元胞中居民地元胞

的数量;  $r_a$  ——随机干扰系数,取值范围为 0 和 1 之间。在本模型中, Monte Carlo 权重必须满足一个条件,即,

$$k_1 + k_2 + \dots + k_i = 100 \quad (4)$$

根据元胞转化概率公式,则每一个非居民地元胞都将有一个转化概率。将这些元胞的转化概率按照降序进行排列,则概率值较高的将会从非居民地元胞转化为居民地元胞。而元胞转化的数量由研究区用地总量控制模型决定。

城市扩展 CA 模型中,非居民地元胞向居民地元胞转化,除影响因素外,还包括限制因素。通过对该研究的实际分析,在该模型运行中的限制因素主要包括地形坡度、水体、自然森林保护区以及休闲地。根据马来西亚当地的建筑规划要求,当地形坡度大于  $30^\circ$  时,不允许建造房屋。因此,利用 DEM 数据,在 ArcGIS 中得到坡度大于  $30^\circ$  的坡度图层;将主要水体提取出来,同时对引用水水库做 0.6 km 的 buffer,作为水体限制层;提取出政府规定下的自然森林保护区以及休闲地,这是城市发展的另一限制因素。合并这些限制图层为一个限制图层,作为该 CA 模型运行的限制因素层。

利用 IDL 语言编写了运行程序,在限制层等空间数据和经济数据的辅助下对吉隆坡及其周边地区的城市扩展进行了模拟与预测。图 3(a) 为以 1992 年研究区城市现状为基础,对 1994 年做出的模拟。通过与研究区 1994 年〔见图 3(b)〕的实际情况相比较, Kappa 系数为 83.17。与此,在本研究中对吉隆坡及其周边地区在 2010 年的城市扩展情况进行了预测〔见图 3(c)〕。通过预测可以看出,吉隆坡作为马来西亚首都,一直处于中高速发展状态。到 2010 年吉隆坡及其周边地区得到了充分的发展,尤其是以机场和新行政首都 Putrajaya 为中心的南部地区。吉隆坡及其周边进一步形成一个城市整体,填充式发展明显被以新地区开发为主的集中式扩展所替代。此外,西北部城市扩展也较为明显,成为城市扩展的另一个主要方向。

### 4 结论

(1) 利用二次差值法能够高精度提取出城市扩展变化信息,满足不同情况下城市扩展变化的研究,为城市扩展变化信息的直接提取提供了新的方法和手段。

(2) 吉隆坡及其周边地区的城市扩展一直处于中高速阶段。通过对研究区的城市扩展特征分析,发现不同时期吉隆坡及其周边城市扩展模式主体不同,吉隆坡市内部的填充式扩展模式受周边地区的集中

式扩展模式影响较大。受地形影响,城市扩展在研究区东部、东北部以及北部受到了限制,尤其是以东北部最为突出。而经济因素以及行政政策的影响,使得

城市扩展明显朝向东南部、南部以及西南部,而南部机场及新行政首都的建立使得城市扩展在这一方向最为明显。

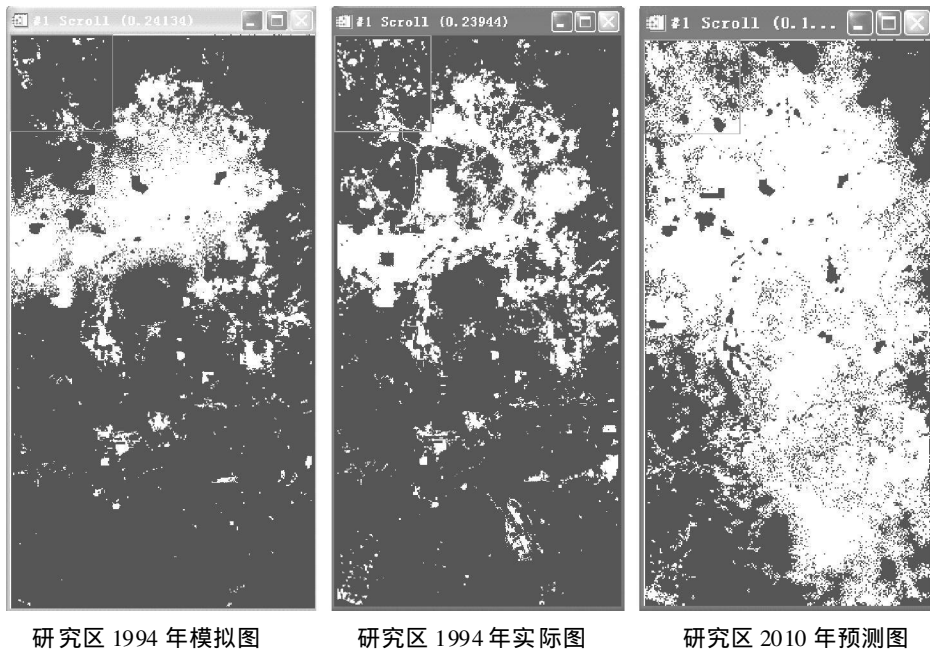


图 3 研究区城市扩展模拟与预测

(3) 基于 CA 模型原理,以研究区 1990 年数据为基础对 1994 年做出的城市扩展模拟,与城市实际分布状况相比,精度在 90% 以上,满足了研究需求,为研究区的城市扩展预测打下了基础。而基于 2002 年研究区实际分布对 2010 年做出的城市扩展预测来看,到 2010 年,城市扩展方向主要为西北部、南部和东南部,其中,南部的城市扩展最为显著。机场周边及新的行政首都 Putrajaya 周边已充分扩展,连成整体,符合当前实际的城市扩展要求与特征。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 赵晶,陈华根,许惠平. 20 世纪下半叶上海市居住用地扩展模式、强度及空间分异特征[J]. 自然资源学报, 2005, 3(20): 400—406.
- [ 2 ] 李国正,王仰麟,吴健生,等. 城市扩展模型在土地供应空间决策中的应用[J]. 资源科学, 2005(2(27)): 51—58.
- [ 3 ] MAKTAV D, ERBEKR F S, JURGENS C. Remote sensing of urban area [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 4(26): 655—659.
- [ 4 ] 何春阳,史培军,陈晋,等. 北京地区城市化过程与机制研究[J]. 地理学报, 2002, 3(57): 363—371.
- [ 5 ] 戴芹,陈雪,马建文,等. 基于遥感数据 SOFM 网络分类的五种城市增长方式鉴别方法应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 6(30): 526—538.
- [ 6 ] 陈素蜜. 遥感与地理信息系统相结合的城市空间扩展研究[J]. 地理空间信息, 2005, 1(3): 33—36.
- [ 7 ] 李晓文,方精云,朴世龙. 上海及周边主要城镇城市用地扩展空间特征及其比较[J]. 地理研究, 2003, 6(22): 769—779.
- [ 8 ] 吴宏安,蒋建军,周杰,等. 西安城市扩张及其驱动力分析[J]. 地理学报, 2005, 1(60): 143—150.
- [ 9 ] 张显峰,崔伟宏. 集成 GIS 和细胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J]. 测绘学报, 2001, 2(30): 148—155.
- [ 10 ] Chunyang He, Norio Okada, Qiaofeng Zhang et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China [J]. Applied Geography, 2006, 26: 323—345.
- [ 11 ] 马荣华,陈雯,陈小卉,等. 常熟市城镇用地扩展分析[J]. 地理学报, 2004, 3(59): 418—426.
- [ 12 ] Liu Huiping, Zhou Qiming. Developing urban growth predictions from spatial indicators based on multi temporal images [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2005, 29: 580—594.
- [ 13 ] Xiao Jieying, Shen Yanjun, Ge Jingfeng, et al. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing [J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 75: 69—80.
- [ 14 ] 张友水,冯学智,周成虎. 多时相 TM 影像相对辐射校正研究[J]. 测绘学报, 2006, 2(35): 122—127.
- [ 15 ] 刘盛和,吴传钧,沈洪泉. 基于 GIS 的北京市土地利用扩展模式[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 407—416.