

基于 CA 模型的城镇扩张模拟与分析*

张亦汉¹, 许晓聪², 林圣捷¹

(1. 广东财经大学地理与旅游学院, 广东 广州 510320;
(2. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 引入逻辑回归 CA 模型挖掘城市发展的转换规则, 模拟/预测了佛山市的城镇扩张, 并采用转移矩阵和景观指数等方法分析城镇化过程。结果表明佛山的城镇化过程侵占了大量的农田、森林和其它(包括果园和池塘等)用地类型。运用 CA 进行模拟, 其总精度和 Kappa 系数可达到 93.7% 和 0.86。通过景观指数分析, 佛山城市发展将会更为聚集, 其最大斑块指数增大。在城市优先发展情景下, 到 2020 年将有 191 km² 农田将转变为城市用地, 占有所有农田(706 km²)的 27%。在保护农田和保护绿地的情景下, 农田和绿地可以到较好的保护, 但是它将会占用其它土地类型以满足城市扩张的需要。通过分析空间变量和城市用地的关系发现, 各个空间变量对城镇化的廊道作用显著。

关键词: 元胞自动机(CA); 城镇化; 转移矩阵; 景观指数; 佛山市

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)03-0140-08

Urban expansion simulation and analysis based on CA model

ZHANG Yihan¹, XU Xiaocong², LIN Shengjie¹

(1. School of Geography and Tourism, Guangdong University of Finance and Economics,
Guangzhou 510320, China;

2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to understand the urbanization process, logistic regression is introduced to mine the conversion rules of urban development. The rules are input into cellular automata (CA) model to simulate the urban development process of Foshan city. Experiments show that urbanization process is the core part in the development of Foshan city. The source of urban land comes from farmland, forests and other types of land (including orchards and ponds, etc.). In the simulation result, the overall accuracy and Kappa coefficient can reach 93.7% and 0.86, respectively. By using landscape indices, Foshan city will become more and more aggregative with the maximum patch index increase. It was found that there are 191 km² of farmland changed into urban land in the scenarios of urban prior development, accounting for 27% of all the farmland (706 km²). In the scenarios of farmland protection and forest protection, farmland and forest can be better protected, but urban expansion will occupy other types of land use to solve the problem of lacking enough land use for urban expansion. It is found that the spatial variables have remarkable corridor effect on urbanization by analyzing the relationship between proximity variables and urban land uses.

Key words: cellular automata (CA) model; urbanization; transfer matrix; landscape index; Foshan

* 收稿日期: 2016-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(41531176, 41371376); 国家社会科学基金(14BRK017)

作者简介: 张亦汉(1985年生), 男; 研究方向: 地理信息模型与数据同化; E-mail: zyh4184@163.com

城镇化是人类生产和生活场所由乡村转移到城镇的过程。持续的城镇扩张也伴随着农村人口向城镇人口迁移,农村人口比例降低等。城镇扩张的加速对我国全面建设小康社会有着较大的作用^[1-2]。但是研究表明,目前国内膨胀式的城镇化造成了资源短缺、资源枯竭、环境危机和拥挤问题等,严重限制了经济的发展^[3-4]。由于当地政府推行边发展边治理(或者先发展后治理),因此城市的城镇化往往对当地自然生态系统造成严重的破坏,如水、空气和土壤的污染。同时,政府在平衡城市环境和城市发展计划往往会有缺失,使得一些城市的长远发展陷入困境^[5]。因此,在城镇化研究中,更多的人关注新型的城镇化。新型城镇化是城乡统筹、生态宜居和协调发展,实现城市乡村的基础设施能够一体,公共服务和公共设施能够均享,使得经济、社会与环境和諧发展^[5-6]。

新型城镇化关注城市发展与土地资源的关系^[7]。城镇人口的增多,必然会通过其自身的生产生活对周围的资源环境进行改造和利用。资源环境在人类的影响下会发生变化,同时也会消耗这些有限的自然资源(包括土地资源)^[8]。随着城镇化深入,特别是对于发展较快的城市,城镇规模的不断扩大,对土地资源的需求持续增加^[9-10]。新型城镇化需要合理控制城镇化的速度,保护珍贵的土地资源,改善生态环境等^[5]。土地资源是城镇化进程中非常重要的因素,也是一个无法替代的要素,它对城市发展具有很强的约束性^[4,7,11]。在不同的城镇化阶段,土地资源的作用有所不同。在初期,资源充足环境承受力相对强,便带来了城镇化的快速发展。城镇发展到一定阶段,受到土地资源制约,城镇化必然会进入一个较长的调整期。在这期间,城市的城镇化的规模、强度和速度均在资源环境承受能力范围内。城镇化过程与土地资源有复杂的关系,但是目前很多研究根据统计数据去分析和研究城镇化与土地资源之间的关系。因此本文引入逻辑回归模型挖掘城市转换规则,输入到时空模型(元胞自动机,CA)中模拟佛山市的城市扩张情景,再分析城市扩张与土地资源之间的关系,最后引入情景模拟方法模拟土地资源政策的变化后等城镇化的发展过程,为城市决策者提供辅助支持。

1 方法与数据

1.1 逻辑回归的城市扩张CA模型

城市系统是动态的复杂系统,具有开放性、动态性、自组织性和非平衡性的特点,城市的发展变

化受到自然、社会和经济等多种要素的影响,其行为过程具有高度的复杂性^[12]。在城市发展模拟中,CA模型因具有自组织性、“自下而上”的研究思路、高分辨率的空间尺度和城市空间的动态变化对城市发展的反馈作用等特点,被认为是模拟复杂城市系统非常有效的模型之一^[13-16]。研究表明,用CA模型模拟城市发展时,元胞的城市发展概率主要与邻近范围元胞的状态、离商业中心的最短距离、离居住中心的最短距离、离道路的最短距离等变量相关^[17-20]。

在基于逻辑回归的城市扩张CA模型中^[13],某元胞 $t+1$ 时刻发展为城市用地的概率 $p'_{d,ij}$ 为:

$$p'_{d,ij} = RA \times Pg \times \text{con}(s'_{i,j}) \times \Omega'_{ij} \quad (1)$$

式中,随机项: $RA = 1 + (-\ln r)^{\alpha}$ 。其中 r 为 $[0, 1]$ 间的随机数, α 为控制随机变量的参数,值域为 $[1, 10]$,一般取值2^[17]。

开发适宜性: $Pg = \frac{1}{(1 + \exp(-z_{ij}))}$ 。其中 $z_{ij} = a + \sum b_k x_k$, a 为常数项, b_k 为空间变量的权重, x_k 为空间变量,如离公路的最短距离,离市中心的距离等。

约束条件函数: $\text{con}(s'_{i,j})$ 。其值域范围 $0 \sim 1$, $s'_{i,j}$ 为 t 时刻元胞的状态。如果该状态越有利于城市发展的状态(如元胞为开发用地等),则的值越接近于1;若该状态为不利于城市发展的状态(如元胞为水体),则其取值越接近于0。

邻域函数: $\Omega' = \sum \text{con}(\text{urban})/8$; \circ 表示 t 时刻元胞的 3×3 邻域对其的影响值。

得出单元发展概率后,还要判断元胞是否发展为城市用地,往往给定一个阈值,比较元胞发展概率与阈值的大小:

$$S_{t+1}(ij) = \begin{cases} \text{Developed}, p'_{d,ij} > p_{\text{threshold}} \&\& \gamma \leq \beta \\ \text{Undeveloped}, p'_{d,ij} > p_{\text{threshold}} \parallel \gamma > \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中, γ 为随机变量, $\beta = 1/K$, K 为迭代次数。

建立逻辑回归模型后,将模型参数及模拟起始影像输入到模型中,便可以“自下而上”地模拟出城市的扩张过程。

1.2 数据准备

佛山市是广东省城镇化发展速度较快区域。尤其是近年来,受到广佛同城化政策影响,该区与城镇化进程的速度和规模都有扩大的趋势。在新形势下,研究城市扩张与资源环境的复杂关系,要求研究区城市用地变化显著,且对环境有重要作用,因

此本文选择广东省佛山市为研究区。

1.2.1 数据描述与预处理 选用 2010 和 2012 年该区域遥感 TM 影像, 成像时间均为每年的 10 - 12 月份, 7 个波段, 对地分辨率 30 m。影像经过校正、配准和面向对象分类将全区分为城市用地, 水体, 农田, 裸地, 森林和其它等类型, 得到两个年份的土地利用分类图。为了减少运算量, 影像按 100 m 进行重采样。

1.2.2 空间变量数据 模拟初始数据使用 2010 年

的 TM 图像, CA 模型的空间变量主要包括离城中心距离、离区中心距离、离普通道路距离、离高速公路距离、离省道距离、离国道距离和离轻轨距离 (图 1), 其中各个距离的参数是由 SPSS 软件对随机采样的样本得进行逻辑回归得到的。邻域函数通过计算元胞各自周围的城市用地个数得到, 在 ArcGIS 中可通过函数 Focal 得到。

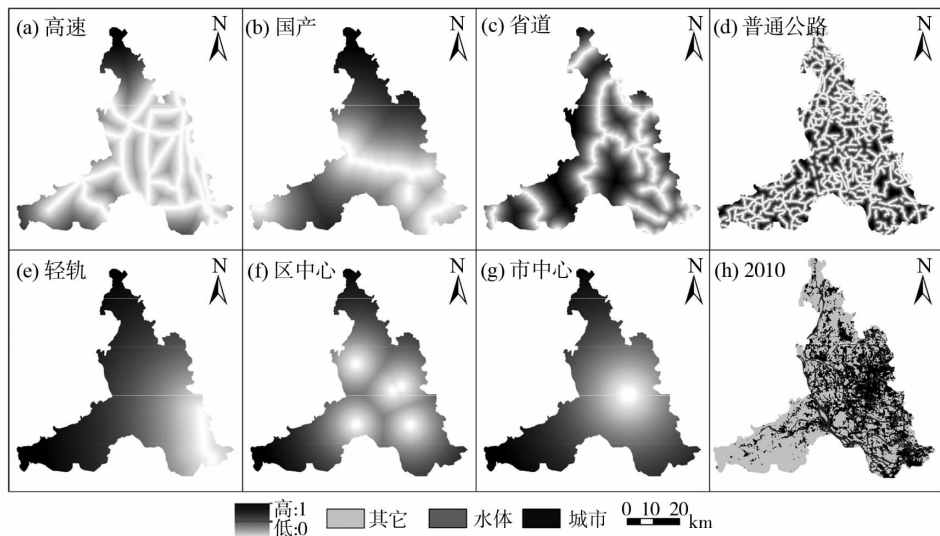


图 1 空间变量与初始影像

Fig. 1 Spatial variables and initial image

2 分析与讨论

2.1 模型设置

为了使得模型训练时更快地收敛, 文中对各个因子进行了归一化处理。归一化处理后, 再运用随机采样方法以获取样本数据, 样本数量一般为全区的 20%^[18]。将样本分成 2 组, 训练样本 (用于获取参数权重) 和测试样本 (用于检验的精度)。通过使用 SPSS 软件对训练样本进行逻辑回归可得到各个空间变量的权重, 其中高速、国道、普通公路、轻轨、区中心、省道和市中心的权重分别为 0.158, 0.225, 0.02, -1.673, -0.547, 0.367 和 -1.881。对这些权重进行检验, 即把这些权重应用到测试样本中。实验发现, 测试精度达到 95.6%, 满足模型的模拟要求^[21]。从因子权重看, 可以发现市中心与区中心的权重呈现出负相关, 这表明离市/区中心越近, 城市发展的概率越大, 这与实际情况是一致的。高速、国道、省道和普通公

路呈正相关关系, 这表明, 离公路越远城市发展越有可能, 这是与实际情况不符合的。但是区/市中心与道路之间有较强的相关性, 相关系数可以达到 0.56。这也表明, 区/市中心的负相关作用较大, 影响到了道路的正相关。

2.2 城市扩张模拟结果

本文模拟了 2010 - 2012 年佛山市的城市扩张情况。模型除了需要输入各个空间变量外, 还需要设置转换量以控制模型的运行终止条件。文中设置模型转换量达到 2010 - 2012 年间的城市转换总量时, 模型将停止运行并输出模拟结果 (图 2)。在实际情况中, 新增城市用地大多分布在佛山东部 (包括南海、三水和禅城), 而且部分地区新增城市用地成块状, 而在西南部的高明区却相对较少。在整体上看, 模拟结果与实际情况能够很好地吻合。通过 GIS 叠加分析可以得出实际新增的城市用地分布和模拟新增的用地分布情况, 模拟新增的城市用地主要分布在东部地区, 但是模拟结果相对而

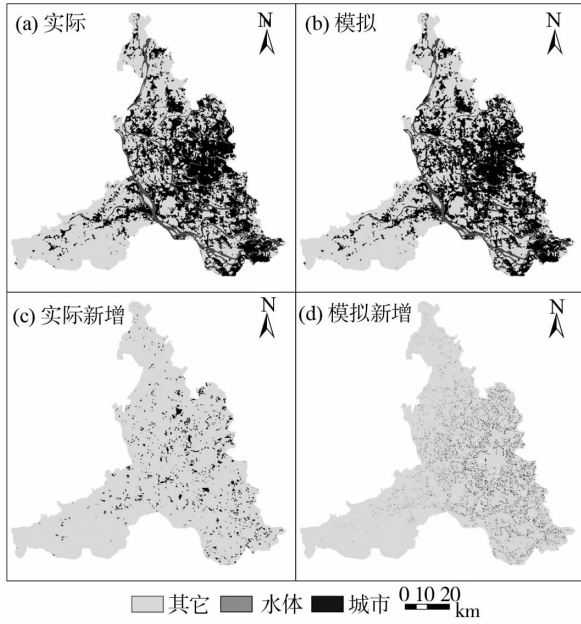


图 2 新增城市用地的分布与对比

Fig. 2 Distribution and comparison of new urban areas

言却比较零散。这主要是因为 CA 模型比较难以模拟出飞地或者成块的城市用地。

2.3 转移矩阵分析

通过转移矩阵可分析 2010 - 2012 年期间佛山市土地利用转换情况 (表 1)。从表中可知佛山市城市用地从 2010 年的 1 237.8 km² 增加到 1 349.7 km², 增幅达到 9%。主要来源于农田 (75.3 km²)、其它类型 (64.0 km² 包括裸地和果园等)

和森林绿地 (22.1 km²)。一些水体 (如: 池塘) 也转变为城市用地, 但转换量较少, 只有 0.6 km²。但是从总体上看, 不论是农田、森林还是其它, 其面积均减少, 分别从 2010 年的 706.4, 879.4 和 986.8 km², 减少到 2012 年的 630.4, 857.2 和 923.5 km²。相比城市用地的变化, 水体、农田、森林和其它用地相互之间的转换相对较少, 也说明人类活动主要集中于城市范围, 而由人类活动导致的其它用地类型改变较少。

通过转移矩阵分析 (表 2) 可以看出使用的 CA 模型仅模拟了城市用地的变化, 即模型仅考虑非城市用地转变为城市用地这种情况。佛山市的城市用地来源主要来源于农田 (62.4 km²)、森林 (23.2 km²) 和其它 (75.5 km²)。与实际情况相比, 森林的模拟精确度最高, 偏差只有 1.1 km²。而农田和其它相对较高分别为 12.9 km² 和 11.5 km²。从误差比例看, 森林、农田和其它分别为 5%, 17% 和 18%。2010 - 2012 年期间, 不论是真实情况还是模拟结果均表明, 农田正在减少, 减少比较达到 10% 左右, 减幅显著。这也表明佛山市的粮食自给自足的能力将会有一定程度的下降。城市扩张往往不仅仅占用农田, 还占用其它用地类型, 如裸地、灌木和果园等。这些用地类型转变成城市用地的数量与农田相当, 但是比例却相对较少。在森林保护方面, 佛山市相对较为重视, 仅转换了 20 km² 左右, 比例不及 2.5%。

表 1 2010 - 2012 佛山市城市扩张 (真实) 转移矩阵

Table 1 Transfer matrix of urban expansion (actual) in Foshan from 2010 to 2012

km²

项目	城市	水体	农田	森林	其它	总计
城市	1 237.8	0	0	0	0	1 237.8
水体	0.6	218.2	0	0	1.1	219.9
农田	75.3	0	610.6	1.2	19.3	706.4
森林	22.1	0	1.3	851.3	4.7	879.4
其它	64.0	1.2	18.6	4.6	898.4	986.8
总计	1 399.7	219.4	630.4	857.2	923.5	

表 2 2010 - 2012 佛山市城市扩张 (模拟) 转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of urban expansion (simulation) in Foshan from 2010 to 2012

km²

项目	城市	水体	农田	森林	其它	总计
城市	1237.8	0	0	0	0	1 237.8
水体	0	219.9	0	0	0	219.9
农田	62.4	0	644.0	0	0	706.4
森林	23.2	0	0	856.2	0	879.4
其它	75.5	0	0	0	911.3	986.8
总计	1 398.9	219.9	644.0	856.2	911.3	

表 3 模拟结果的精度评价

Table 3 Accuracy evaluation of simulation result

项目	实际			正确率/%
	非城市	城市		
模拟	非城市	250 355	12 875	95.1
	城市	12 693	127 099	90.9
正确率/%		95.2	90.8	

本文也采用总精度和 Kappa 系数评价模拟结果。通过混淆矩阵表 (表 3) 可知, 非城市地区的模拟精度约 95.1%。但是该精度往往与研究区域的大小有关系。城市用地的模拟精度约 91%, 精度较高, 这个指标能够很好地反映模拟结果中变化部分的精度水平。对于整个研究区, 模拟的总精度可达 93.7%。另一个常用的整体对比指标是 Kappa 系数, 它常常是用来评价遥感图像的分类精度问题, 是评价分类图像和实地调查结果一致性的指标。通过计算可知, 模拟结果的 Kappa 系数可达 0.86, 表明模拟结果与实际情况比较吻合。

2.4 景观格局指数分析

本文应用了景观格局指数进行分析 (表 4), 通过计算得出 2010 年城市用地的斑块数为 988。到 2012 年, 斑块总数降到 937, 而模拟结果为 758。这表明, 城市的发展会让城市更为聚集。从城市用地的聚集度中发现, 2010 年城市用地的聚集度为 86.4, 到 2012 年城市用地的聚集度为 88.4, 模拟结果为 87.8。在佛山的城市发展过程中, 城市不断扩大, 不断占用周边的其它用地, 核心城市也不断扩大, 这一现象可以从最大斑块指数中体现。在 2010 年, 最大斑块指数仅为 8.4, 但是到了 2012 年达到 11.2, 其中模拟结果更高, 达

到 14.8。模拟结果的值偏大主要是因为 CA 模型主要采用邻域扩张模式, 飞地式扩张往往比较少考虑, 因此最大斑块指数增加较快。由于相邻的城市用地不断地进行邻域合并, 因此在城市用地中斑块密度值会不断降低, 在 2 年间, 从 0.25 降到 0.23, 而模拟结果降到 0.19。综上所述, 不论是从模拟精度还是从景观指数上看 CA 模型均能模拟出与现实接近的结果。

表 4 城市用地景观指数

Table 4 Landscape index of urban land use

项目	年份	斑块数	斑块密度	最大斑块指数	聚集度
实际	2010	988	0.25	8.4	86.4
	2012	937	0.23	11.2	88.4
模拟	2012	758	0.19	14.8	87.8

2.5 情景模拟

为了更好地预测佛山市的城市发展, 本文设置了 3 种不同的情景, 分别为城市优先发展, 保护农田和保护绿地。城市优先发展情景是指城市的发展并不受其它土地利用类型的制约, 即农田、森林、裸地和其它等土地利用类型均可以转换为城市用地。保护农田发展情景是根据当前国家保护农用地的初衷而设置的模拟场景。在保护农田情景模拟中, 农田和水体均不能转变为城市用地。而保护绿地发展情景则是根据国家要求减少碳排放, 保护固碳作用的森林和草地等的模拟场景。在保护绿地的情景模拟中, 森林绿地和水体均不能转变为城市用地。通过逻辑回归 CA 模型的模拟, 可以得到 3 种不同情景的预测结果 (图 3)。

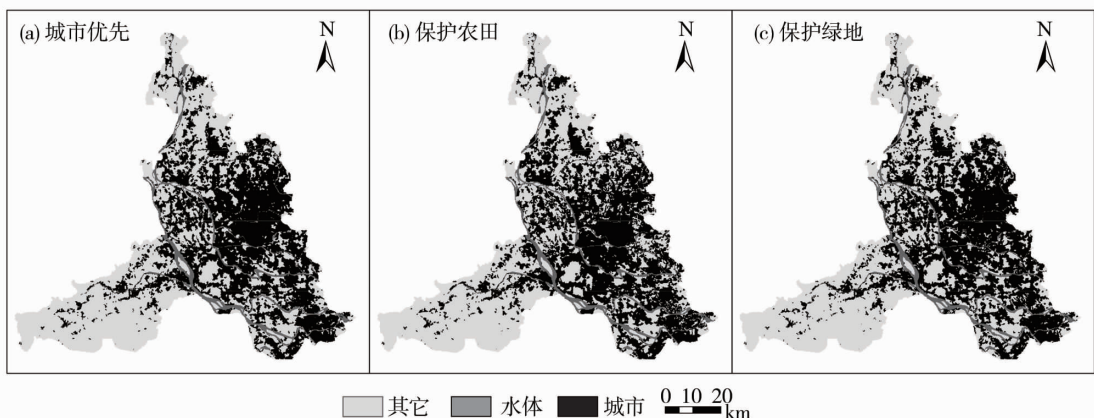


图 3 城市优先发展, 保护农田和保护绿地的情景模拟

Fig. 3 Scenarios simulation of urban-prior development, farmland protection and green-land protection

从图 3 中可以看出，在城市优先发展的情景下，新增城市用地主要集中在郸城和南海，而且城市成团簇发展。主要是因为该地区有相对较好地地理优势，如离城市中心和区中心较近，具有便捷的交通条件。在保护农田的模拟情景下，城市发展较为分散，特别在南海东北部，城市发展有较多的空洞地区。这主要是因为许多农田分布在该地区，而且离城市较近，能够方便地供给粮食水果和蔬菜。在保护绿地的情景下，其模拟结果与城市优先发展的结果有相似之处，主要表现为城市聚集度较高，特别是在区中心和市中心地区。这主要是因为绿地的分布主要在佛山的北部和西南部，离区中心和市中心较远，城市扩张还没有影响到偏远的山区，因此模拟结果中多数城市用地均由农田和果园等转变过来。

采用转换矩阵的方式可分析各个不同模拟情景下的土地利用转换情况（表 5）。从表 5 中可以得出，到 2020 年城市扩张依然会比较显著。在城市优先和保护绿地的模拟情景下，农田均占了较大的比例，表明农田在快速城市发展过程中会慢慢减少，加剧城市的粮食供需矛盾。在表中可以看出，其它用地类型转变为城市用地占有较大的部分，这部分主要包括果园、池塘和沙地等。主要是因为这些用地类型（如果园）开发难度相对较小，而且在政策上不如农田和森林受到较为严格的控制。

统计发现，在城市优先发展情景下，农田有 191 km² 转变为城市用地，占有所有农田（706 km²）的 27%，转换比例较大。森林、裸地和其它的转换比例分别为 8%、20% 和 23%。在保护农田的情

表 5 多情景模拟下的城市用地来源
Table 5 Source of new urban land use in different scenarios km²

项目	农田	森林	裸地	城市	其它
城市优先	191.0	68.8	8.2	1 237.8	225.0
保护农田	0.0	112.4	12.6	1 237.8	362.8
保护绿地	217.3	0.0	10.1	1 237.8	263.4

景下，其它土地利用类型转换为城市用地的面积占据较大部分（362.8 km²），转换比例达到 38%。而森林和裸地的转换比例则为 13% 和 31%。在保护绿地的情景下，农田、裸地和其它的转换比例分别为 31%、25% 和 28%。从本文的情景模拟中可以看出农田在未来的城市扩张模拟中依然会占据较大比例，需要及时保护耕地以维持粮食的供需平衡。森林等由于是固碳的主要方式，也应得到合理的保护。在新型的城镇化扩张中，需要慎重权衡发展与环境等的关系。

2.6 空间环境变量的影响分析与评价

为更好理解各个空间变量对城镇化过程的作用，本文采用了 GIS 空间分析中缓冲分析，设置了多个缓冲半径，即 2 000、5 000 和 10 000 m，得出了 3 种不同的发展情景和不同缓冲距离的城镇化比例情况（表 6）。从整体上看，城镇化的比例随距离的增加而减少，即廊道效应较为明显。在优先发展的情景下，在高速公路 2 000 m 缓冲距离的范围内，其城镇化的比例为 55.3%。在 5 000 m 和 10 000 m 缓冲距离的城镇化比例则减少到 51.3% 和 46.4%。通过对比也可以发现，市中心缓冲距

表 6 不同缓冲距离的城镇化比例
Table 6 Urban percentage in different buffer distance %

情景	缓冲距离/m	国道	高速	普通公路	轻轨	省道	区中心	市中心
优先发展	2 000	55.2	55.3	43.1	77.1	48.0	82.3	95.4
	5 000	52.9	51.3	42.9	69.2	48.1	62.1	88.0
	10 000	51.2	46.4	42.9	61.8	44.2	59.7	84.6
保护农田	2 000	59.1	53.5	42.9	72.5	46.1	82.8	97.7
	5 000	55.6	50.5	42.8	65.3	47.3	62.7	87.7
	10 000	52.9	46.0	42.8	59.2	43.9	60.4	82.6
保护绿地	2 000	57.3	55.4	43.0	77.7	48.3	80.8	82.6
	5 000	54.1	51.2	42.9	69.4	48.3	61.9	85.4
	10 000	51.8	46.3	42.9	62.8	44.2	59.5	83.3

离下的城镇化比例明显高于其它空间变量,这表明市中心对城镇化的带动作用明显,也使得在逻辑回归训练中得到了较高的权重。根据城镇化比例的高低排序,不论是城市优先或者保护农田,还是保护绿地预测情景,城镇化比例最高的前3位分别是市中心、区中心和轻轨,而城镇化比例最低的是普通公路。这也表明城市的发展往往会产生集聚的效应,集聚的中心点正是市中心和区中心等地方。在保护农田的模拟情景下,市中心和区中心缓冲距离内的城镇化比例增高,而在保护绿地的模拟情景下,其城镇化比例降幅相当明显。这表明在城镇内部绿地是往往是在城市用地的包围之下,如城市内部的公园和景区等。若城镇化过程中,绿地全部转变为城市用地会明显提高城镇用地比例,但也会造成城市绿化率低下这一问题。相对于区中心与市中心而言,高速、国道和省道的缓冲距离对城镇化的作用较少,但是它们对城市化的作用也是较为显著。在2 000 m缓冲区内,城市优先、保护农田和保护绿地的情景模拟结果中,城市化比例分别达到55.3%、55.2%和48.0%。

3 结 论

为了更好地理解佛山市的城镇化过程,本文利用逻辑回归的元胞自动机(CA)模型模拟并预测了佛山市的城市扩张过程。实验表明,佛山市的城市扩张主要是侵占了农田、森林和其它(包括果园和池塘等)。佛山市的城市扩张会变得更为集中,其最大斑块指数增大,而斑块数和斑块密度降低。CA模型的模拟总精度和Kappa系数达93.66%和0.86,表明模拟结果与实际情况比较吻合。通过情景分析可知,在城市优先发展情景下,农田有191 km²转变为城市用地,占有所有农田(706 km²)的27%,转换比例较大。在保护农田和保护绿地的情景下,农田和绿地可以得到较好的保护,但是城市扩张将会占用其它土地类型以解决城市扩张用地不足的问题。本文还发现各空间变量对城镇化的廊道作用有所不同,对城镇化比例贡献最高的前3位分别是市中心、区中心和轻轨,最低的是普通公路,表明城市的发展往往会产生集聚的效应,集聚的中心点正是市中心和区中心等地方。

本研究利用CA模型、转换矩阵和景观指数等分析方法分析城镇化过程,对分析其它城市的发展有着较好的借鉴意义。受到数据获取的制约,本文没有考虑自然方面的因素。因此下一步拟引入自然因素,更全面地分析城镇化过程。

参考文献:

- [1] 李强,陈宇琳,刘精明. 中国城镇化“推进模式”研究[J]. 中国社会科学, 2012(7): 82-100.
LI Q, CHEN Y L, LIU J M. On the “development mode” of Chinese urbanization [J]. Social Sciences in China, 2012(7): 82-100.
- [2] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130-1144.
FANG C L. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(8): 1130-1144.
- [3] 石忆邵. 中国新型城镇化与小城镇发展[J]. 经济地理, 2013, 33(7): 47-52.
SHI Y S. New-type urbanization and small town development in China [J]. Economic Geography, 2013, 33(7): 47-52.
- [4] 方创琳,李铭. 水资源约束下西北干旱区河西走廊城市化发展模式[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 825-832.
FANG C L, LI M. Urbanization mode with the restraint of water resource in Hexi Corridor arid area of Northwest China [J]. Geographical Research, 2004, 23(6): 825-832.
- [5] 姚士谋,陆大道,王聪,等. 中国城镇化需要综合性的科学思维——探索适应中国国情的城镇化方式[J]. 地理研究, 2011, 30(11): 1947-1955.
YAO S M, LU D D, WANG C, et al. Urbanization in China needs comprehensive scientific thinking: Exploration of the urbanization mode adapted to the special situation of China [J]. Geographical Research, 2011, 30(11): 1947-1955.
- [6] 朱天舒,秦晓微. 城镇化路径:转变土地利用方式的根本问题[J]. 地理科学, 2012, 32(11): 1348-1352.
ZHU T S, QIN X W. Urbanization path: the fundamental problem of changes in land use patterns [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(11): 1348-1352.
- [7] 李双成,赵志强,王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 63-70.
LI S C, ZHAO Z Q, WANG Y L. Urbanization process and effects of natural resource and environment in china: research trends and future directions [J]. Progress in Geography, 2009, 28(1): 63-70.
- [8] 冯云廷. 城市化过程中的城市聚集机制[J]. 经济地理, 2005, 25(6): 814-816.
FENG Y T. The study of the mechanism of urban agglomeration during urbanization [J]. Economic Geography, 2005, 25(6): 814-816.

- [9] 马丽,金凤君. 中国城市化发展的紧凑度评价分析[J]. 地理科学进展, 2011, 30(8): 1014-1020.
MA L, JIN F J. Evaluation of Chinese urban compactness[J]. Progress in Geography, 2011, 30(8): 1014-1020.
- [10] 张文忠,王传胜,吕昕,等. 珠江三角洲土地利用变化与工业化和城市化的耦合关系[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 677-685.
ZHANG W Z, WANG C S, LÜ X, et al. Coupling relationship between land use change and industrialization & urbanization in the Zhujiang River delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 677-685.
- [11] 高翔,鱼腾飞,程慧波. 西北地区水资源环境与城市化系统耦合的时空分异——以西陇海兰新经济带甘肃段为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 1010-1018.
GAO X, YU T F, CHENG H B. Temporal-spatial variation of systemic coupling between water resources and environment and urbanization in northwest China: a case study of Gansu section of Western Longhai-Lanxin Economic Zone[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(6): 1010-1018.
- [12] LIU X P, LI X, SHI X, et al. Simulating land-use dynamics under planning policies by integrating artificial immune systems with cellular automata[J]. International Journal Geographical Information Science, 2010, 24(5): 783-802.
- [13] 张亦汉,黎夏,刘小平,等. 基于数据同化的元胞自动机[J]. 遥感学报, 2011, 15(3): 475-491.
ZHANG Y H, LI X, LIU X P, et al. 2011. The CA model based on data assimilation[J]. Journal of Remote Sensing, 15(3): 475-491.
- [14] LIU X P, MA L, LI X, et al. Simulating urban growth by integrating landscape expansion index (LEI) and cellular automata[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(1): 148-163.
- [15] HE C Y, OKADA N, ZHANG Q F, et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China[J]. Applied Geography, 2006, 26(3): 323-345.
- [16] SHI W Z, PANG M Y C. Development of Voronoi-based cellular automata-an integrated dynamic model for geographical information systems[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14(5): 455-474.
- [17] LI X, YE H A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple landuse changes using GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(4): 323-343.
- [18] LIU X P, LI X, LIU L, et al. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22(11): 1247-1269.
- [19] 张亦汉,乔纪纲,艾彬. 基于集合卡尔曼滤波动态优化CA模型参数的方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 123-130.
ZHANG Y H, QIAO J G, AI B. Parameter optimization for ca model using ensemble kalman filter[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 123-130.
- [20] 杨青生. 地理元胞自动机及空间动态转换规则的获取[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 122-127.
YANG Q S. Dynamic transition rules for geographical cellular automata[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(4): 122-127.
- [21] LI X, YE H A G O. Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1501-1518.