

基于CA模型旅游小镇增长的时空模拟与应用 ——以河北三坡镇为例

杨 俊^{1,2}, 席建超¹, 解 鹏², 葛全胜¹, 李雪铭², 高 航²

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2.自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室, 大连 116029)

摘要: 旅游小镇增长的时空模拟是城镇化影响下的土地利用/覆盖变化研究的重要手段。近年来旅游小镇的城镇化以其旅游业发展带动城镇发展的独特模式引起国内外学者的高度关注。论文以元胞自动机模型为基础, 运用旅游小镇旅游城镇化增长模型, 对河北省三坡镇旅游城镇化发展进行模拟与预测。模拟结果显示: ① 2005-2010年研究区城镇增长主要围绕现有镇区范围扩展, 全域年均增速为 $0.015 \text{ km}^2/\text{年}$; ② 2010-2015年主要城镇增长区位于镇内距离景区较近的苟各庄村附近, 全域年均增速为 $0.040 \text{ km}^2/\text{年}$, 其他区域则保持相对较为平稳的状态。研究表明元胞自动机模型在模拟旅游小镇演化具有较高的可靠性, 为研究城镇化条件下区域生态景观格局变化提供前提保证, 对于提高土地资源利用效率, 保障小镇健康有序发展具有十分重要的意义。

关键词: 旅游小镇; CA模型; 城镇化增长模型; 三坡镇

1 前言

旅游小镇是近年旅游业发展的重要热点和乡村城镇化的重要方向之一, 如何实现合理利用旅游资源, 实现旅游小镇的可持续发展, 成为众多学者研究的重心^[1, 2]。这些研究主要集中在定性的分析各因素对于旅游小镇可持续发展起到的作用, 很难客观的预测旅游小镇未来的发展状况。因此有效的模拟旅游小镇的发展趋势, 进而提出合理的发展规划具有十分重要的意义。

元胞自动机(CA)最初是20世纪40年代, 在著名的“曼哈顿工程”开展过程中, Von Neumann受数学家兼物理学家S. Ulam思想的启发开始形成的。元胞自动机定义为一个离散的动力学模型, 个体之间局部的行为, 演化出全局在时间与空间上的变化。Wolfram^[3]对CA的早期研究起到了巨大的推动作用, 奠定了元胞自动机的理论基础。由于CA模型具有强大的空间运算能力, 可以通过简单的局部运算形成复杂的、全局的模式。CA已经成功的应用到环境变化、景观格局更替、林火扩散和城市扩展等模拟研究中, 取得了许多有意义的成果^[4-11]。

在城市地理学方面, 元胞自动机得到了众多学者的关注。Tobler^[12]首次将元胞空间模

收稿日期: 2012-08-22; 修订日期: 2013-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971299, 41171137); 教育部人文社科项目(09YJC790135)。

作者简介: 杨俊(1978-), 男, 湖北孝昌, 博士, 副教授, 主要从事区域地表过程、城市人居环境与地理信息系统应用。E-mail: lnu_hsrc@126.com

通讯作者: 席建超(1972-), 男, 河南确山人, 博士, 副研究员, 主要从事旅游环境效应, 区域旅游发展规划等方面研究。E-mail: xijc@igsrr.ac.cn

型应用于地理过程; Batty 等对于元胞自动机应用于城市系统模拟做了先驱工作^[13], 推动元胞自动机在城市扩展邻域的研究; White 与 Engelen 将 CA 动力模型与 GIS 技术相结合, 研究出一种用于城市动态模拟的模型^[14]。国内较早研究元胞自动机的有陈彦光和周一星^[15]等, 详细阐述了元胞自动机模型的原理、潜在问题以及研究意义; 黎夏与叶嘉安将约束性元胞自动机应用于可持续城市发展形态的模拟^[16]。这些研究对元胞自动机理论在中国的发展与应用起到了巨大推进作用。

近年来在计算机技术进步的推动下, 城市元胞自动机模型取得了许多新的进展。Lauf 研究了一个改进的细胞自动机模型, 通过集成系统动力学将家庭因子和住房因子作为驱动力探讨住宅建设用地扩展^[17]; García 利用多种方法对比分析了西班牙北部城市加利西亚的城市扩展情况^[18]; Mitsova 利用基于土地利用变化的元胞自动机进行了城市扩展同时对敏感区域保护的研究^[19]; 黎夏等结合神经网络理论、数据挖掘理论以及遗传算法理论, 改进元胞自动机转换则的获取方法, 提高了模型的模拟精度^[20]; 张鸿辉对 CA 的发展做了详细的回顾, 并设计研究一种基于多智能体的 CA 模型, 取得了有意义的成果^[21]。

本文利用元胞自动机模型模拟预测旅游小镇的发展趋势。将元胞自动机原理运用到旅游型小镇的城镇化发展模拟中, 根据旅游小镇对于旅游资源的开发与保护的特殊要求, 适当选取了若干适宜性要素和限制性要素, 扩充传统元胞自动机的参数体系, 建立旅游城镇型 CA 模型, 利用该模型模拟三坡镇 2010-2015 年的发展状况。

2 模型结构与研究方法

2.1 旅游型 CA 模型框架

旅游城镇化是一个十分复杂的过程。要模拟旅游城镇化时空演化, 必须研究旅游城镇化的驱动因子以及旅游城镇化演变综合机理。首先对研究区旅游业进行考察, 详细分析研究区旅游业的类型, 明确主要旅游产业链条的发展状况。其次从三坡镇收集历年的土地利用数据、地形图、遥感以及经济社会相关统计数据, 通过研究区多源数据的融合与调查数据整理, 运用 GIS 强大空间分析与统计功能, 结合层次分析法研究旅游城镇化与各驱动因子之间的相互关系。在此基础上运用元胞自动机与城镇化增长模型, 以 ArcGIS 软件为算法平台, 通过 Python 语言编程实现旅游小镇的空间增长模拟模型。系统架构图如图 1 所示。

2.2 模型结构与指标体系

模型结构以栅格数据为基础, 采用 ArcGIS 使用的 GRID 栅格数据编码格式。模型的元胞空间覆盖整个研究区域, 采用 25 m × 25 m 网格。为实现多元数据共享, 模型系统采用 WGS84 坐标系统。元胞状态空间分为三种, 分别是城镇用地、可城镇化用地和不可城镇化用地。其中城镇用地有三坡镇土地部门提供, 不可城镇化用地则是根据保护区以及地形等约束条件确定。

驱动因子组数据作为元胞模型外部环境信息, 直接影响与控制旅游城镇化的演化。旅游城镇化是个复杂的过程, 影响因子很多。通过对旅游业以及城镇化综合机理的分析, 确定旅游城镇化的三大因子组, 并运用层次分析法确定各个驱动因子的权系数见表 1, 空间数据处理结果如图 1。同时为了实现可持续发展, 有效地保护旅游资源, 将自然保护区列入空间限制因子, 凡受空间限制因子影像的元胞将不得发展为城镇。

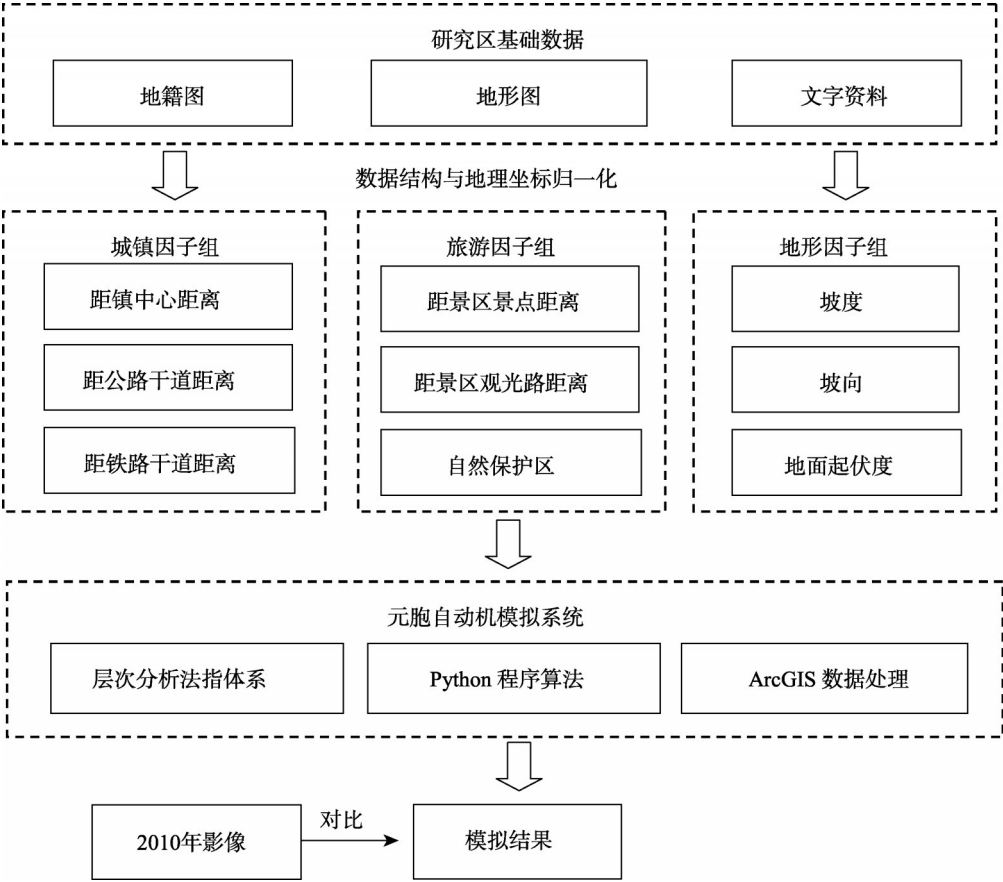


图1 基于元胞自动机的旅游城镇化模拟系统框架图

Fig. 1 Method framework of tourism urbanization simulation based on cellular automata model

2.3 邻域结构与转换规则

旅游城镇化元胞自动机系统中，研究区地处山地，地形条件复杂，主要考虑两种城镇化演化动力，一是受地形条件影响，山谷河道两侧地势较平缓且一般有交通干道通过，适宜城镇发展；二是受旅游因子影响，距离旅游景点较近同时又在景点保护安全距离之外的地方容易发展为城镇。

2.3.1 邻域城镇化函数

表示当前的元胞邻域范围内城镇化程度的函数，使用邻域范围内已经城镇化的元胞比例表示，其公式如下：

$$P_{(x,y)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{\Omega} X_{(i,j)} \tag{1}$$

式中： $P_{(x,y)}$ 表示邻域空间内已经城镇化的元胞所占百分比； N 表示邻域空间内的元胞个数； $X_{(i,j)}$ 表示城镇化元胞； Ω 表示邻域空间。

2.3.1 元胞转换概率

表示当前元胞转换的费用值，是前面三大影响因子组以及邻域城镇化函数的综合值，

表 1 旅游城镇化空间驱动因子和权重

Tab. 1 Driving factors and its weights of tourism urbanization

影响因子	变量类型	权重系数	变量分级
基础地理因子	距离镇中心距离	4	1级 0~500m
			2级 501~1000m
			3级 1001~3000m
			4级 >3000m
	距离主干道距离	4	1级 0~100m
			2级 101~500m
			3级 501~1000m
			4级 >1000m
旅游地理因子	距离铁路距离	2	1级 0~100m
			2级 101~500m
			3级 501~1000m
			4级 >1000m
	距离景区步行游览路距离	3	1级 0~100m
			2级 101~300m
			3级 301~600m
			4级 >600m
	距离景源距离	3	1级 0~500m
			2级 501~1000m
			3级 1001~2000m
			4级 >2000m
地形因子	坡度	4	1级 <5度
			2级 6度~10度
			3级 11度~15度
			4级 16度~20度
			5级 21度~25度
			6级 >25度
	坡向	1	1级 -45度~45度
			2级 45度~135度
			2级 135度~225度
			3级 225度~315度
	地面起伏度	2	1级 <10
			2级 10~20
			3级 20~30
			4级 30~40
			5级 >40

其公式如下：

$$p'_{ij} = \varphi(r'_{ij}) = \exp \left[\alpha \left(\frac{r'_{ij}}{r_{\max}} - 1 \right) \right]$$

(2)

式中：α 为扩散系数； r_{\max} 为最高属性值； r'_{ij} 的简单表达式为：

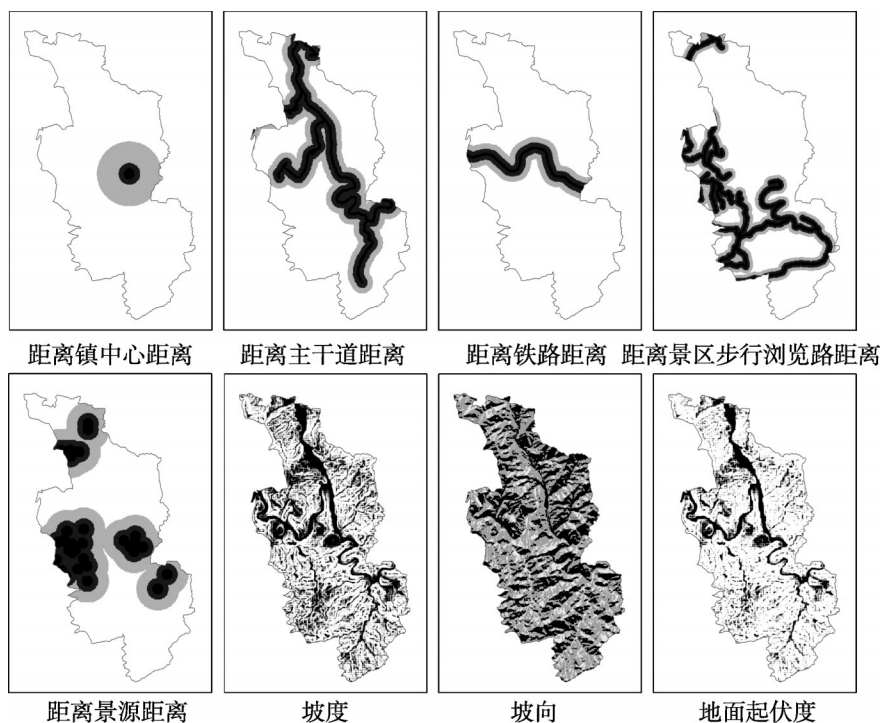


图2 旅游城镇化空间驱动因子

Fig. 2 Driving factors of tourism urbanization

$$r_{ij}^t = \left(\sum_{k=1}^m F_{ijk}^t W_k \right) \prod_{k=m+1}^n F_{ijk}^t \quad (3)$$

式中: 当 $1 \leq k \leq m$ 为旅游城镇化驱动因子即表1所列因子, 当 $m < k$ 表示空间限制性因子, 此处指自然保护区和河流, 其发展为城镇的概率为0。

CA模拟是由多次循环完成的, 为了表达旅游城镇化的不确定性, 在循环中需要加入发展为城镇用地的概率 p_{ij}^t 与预先给定的阈值 $p_{threshold}$ 进行比较, 以确定当前元胞是否可以发展为城镇, 即

$$\begin{cases} p_{ij}^t \geq p_{threshold} & \text{转变为城镇用地} \\ p_{ij}^t < p_{threshold} & \text{不转变为城镇用地} \end{cases} \quad (4)$$

2.4 研究区概况

三坡镇位于河北省保定市涞水县城西北28 km的太行山区, 属国家级自然风景名胜区, 东距北京200 km, 东南距天津、廊坊市250 km, 南距保定、石家庄分别为200到300 km, 有明显的区位优势。全镇总面积200 km², 海拔180~1500 m, 总人口11887人。京原铁路、保野和108国道公路穿镇而过。三坡镇因野三坡而设置, 是野三坡旅游区的重要组成部分和核心区域。自1986年野三坡发展旅游业以来, 三坡镇也逐渐由一个普通的乡镇演变成一个特色旅游小镇。25年的发展, 使其旅游业发展演变有清晰的时间线索和空间脉络, 在国内乡村旅游发展具有典型性和代表性。

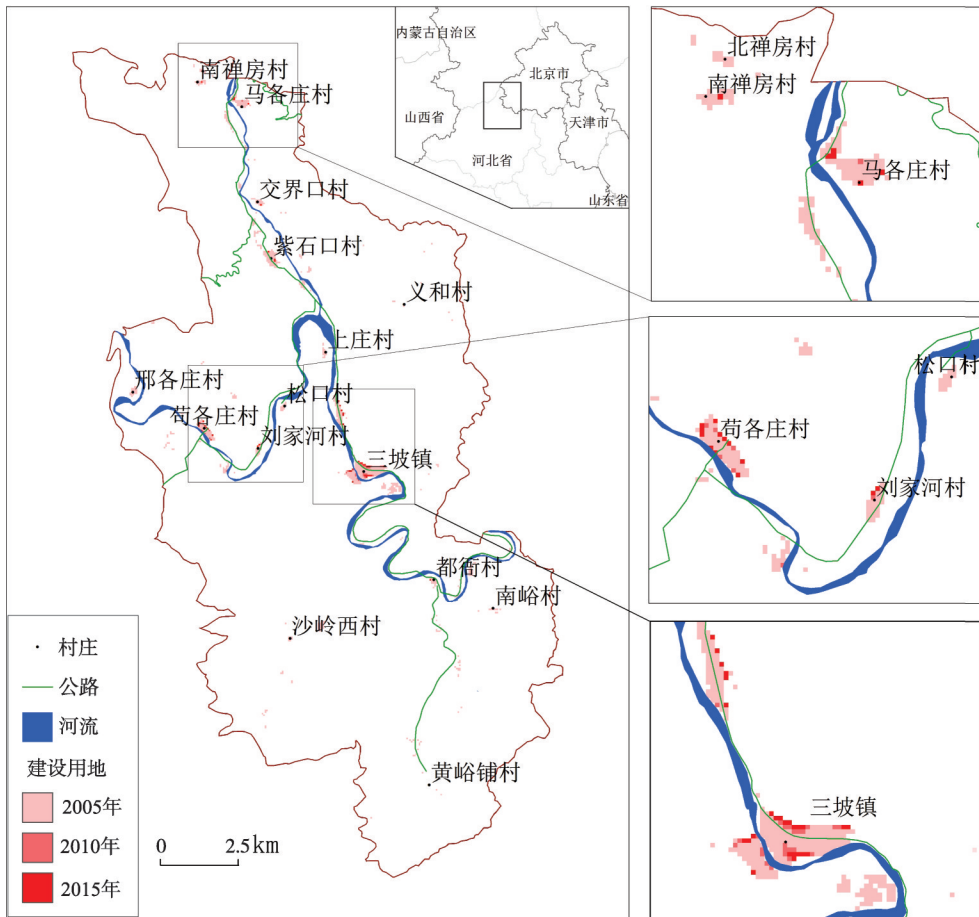


图3 三坡镇旅游城镇化模拟结果

Fig. 3 The tourism urbanization simulation result of the Sanpo Town

3 结果与分析

根据以上模型及方法,对三坡镇旅游城镇化进行元胞自动机动态模拟,其结果如图3,表示2010年和2015年模拟城镇用地情况。

模拟结果显示:研究区由于处于河流中游南北两岸的深山地域,城镇规模增长的总体态势是依托原有块状村镇,在城镇周围的地势平坦区发展。在研究时间范围内,各个村镇仍然未发展为成片的城镇景观,依旧保持独立分散的地理格局。下面就时间和空间格局变化两个方面来具体分析三坡镇地区的城镇增长的特点及其驱动机制。

从时间尺度来看,不同时间段城镇发展速度存在着差异。2005-2010年城镇用地实际增加 0.075 km^2 ,平均增加速度为 $0.015 \text{ km}^2/\text{年}$ 。2010-2015年城镇用地预计增加 0.200 km^2 ,平均增加速度为 $0.040 \text{ km}^2/\text{年}$ 。其中,2005-2010年城镇增长主要集中在中部镇中心附近地区,以 $0.010 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度扩张,区内其他地区城镇增长速度缓慢。原因是主要依托于野山坡国家级风景名胜区的三坡镇中心城区,在城镇发展的初期占据大部分的发展政策和资金的支持,同时也是要适应当地旅游业发展的需求,而旅游产业的发展,反过来也加快了城镇化的进程。2010年后全镇城镇化现象普遍加速,中部镇中心地区城镇化

速度依然最高,以 $0.013\text{ km}^2/\text{年}$ 的速度增长。镇内西部地区苟各庄村快速发展,新增建设用地速度达 $0.011\text{ km}^2/\text{年}$,则是由于随着经济的发展和旅游业发展的进一步需求,中心城区继续面临发展的需求,但是将会遇到与景区可持续发展相悖的矛盾以及用地的限制。而其他村镇如图3中苟各庄和马各庄村在这段时期将借助于一定的资源和资金的支撑表现出旅游业的发展潜力。可以预见,如果把预测的时间段继续拉长,这些村镇的增长速度势必会超过中心城镇的速度。

从空间格局来分析,三坡镇地区城镇发生增长的区域大致可以分为三个部分(图3右侧图),第一个部分是由南、北禅房村和马各庄村组成的北部区域;第二部分是主要包括苟各庄村的西部区域;第三部分则是三坡镇所在的中心城区。其中,中心城区原有城区面积最大,在模拟时间段内增长的速度也最快,说明中心城区不仅是全镇的政治、经济和文化中心,还承担着野三坡风景名胜区旅游服务基地的职能,不光吸引了周围村镇人口前来就业居住,同时也要承接因产业发展产生的寄住人口,从而发展较为迅速。而西部的苟各庄村,是该镇西部重要的中心村,京原铁路在此设有站点,同时也对周围基层村有着辐射带动作用,旅游商贸和旅游服务业在此村的发展有着得天独厚的优势。另外,马各庄村是人口规模最大的基层村,随着该村经济的带动发展,势必也会引起城市规模的增长。就城镇增长的方向而言,大多还是呈现边缘扩张的模式,而且可以发现,有交通线经过的城镇边缘地区,城镇增长的速度更快,越是靠近旅游景点的区域,城镇化速度也越快。城镇规模的扩张具有明显的交通和旅游产业的趋向性。

由此总结三坡镇地区城镇增长呈现的主要特征为:①不同阶段城镇土地利用呈现非线性增长的特点,尽管城镇增长受到社会宏观经济因素的影响,但是中国新型城镇增长过程都受到国家土地政策和区域战略规划的影响更为深远;②城镇扩张呈现边缘扩张的增长模式,但是受到地形与交通因素的影响,城镇边界有交通经过的区域城镇化速度明显快于其他地区;③在旅游产业带动下,镇内城镇用地发展向旅游产业聚集区倾斜,体现出明显的旅游因素向导效应。景点附近地区城镇化现象较明显,但在合理开发利用旅游资源的政策条件下,景点附近的城镇化现象并未出现短时间内暴增的现象,主要的城镇用地增长依然集中在老城区附近。

4 结论与讨论

论文利用元胞自动机原理与GIS技术相结合,通过建立旅游型城镇扩展模型,利用2005年和2010年三坡镇地区土地利用数据,模拟了在旅游因素驱动条件下的城镇增长过程,结论如下:

(1) 利用GIS技术,结合元胞自动机系统理论进行旅游城镇化预测分析,是行之有效的方法。能够很好的反映出旅游作用因素在地区城镇化中所起的作用,并能直观的预测城镇未来的发展趋势,在解决旅游城镇化问题上具有较高的可靠性。

(2) 通过数据与模型的综合分析发现,三坡镇地区在2005年以来受到自然环境、人口增长、经济发展、国家政策等复杂因素影响。城镇增长速度逐年加快,并呈现出区域差异性,在空间格局上与距离城镇中心、交通线路、景点等因素的欧式距离,具有高度相关性。

(3) 由于三坡镇地区地形条件复杂且以旅游为主导产业,在城镇增长过程中,旅游景

区的周边城镇增长速度相对较缓,起到了合理开发利用旅游资源的目的。

由于城镇化过程是一个受到社会人文经济、国家经济政策等多因素影响的复杂地理过程,同时元胞自动机仍处在研究发展阶段,本身亦有许多不足^[22, 23]。因此,精确地模拟与预测城镇增长过程十分困难。本研究基于元胞自动机模型,在微观尺度条件下模拟旅游城镇增长过程,取得了一些初步结果,受到基础数据的限制,本研究模拟精度仍有提高空间。旅游城镇化CA模拟系统的研究还有待进一步深化与完善。

参考文献(References)

- [1] 王兆峰, 余含. 张家界旅游产业发展与小城镇建设耦合发展研究. 经济地理. 2012, 32(7): 165-171.
- [2] 陆林, 葛敬炳. 旅游城市化研究进展及启示. 地理研究. 2006, 25(4): 741-750.
- [3] Wolfram S. Universality and complexity in cellular automata. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1984, 10(1-2): 1-35.
- [4] Yu H, He Z, Pan X. Wetlands shrink simulation using Cellular Automata: A case study in Sanjiang Plain, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(0): 225-233.
- [5] Spicer V, Reid A A, Ginther J et al. Bars on blocks: A cellular automata model of crime and liquor licensed establishment density. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012, 36(5): 412-422.
- [6] Rasmussen R, Hamilton G. An approximate Bayesian computation approach for estimating parameters of complex environmental processes in a cellular automata. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 29(1): 1-10.
- [7] Kokubo S, Tanimoto J, Hagishima A. A new cellular automata model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2011, 390(4): 561-568.
- [8] Dabbaghian V, Spicer V, Singh S K et al. The social impact in a high-risk community: A cellular automata model. *Journal of Computational Science*, 2011, 2(3): 238-246.
- [9] Afshar M H, Shahidi M, Rohani M et al. Application of cellular automata to sewer network optimization problems. *Scientia Iranica*. 2011, 18(3): 304-312.
- [10] Dabbaghian V, Spicer V, Singh S K et al. The social impact in a high-risk community: A cellular automata model. *Journal of Computational Science*. 2011, 2(3): 238-246.
- [11] L A Rraga M E, Alvarez-Icaza L. Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(23): 5425-5438.
- [12] Tobler W. Cellular geography. *Philosophy in Geography*. 1979, 9: 379-386.
- [13] Batty, M., Xie, Y. From cells to cities. *Environ. Plann. B: Plann. Design*, 1994, 21: 31.
- [14] White R, Engelen G. Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity. *Geographical Systems*, 1994, 1(3): 237-253.
- [15] Zhou Y, Chen Y. Cellular automata and simulation of spatial complexity of urban systems: History, present situation and future. *Economic Geography*, 2000, (3): 35-39.
- [16] Li X, Ye J. Constrained cellular automata for modelling sustainable urban forms. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 3-12.
- [17] Lauf S, Haase D, Hostert P et al. Uncovering land-use dynamics driven by human decision-making: A combined model approach using cellular automata and system dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 27-28: 71-82.
- [18] García A M, Santé I, Boullón M et al. A comparative analysis of cellular automata models for simulation of small urban areas in Galicia, NW Spain. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012, 36(4): 291-301.
- [19] Mitsova D, Shuster W, Wang X. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(2): 141-153.
- [20] 黎夏, 叶嘉安. 遗传算法和GIS结合进行空间优化决策. *地理学报*, 2004, 59(5): 745-753.
- [21] 张鸿辉. 多智能体城市规划空间决策模型及其应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [22] 刘继生, 陈彦光. 基于GIS的细胞自动机模型与人地关系的复杂性探讨. *地理研究*, 2002, 21(2): 155-162.
- [23] Torrens P M, O'Sullivan D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28(2): 163-168.

Spatio-temporal simulation and application of the tourist town growth based on cellular automaton model: A case study of Sanpo Town in Hebei Province

YANG Jun^{1,2}, XI Jianchao¹, XIE Peng², GE Quansheng¹, LI Xueming², GAO Hang²

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

2. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: A spatio-temporal simulation is an important approach to analyzing land use/cover change influenced by urbanization. Many scholars have shown great interests in the unique development pattern of small town induced by tourism. Based on the cellular automaton (CA) model, the spatio-temporal growth of Sanpo town in Hebei province, China was simulated and predicted, using the tourism urbanization growth model. It showed that the great changed happened in the old town district from 2005 to 2010, and with the annual average growth of 0.015 km² per year; The large growth from 2010 to 2015 will happen in Gougezhuang Village, an important village of Sanpo town close to the tourist attraction, and the annual average growth of the whole area would be 0.040 km² per year. The results showed that cellular automata (CA) model had high reliability in reflecting the spatio-temporal evolution of a tourist town, which contributed to understand the process of urbanization induced by tourism, increase the use efficiency of land and protect the healthy and orderly development of towns.

Key words: small tourism-town; cellular automaton model; growth model of urbanization; Sanpo Town