

# 中心城区城市增长的情景模拟与空间格局演化 ——以福建省泉州市为例

吴 巍<sup>1</sup>, 周生路<sup>1</sup>, 魏也华<sup>2</sup>, 刘克华<sup>3</sup>, 陈江龙<sup>4</sup>, 管卫华<sup>5</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2. 美国犹他大学地理系, 盐湖城 84102;  
3. 泉州市城乡规划局, 泉州 362017; 4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;  
5. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046)

**摘要:** 基于1993-2008年间4个时相的遥感影像, 应用SLEUTH模型模拟与预测自组织和规划引导两类情景下泉州中心城区的城市用地增长过程, 并借助空间关联法分析其城市增长的空间格局演化特征, 为“两规”空间协调提供科学依据。结果表明: ① SLEUTH模型适用于研究区的城市增长模拟与预测, 其对城市用地扩展的数量拟合要优于空间匹配, 可作为多方案情景模拟的一个技术手段。② 规划引导预案的MPS、ED、AWMSI、MPI四类景观指数均优于自组织预案, 城市用地斑块的整体性、连接性较优, 未来城市发展较为紧凑, 利于实现土地的集约利用与城市的集聚发展。③ 随预测时间推移, 研究区城市用地扩展的速率以及空间集聚性将有所减弱, 城市增长的热点区也会发生演变与迁移。2008-2020年, 热点区分布总体呈现“圈层式”结构, 局部以“跨江发展”为主要特征; 2020-2030年, 热点区总体布局较为发散, 局部则呈“环湾发展”与“孤立分布”特征。本研究将情景模拟、景观指数、空间分析等方法有效结合, 有助于深刻理解研究区的城市空间增长过程, 可为城市管理工作提供决策支持。

**关键词:** 中心城区; 城市增长; 热点区; SLEUTH模型; 空间关联; 泉州

DOI: 10.11821/dlyj201311007

## 1 引言

自1972年斯德哥尔摩人类环境保护会议召开以来, 土地利用/覆盖变化(LUCC)已逐渐成为全球环境变化研究的一个热点问题。其中, 城市增长及其土地利用变化是LUCC研究的重要内容之一, 并随着GIS与遥感技术的发展引起了21世纪学术界的广泛关注<sup>[1,2]</sup>, 其研究内容主要集中于历史年份城市增长与土地利用变化的特征与模式, 城市用地扩展的驱动机制与生态环境效应, 以及城市增长的时空模拟与预测等科学问题的探索。国外近期研究如Rawashdeh和Saleh运用遥感与GIS技术对约旦首都安曼的城市用地扩展进行监测, 并讨论了优质农地损失可能带来的环境影响<sup>[3]</sup>。Han等总结了快速城市化背景下上海市的土地利用变化模式, 并利用多元回归模型系统分析了城市增长的社会经济与自然环境驱动因素<sup>[4]</sup>。Luo和Wei采用全局与局部回归模型, 从邻近因子与领域因素两方面选取多

收稿日期: 2012-06-03; 修订日期: 2013-04-08

基金项目: 福建省泉州市“十二五”规划项目

作者简介: 吴巍(1986-), 江西高安人, 博士生, 主要从事GIS、城市地理和土地利用规划研究。

E-mail: wuweiaslm@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 周生路, 教授, 博士生导师。E-mail: zhoussl@nju.edu.cn

2041-2054 页

个空间变量拟合城市用地转换概率,以揭示南京市城市用地扩展的驱动机制,发现基于地理加权的局部回归模型具有更好的解释能力,能够反应各驱动因子对城市增长的影响在空间上的变化关系<sup>[5]</sup>。Jantz等借助元胞自动机模型构建了一个针对城市区域的大尺度的城市增长与土地利用变化模拟系统,并设置不同情景对美国东部切萨皮克湾流域地区的城市空间增长过程进行了时空模拟与预测<sup>[6]</sup>。如上所述,国外关于城市增长的已有文献研究视角多样、内容丰富、案例众多,分析较为系统深刻,方法体系不断趋于成熟,且越来越多的国外学者开始关注中国的城市化问题,这些都可作为国内开展城市空间增长研究提供思路与方法、理论与实践上的参考。

近30年来,中国社会经济发生了剧烈变化,快速的城市化步伐与工业化进程中伴随着显著的土地利用变化,大量农用地尤其是优质耕地被侵占,导致了一系列生态环境问题的产生<sup>[7,8]</sup>,在此背景下开展城市用地增长的研究尤为必要。目前,国内关于城市增长的研究方兴未艾,成果主要集中于两类尺度:第一,区域层面的城市群用地扩展研究。如李加林<sup>[9]</sup>、王磊<sup>[10]</sup>等详细分析了长三角地区历史年份城市用地扩展的时空演变特征;张落成<sup>[11]</sup>、刘登娥<sup>[12]</sup>则分别对近20-30年来苏南地区城市用地扩展的特点与问题,城市增长的形态过程与聚散规律进行了深入的阐述。第二,市域层面单个城市的实证研究。这些研究以东中部特大城市为主,西部欠发达城市为辅;以平原地区城市为主,山地丘陵城市为辅<sup>[13-15]</sup>。以上研究深刻地揭示了国内各城市的空间扩展及其土地利用变化的模式与机制,但是,当前研究过于关注大、中尺度的城市空间增长,城市区域以及大、中城市的用地扩展问题得到足够重视,而对小尺度城市尤其是人口、资本、产业高度集聚的中心城区的城市增长研究却有所忽视。中心城区作为城市发展的核心区域,社会经济发达,城镇用地密集,土地资源紧缺,是各空间规划关注的重点区域,其城市扩展方向与城镇用地布局是城市发展进程中亟需重视的关键问题之一。然而,由于各部门条块分割、各自为政,导致中心城区的空间规划体系普遍存在目标矛盾、用地冲突、内容缺位等问题,其中最为核心的问题表现为城市总体规划与土地利用总体规划间的“两规”冲突<sup>[16]</sup>。在此背景下,开展中心城区城市增长的模拟与预测研究是寻求“两规”空间协调的重要尝试,有利于掌握未来城市用地扩展特征与趋势,同时可有效探索城市发展路径并协调建设与保护问题。

元胞自动机(Cellular Automaton, CA)作为一种微观时空模拟的方法,因其规则简单以及在模拟地理实体空间演化过程中的优势,广泛应用于城市增长领域,并随着与Logistic<sup>[17]</sup>、人工神经网络<sup>[18]</sup>等传统方法的结合而得到较快的发展,这为城市增长的时空模拟与预测提供了契机。目前CA模型在城市增长模拟应用研究中主要存在两方面的缺陷:第一,不同城市的发展模式与驱动机制差异显著,受制于数据要求、校准方法以及应用尺度,多数CA模型很难进行移植,不具有普适性<sup>[19]</sup>。第二,国内城市大多具备突变式发展特点,多数研究过于关注模型构建细节,缺乏对政策、规划等人文因素的考虑,并忽视对城市增长预测结果的深入分析与应用讨论。比较而言,SLEUTH元胞自动机模型具有较强的普适性,在国内外的一些城市如旧金山<sup>[20]</sup>、华盛顿都市区<sup>[21]</sup>、杭州<sup>[22]</sup>等都取得了成功的应用;同时该模型也具备兼容性特点,既能够较好地描述城市的自然增长规律,又可适当考虑政策规划、生态保护等人为因素,具有较强的预期性与实用性。本研究以福建省泉州市中心城区为例,利用遥感和GIS技术获取历史年份的城市扩展数据,应用SLEUTH模型对其未来城市增长过程进行情景模拟并利用景观指数优选城市发展情景,借助空间关联法

定量分析预测年份研究区城市空间扩展的格局演化特征，以期为类似中心城区城市增长管理和空间规划协调提供有益借鉴。

2 研究区域与数据处理

2.1 研究区概况

泉州市地处闽东南沿海丘陵地区，是福建省三大中心城市之一，是海峡西岸经济区的重要组成部分。改革开放以来，凭借着侨乡优势和勇于创新的精神，泉州以民营经济为基础，创造出了以“泉州模式”为特色、充满活力的发展道路，县域“诸侯经济”经济发达，品牌化优势突出。与各县域城市对比，泉州中心城区体量过小，经济活跃度相对较低，总体呈现“小马拉大车”局面，难以发挥聚集、辐射与带动作用。2008年，泉州市地区生产总值达2705.29亿，其中市辖三区（鲤城、丰泽、洛江）总和仅占16.82%，而周边县域如晋江所占比例却高达25.79%（2009年泉州市统计年鉴）。泉州城市管理部门已正确意识到中心城区的狭小与弱势问题，为实现把泉州建设成为海峡西岸经济区中心城市的总体目标，亟需在延续县域经济发达的基础上，做大做强中心城区，以发挥其凝聚与先导作用，从而带动大泉州的建设与繁荣。为此，新一轮《泉州城市总体规划2008-2030年》对原中心城区范围（450 km<sup>2</sup>）进行了扩大，将周边县域部分城镇尤其是环泉州湾区域划入新中心城区规划范围，拉大了城市的发展框架（图1）。调整后的泉州中心城区由多个行政单元组成，包括市辖三区（鲤城、丰泽、洛江）以及晋江市、石狮市、南安市、惠安县的部分区域，总面积为980 km<sup>2</sup>。研究区生态基底由“一湾两江多山”构成。“一湾”指泉州湾，“两江”则为与泉州湾相接的晋江与洛阳江。尽管新版城市规划确定了中心城区

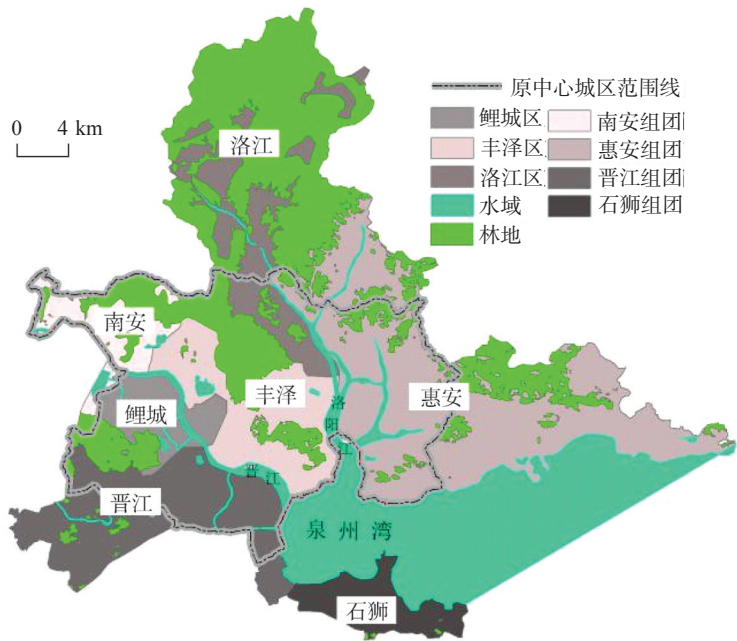


图1 泉州新中心城区规划示意图

Fig. 1 Map showing the new planning of Quanzhou central city

“东进、南下、北优、西控”的发展思路，但其规划年份的用地需求却远不能由近年编制实施的土地利用总体规划所确定的刚性控制指标满足，“两规”在建设用地的指标控制与空间布局等方面存在冲突，城市发展的重心尚未明晰。因此，本文基于SLEUTH模型的城市增长情景模拟研究，对刚拉大发展框架的泉州中心城区而言，具有现实意义。

2.2 研究方法与技术流程

SLEUTH模型是基于元胞自动机的城市增长模型和土地利用变化模型的集成模型，其在城市增长模拟预测中主要是依据城市的历史空间扩展过程，充分考虑地形坡度、景观覆被、交通网络、城镇分布以及随机因子等因素对未来的城市发展进行预测<sup>[23, 24]</sup>。SLEUTH模型具备兼容性特征，还可综合考虑政策、规划等人文因素<sup>[19]</sup>，通过设置不同情景方案模拟未来可能的城市空间增长过程。1992年以来国内兴起的各类开发区、新区建设热潮使得国内城市普遍具备突变式发展特征，SLEUTH模型的兼容性特点使其在模拟城市突变等复杂动态过程方面存在优势，在土地利用变化剧烈的发展中国家具有较强的适用性。SLEUTH模型运行分为数据准备、多重校准、模型预测3个阶段，通过对历史城市扩展数据反复训练得到的5类参数（散布系数、繁殖系数、扩展系数、坡度系数、道路引力系数）模拟城市的4种增长方式（自发增长、新扩展中心增长、边缘增长与道路引力增长），并通过自修改规则自动调整参数以鼓励或抑制城市扩展，能有效地模拟城市沿“S”型曲线的增长。SLEUTH模型集成了城市增长子模型和土地利用/覆盖 Deltatron 子模型，其中城市增长子模型可单独运行。当进行城市用地扩展模拟时，只需激活城市增长子模型，毋需输入土地利用图层。具体研究技术流程见图2。

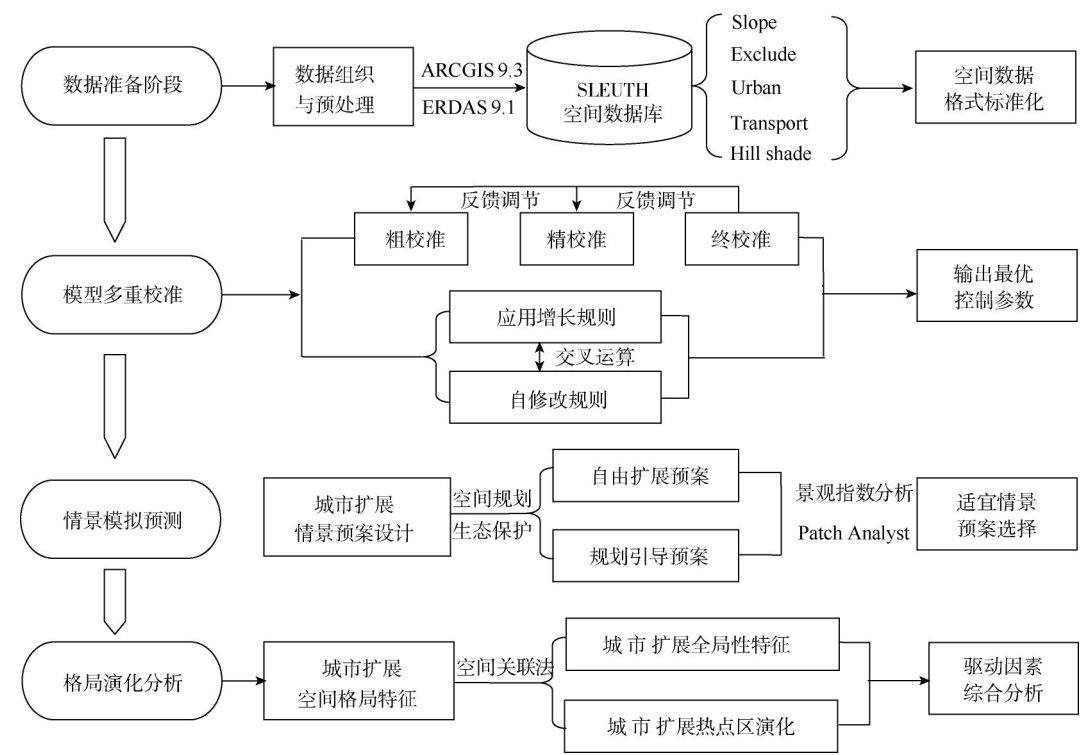


图2 基于SLEUTH模型的研究技术路线图

Fig. 2 Research technology roadmap based on the SLEUTH model



2.3 数据来源与处理

数据源包括覆盖泉州市域的 1993 年、2001 年、2004 年的 Landsat TM 和经条带修复后 2008 年的 ETM+ 30m × 30m 的遥感影像、DEM(25m)、2008 年泉州中心城区土地利用现状图、泉州市 2008-2030 年城市总体规划图与 2008-2020 年交通规划图、泉州市及所辖市县（晋江、石狮、南安、惠安）2006-2020 年土地利用总体规划图、泉州市行政区划图以及其他社会经济统计数据。具体处理过程为：① 在 ERDAS 9.1 图像处理系统下，对 4 个时相的遥感影像进行预处理，经几何校正、辐射校正、边界裁剪后，采用监督分类法中的最大似然法并结合人机交互目视解译，提取泉州中心城区对应年份的城市范围图层（Urban）。② 据 2020 年交通规划图中现状与规划道路图层，对照各时相的遥感影像生成对应年份以及 2020 年泉州中心城区的交通图层（Transport），针对不同道路等级赋予相应权重值。③ 在 ArcGIS 9.3 中，将泉州市 DEM 经边界裁剪后计算，得到中心城区的坡度图层（Slope）和阴影图层（Hill shade）。④ 在模型多重校准阶段，排除层（Exclude）的设置参考了 1993 年的 TM 影像，对水域、敏感性生态用地以及高坡度区域排除其城市化的可能性。所有栅格、矢量数据均通用横轴墨卡托投影，统一投影至 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N 坐标系中。

3 研究区城市增长情景模拟与预测

3.1 模型校准与适用性评价

校准阶段是 SLEUTH 模型运行和预测的关键，决定了模拟的精度与科学性。在模型校准过程中，模型系数最佳取值范围和最佳预测系数值的确定采用强力校正方法(brute force)<sup>[25]</sup>，即利用计算机反复计算不同参数组合所产生的模拟结果与实际情况的拟合度，经粗、精、终 3 个校准阶段，提取能够反映研究区历史年份城市增长内在规律的最优控制参数组合。本次模型校准的具体参数设置见表 1。坡度是制约城市用地扩展的重要因素，

表 1 SLEUTH 模型校准参数设置表  
Tab. 1 Calibration parameter settings of the SLEUTH model

模型控制系数	粗校准		精校准		终校准		最优控制参数
	蒙特卡洛迭代次数= 4		蒙特卡洛迭代次数= 8		蒙特卡洛迭代次数= 12		
	范围	步长	范围	步长	范围	步长	
散布系数	0~100	25	0~25	5	5~10	1	8
繁殖系数	0~100	25	0~20	5	5~10	1	6
扩展系数	0~100	25	25~50	5	45~50	1	48
坡度系数	0~100	25	50~75	5	60~65	1	60
道路引力系数	0~100	25	25~75	10	50~60	2	56
道路权重敏感系数	0.01		0.01		0.01		自修 改规 则参 数
坡度敏感系数	0.1		0.1		0.1		
最低速度临界值	0.97		0.97		0.97		
最高速度临界值	1.3		1.3		1.3		
坡度阈值	25		25		25		
繁荣系数	1.01		1.01		1.01		
萧条系数	0.09		0.09		0.09		

在城市规划领域常涉及坡度临界值的概念,用以评定拟作为城市发展用地的适宜性;平原地区临界百分比坡度值为21%,丘陵地区可适当增加<sup>[26]</sup>。泉州中心城区境内多山,属于典型的丘陵城区,故将坡度阈值设置为25,超过此坡度的区域限制其城市化的可能性。以1993年研究区城市范围层作为基期样本,利用2001年、2004年、2008年三期的城市范围进行样本训练,得到精度模拟的最优控制参数组合:散布系数、繁殖系数、扩展系数、坡度系数、道路引力系数值依次为8、6、48、60、56。

散布系数主要控制城市的自发增长,繁殖系数决定那些自发增长所产生的城市元胞的再繁殖能力,即为新扩展中心增长;扩展系数、道路引力系数分别控制城市边缘增长与道路引力增长,决定已城市化斑块周边地区及道路两侧区域的城市化概率<sup>[6,20]</sup>。经多重校准所获取的最优控制参数表明:历史时期(1993-2008年)泉州中心城区城市扩展的主要方式为边缘增长和道路引力增长,受已城市化斑块及交通牵引的带动作用较大,随机城市化概率则偏小。研究区丘陵地形特征可从坡度系数中得到有效验证,其值高达60,而在国内一些平原城市的研究中该值约为1-15<sup>[19,22,26]</sup>。这充分表明坡度因素、地形特征是制约泉州中心城区城市用地扩展的重要因素。可以预计,随着适宜建设的平坦土地日趋减少,在未来城市增长进程中坡度因素的制约作用将会持续增加。

本次模拟选取面积指数(Compare)、形状指数(Lee-Salle)从城市用地扩展的数量拟合、空间匹配方面考察多重校准效果,评价模型的适用性。Compare为控制年份模拟的城市范围与实际范围的比值, Lee-Salle则用来度量控制年份模拟的城市边界与实际边界的空间匹配度<sup>[20,25]</sup>。据模型校准输出结果,各控制年份(2001/2004/2008年)的Compare值依次为0.9058、0.9015、0.9148,城市用地的数量拟合结果依次变好,至控制末年有91.48%的建设用地被捕捉到;各控制年份Lee-Salle值依次为0.5914、0.6215、0.6421,相关研究中该指数较少超过0.6<sup>[22,24]</sup>。另外,利用获取的最优控制参数组合重建历史时期(1993-2008年)的城市扩展过程,并将2008年模拟图 and 实际观测图进行对比,二者城市用地的标准Kappa统计值为0.786,其值与其他成功应用案例相当<sup>[19,27]</sup>,也充分表明了模型于研究区的模拟准确性达到了应用要求。综上所述,结合校准阶段模型的各参数与指数行为,SLEUTH模型能较好地应用于研究区城市增长的模拟与预测研究,其对城市用地增长的数量拟合要优于空间匹配,经反复训练获取的最优控制参数组合可较好地解释研究区历史年份的城市用地扩展特征。

### 3.2 城市发展情景设计与预测结果

排除层(Exclude)是SLEUTH模型情景设计的主要媒介,用户可通过定义各地类不被城市化的概率即排除概率(0-100%)以反映不同的城市发展方案,也即为模型兼容性特征的体现。本研究以2008年为基期,模拟预测2008-2030年泉州中心城区城市用地的时空扩展动态过程。在情景设计之前还需进行以下数据处理:①根据泉州市中心城区2020、2030年城市总体规划图,分别提取城市的近景(2008-2020年)、远景(2020-2030年)发展用地;②根据泉州市及其所辖市县(晋江、石狮、南安、惠安)2006-2020年土地利用总体规划图提取中心城区内的基本农田保护地块。

以2008年研究区土地利用图为基础,通过修改排除层设计两类典型的城市发展情景,分别为城市的自组织预案与规划引导预案。自组织预案指延续历史年份的城市发展趋势,城市用地增长管理约束较少,现状城镇用地赋值0,表示对应地块单元已城市化;河流湖泊、湿地、基本农田赋值100%,排除其城市化的可能性;林地是重要的生态用地,

生态系统服务价值高，研究区历史文化名城的保护与生态环境政策的实施将极大地限制林地城市化的概率，其排除概率赋值为90%；其他用地类型在柔性土地管理方式下排除概率都赋值为50%，具有一定的随机城市化概率<sup>[28]</sup>。规划引导预案以研究区城市总体规划为基础，充分考虑中心城区未来建设重点、发展方向以及农地保护等因素，适当提高近景、远景发展用地的城市化概率，降低农用地、未利用地的转用概率。分别调用SLEUTH模型预测模块，输入校准阶段获取的最佳控制参数与2020年规划交通图层，经多次蒙特卡洛迭代运算预测得到两情景下泉州市中心城区2008-2030年连续的城市扩展概率图，选择规划近期（2020年）、远期（2030年）的城市扩展概率图进行分析(图3)。中心城区现状建成区作为城市化的种子区域，对应于图中的黄色像元；预测年份高、低概率城市化区域以85%为阈值<sup>[29]</sup>，分别对应于图中的红色、绿色像元，将城市化高概率区域作为预测年份的新增城市用地，低概率区域作为城市用地的未来扩展趋势。

3.3 情景分析与预案优选

由图3城市扩展概率图可直观地发现，自组织预案下研究区未来城市扩展高、低概率区域分布广泛、凌散，而规划引导预案则显紧凑、集中。采用景观生态指数对不同发展情

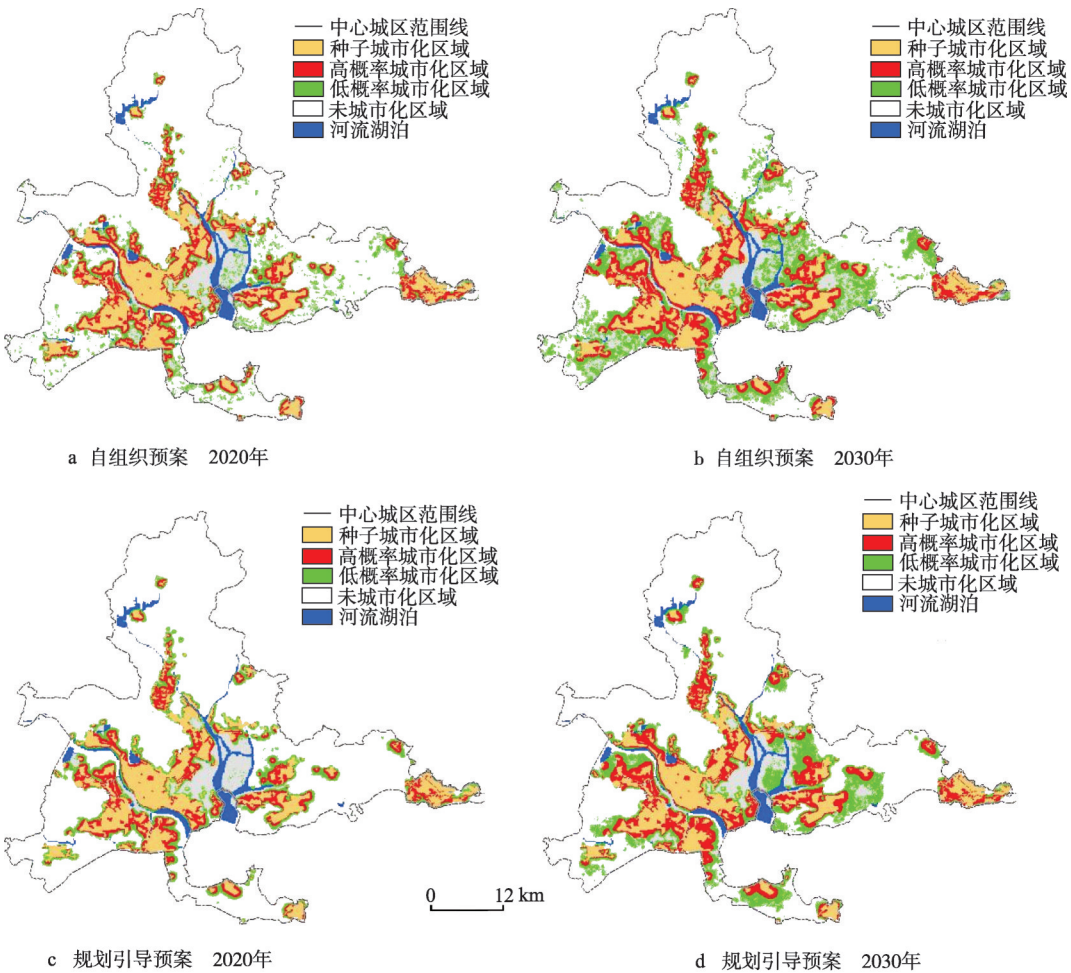


图3 自组织预案与规划引导预案2020、2030年城市扩展概率图

Fig. 3 Probability graph of urban expansion from self-organizing or planning growth scheme in 2020 and 2030



景下研究区城市扩展预测结果进行分析,从而挖掘潜在的空间数据信息,定量对比两预案城市用地扩展的基本特征。以城市用地斑块为对象,根据景观指数内涵在类型水平上选取平均斑块面积(MPS)、边界密度(ED)、面积加权平均形状指数(AWMSI)、平均邻近度指标(MPI) 4个景观指数<sup>[30,31]</sup>,在 ArcGIS 9.3 中集成 Patch Analyst 4.0 模块进行计算,结果见表 2。为防止重要空间扩展信息的损失,本次研究将高、低概率城市化区域一齐纳入了景观指数的计算。

表 2 不同发展情景下预测年份研究区城市扩展的景观指数测算表  
Tab. 2 Landscape metrics of urban expansion in predicted years under different development scenarios

景观指数	2020 年		2030 年	
	自组织预案	规划引导预案	自组织预案	规划引导预案
MPS (ha)	28.72	143.76	53.25	155.93
ED (m/ha)	19.10	8.21	23.12	12.51
MPI	876.70	1040.39	2365.22	2430.67
AWMSI	5.08	3.73	7.11	5.49

MPS 从斑块的平均大小体现城市用地扩展特征,可间接表征斑块类型的破碎化程度。2020、2030 年两情景预案平均斑块面积差异明显,自组织预案的 MPS 仅为规划引导预案的 0.20、0.34 倍,一定程度上表明了其城市化斑块的破碎性,这也可从 ED 指标的测算结果得到证实。ED 用来描述景观类型被边界分割的程度,是景观破碎化程度的直接反映,其值越大景观越破碎。预测年份自组织预案的边界密度分别高达 19.10 m/hm<sup>2</sup>、23.12 m/hm<sup>2</sup>,是规划引导预案的 2.33、1.85 倍,建设用地斑块破碎程度显著。MPI 和 AWMSI 分别表征景观类型的空间联系性与形态复杂性。MPI 可有效地度量同类型斑块间的邻近程度,其值越大斑块间的邻近度就越高;AWMSI 是斑块类型形状特征描述的重要指标之一,其值越大斑块形状就越复杂、越不规则。2020、2030 年规划引导预案的 MPI 值都要大于自组织预案,其城市用地斑块邻近度更高,斑块间的连接性较好,其城市用地扩展更显紧凑;自组织预案的 AWMSI 值较大,城市化斑块的形状较为复杂与不规则,间接表征了其城市用地扩展的自发式、随机性特征,与前述 MPI、ED 指标的描述达到了一致效果。

景观指数定量分析方法有效地表征了不同预案下研究区的城市用地空间扩展特征。自组织预案下研究区城市用地扩展呈分散式、跳跃式增长特征,建设用地斑块破碎度大,预测年份不断加速农用地、林地等重要生态用地的破碎化,以生态环境损失为代价,是一种粗放式、不可持续的扩张方式。规划引导预案则综合考虑政策规划因素,与最新的空间规划成果相结合,其未来城市用地扩展较为紧凑,呈填充式与边缘式增长特征,利于实现土地的集约利用与城市的集聚发展。故确定规划引导预案为本次城市扩展模拟的适宜情景,是进一步分析泉州中心城区城市增长的空间分异与驱动因素的基础。

4 城市增长的空间格局演化特征分析

城市增长是一个系统的、动态的时空变化过程,具有复杂性与不确定性等特征。Verburg 认为,单一的研究方法不足以全面分析城市用地扩展问题,寻求多方法结合才是行之有效的途径<sup>[32]</sup>。为此,本研究基于规划引导预案下城市增长预测结果,以城镇扩展强



度指数为变量，选择一定大小的格网单元，借助空间关联模型继续分析研究区城市用地扩展的空间格局演化特征，以期深刻理解其未来的城市空间增长过程。为降低地理数据尺度效应的影响，格网尺寸根据经验公式（研究区格网数约为建设用地斑块数的 $1/2^{[10,33]}$ ）确定为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 。

#### 4.1 全局性特征

城镇扩展强度指数<sup>①</sup>为研究区内各地理单元的年均城镇用地扩展面积占单元总面积的百分比，其实质是对城镇用地的年均增长速度进行标准化处理而使其具有可比性<sup>[34]</sup>。引入Getis-Ord General  $G$ 和Getis-Ord  $G_i^*$ 指数<sup>②</sup>并参考其测算公式<sup>[35]</sup>，分别测度泉州中心城区城市增长的全局、局域空间聚簇特征。前者用于探测整个研究区的空间关联结构模式，后者则用于识别不同的空间位置上的高值簇与低值簇，也即热点区(hot spots)与冷点区(cold spots)的空间分布<sup>[36]</sup>。

城镇扩展强度指数具有时间可比性，可反映不同时期城镇用地扩展的速率。以规划引导预案2020、2030年研究区城市扩展概率图为对象，借助GIS栅格工具可得到2008-2020年、2020-2030年研究区年均城镇扩展强度指数分别为0.90、0.55，规划近期城市用地的扩展速率为远期的1.64倍。究其原因，研究区处于沿海丘陵地带，境内多山、河流纵横，地势较为复杂，预测年份城市扩展速率逐渐降低主要是由于平坦的、适宜建设的可城市化用地不断减少所致，城市增长受坡度影响、农地转用制约以及生态保护等的阻力将会持续增加。

预测年份泉州中心城区城镇扩展强度指数的全局 $G$ 统计指标均大于期望值 $E$ ，且统计检验值 $Z$ 较为显著，说明研究区内存在扩展强度指数高值和低值集簇现象，城镇用地扩展可能围绕少数几个极核中心展开。2008-2020年全球 $G$ 统计指标为0.002702，检验值 $Z$ 为23.69；2020-2030年全球 $G$ 统计指标为0.002180，检验值 $Z$ 为16.67。两时段的期望值 $E$ 都为0.000855。规划远期的全局 $G$ 统计指标、检验值 $Z$ 出现一定程度的下降，表明随着预测时间的推移，研究区城镇用地扩展的空间集聚性以及极核中心的极化强度将有所弱化，城市增长的热点区在空间分布上将会发生演变与迁移。由上所述，泉州中心城区城镇扩展强度指数及其全局 $G$ 统计指标，分别从建设用地扩展的速率、空间集聚性两方面较好地诠释了其城市增长的全局性特征，可为下文进一步分析其局域演化特征提供铺垫。

#### 4.2 热点区演化

以 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 格网单元为对象，分别计算2008-2020年、2020-2030年两阶段各评价单元城镇扩展强度指数的局域 $G_i^*$ 关联指标，并在GIS软件中采用自然断裂法对每个阶段的局域 $G_i^*$ 关联指标从高到低分成4类（高值区、次高值区、中值区、低值区），生成研究区城镇扩展热点区演化图(图4)。两阶段城镇用地扩展热点区，即局域 $G_i^*$ 关联指标高值区的分布与前述城镇扩展强度指数及全局 $G$ 统计指标分析结果相统一。总体而言，预测年份泉州中心城区呈现“多中心、组团式”的城市用地扩展模式，随时间推移城镇扩展热点区的分布发生变迁。2008-2020年，研究区城镇扩展热点区域较多，局域 $G_i^*$ 指标高值区、次高

①  $A_i^{t-t+n} = [(B_i^{t+n} - B_i^t)/n]/C \times 100$ ，式中： $A_i^{t-t+n}$ 为栅格单元 $i$ 的年均扩展强度指数， $B_i^t$ 、 $B_i^{t+n}$ 为 $t$ 、 $t+n$ 年单元 $i$ 的城镇用地面积， $C$ 为单元 $i$ 的土地总面积。

② Getis-Ord General  $G = \sum \sum w_{ij}(d)x_i x_j / \sum \sum x_i x_j$ ；Getis-Ord  $G_i^* = \sum_j w_{ij}(d)x_j / \sum_j x_j$ 。式中： $d$ 为到各空是栅格单元的距离， $w_{ij}(d)$ 以距离规则的空间权重， $x_i$ 和 $x_j$ 是第 $i$ 个栅格单元的年均扩展强度指数。

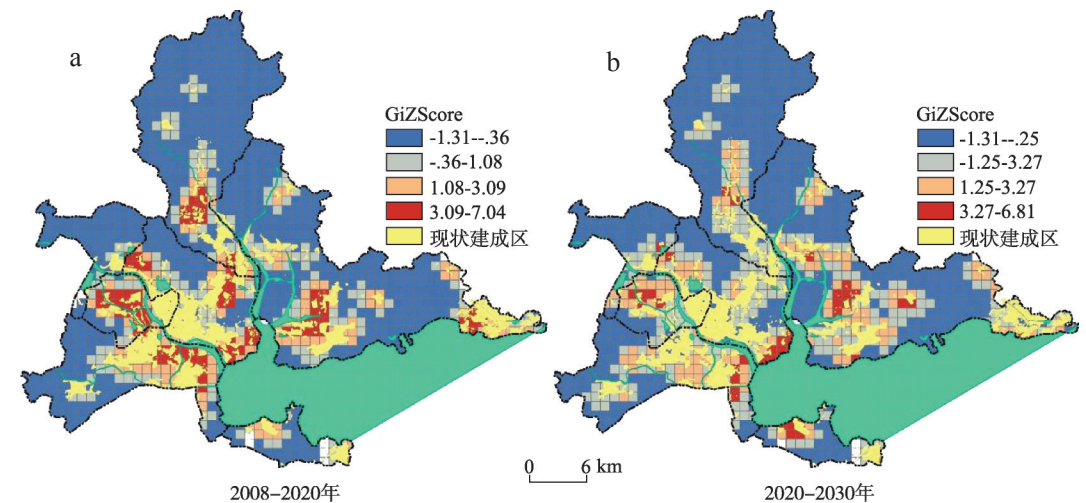


图4 泉州中心城区城镇扩展的“热点区”演化

Fig. 4 Evolution of urban expansion in "hot spots" of Quanzhou central city

值区占研究区总栅格数的比例分别为8.51%、14.26%，次高值区环绕高值区分布，空间布局较为紧凑(图5)；2020-2030年，局域 $G_i^*$ 指标高值区、次高值区的比例下降至3.78%、13.33%，城镇扩展的热点区数量显著下降，空间集聚性有所弱化。另外，规划远期城镇用地扩展速率的下降也可从两阶段的局域 $G_i^*$ 指标中值区比例看出，前一阶段中值区比例为20.10%，至后一阶段增加27.60%，城镇用地扩展以中速为主。

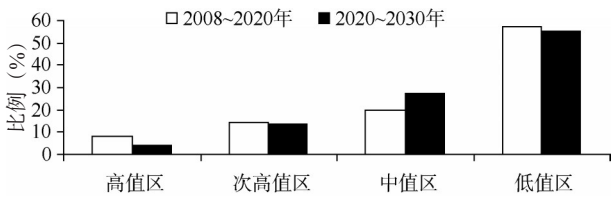


图5 局域 $G_i^*$ 指标各级别区比例示意图

Fig. 5 Column chart of each levels proportion of Local  $G_i^*$

2008-2020年，研究区城镇扩展热点区分布总体呈现“圈层式”结构，局部则以“跨江发展”为主要特征，城镇扩展热点区主要跨晋江与洛阳江分布。划入泉州中心城区的周边各县域组团具有较大的增长潜力，在多条跨晋江通道的规划建设以及泉州经济技术开发区的带动下，晋江组团的池店、陈埭两镇以及鲤城区的江南街道沿江区域城镇建设用地增长迅速，呈现跨晋江发展特征。惠安组团内台商投资开发区已初具规模，片区配套正逐步完善，集聚与规模效应日益凸显，将是预测年份城镇扩展的热点区域，新增城镇用地主要跨洛阳江支流布局。老城三区（鲤城、丰泽、洛江）城镇扩展模式表现为外部扩展和内部填充之间的不断“角力”，其中丰泽区滨海临湾的东海街道出现扩展热点区，主要是由于近年围海造陆工程的实施以及泉州市政府的迁入引致。另外，位于惠安组团最东面的崇武古城将以内部填充式增长为特征，也将是近期城镇扩展的热点区之一。

2020-2030年，研究区城镇扩展热点区发生转移和变迁，总体布局较为发散，局部则呈现“环湾发展”与“孤立分布”特征。丰泽区东海街道城镇用地继续临泉州湾扩展，和晋江、石狮组团的陈埭镇、泔江镇一同构成该阶段研究区的“环湾发展”特征。惠安组团的东园镇在台商投资开发区的驱动下继续成为城镇扩展的热点区，由上一阶段的南向扩展变迁为此阶段的北向扩展。其余城镇扩展热点区主要零散分布于老城三区，以填充式开发

为主。城市管理相关部门需逐渐重视旧城改造与低效用地的二次开发工作,正确引导城市土地利用结构调整与布局优化。

### 4.3 驱动因素综合分析

城市用地扩展是其内部发展压力作用于外部形态的结果,尽管驱动城市发展和演变过程的因素类似,但不同城市的主导因素却不尽相同。结合城市增长模拟预测结果进行分析,影响泉州中心城区未来城市用地扩展的主要因素包括:①自然地理环境的显著“门槛效应”。研究区地处沿海丘陵地带,境内“一湾两江多山”的生态基底成为其城市空间扩展的门槛,决定了其“多中心、组团式”的扩展模式,一定程度上抑制了平原城市常见的“摊大饼”蔓延方式。②城市总体规划是城市用地扩展的“引导阀”。研究区现状建成区既体现了1989版城市规划确定的中心城区向东发展的规划设想,又反映了1995版城市规划提出的跨江发展的思路。基于SLEUTH模型的城市增长预测结果表明,新划入中心城区范围的各县域组团尤其是沿江与环湾区域城市增长潜力较大,充分表明新版城市规划在引导城市空间发展方面的“引导阀”作用。③开发区城市功能的建设将有力地促进所在城镇的共同发展。泉州市抓住产业结构调整与升级的契机,重点打造泉州经济技术开发区、台商投资区两个开发区,加强其城市功能建设以争夺区域竞争的制高点,将极大促进所在城镇的建设与发展。特别是台商投资区,具备依山、沿江、面海的区位优势,其功能定位为生态型滨水城市新区和现代化港口保税物流工业园区,将成为泉州未来数十年的新经济增长极。④跨江通道建设的重要指向作用。跨江通道是支持城市跨江发展的重要设施,能有效地突破水系阻隔的“门槛效应”并加速各类生产要素的跨江流动,加强各城镇组团间的相互交流与联系。预测近期城镇扩展热点区“跨江分布”特征,有力地表明了现状及规划的各跨江通道对研究区城市空间增长的重要指向作用。⑤围海造陆工程可有效地支持城市的环境发展。环泉州湾区域地势平坦、水资源丰富、人居环境优美,是研究区城市空间发展的重要方向,围填海工程可有效增加陆域面积,缓解用地供求矛盾,促进城市环境发展思路的实施。目前丰泽区东海街道已开展了围填海先例,尤其是泉州市政府的迁入,将较大地激发该区域的增长潜力,在预测年份两阶段都为城镇用地扩展的热点区。然而围填海工程易造成沿海生态环境不可逆转的破坏,此项工程的实施还需慎重。

## 5 结论与讨论

本文基于遥感影像数据,将GIS元胞自动机模型、景观生态指数、空间关联分析等方法有效结合,可为城市时空增长模式研究提供方法学上的借鉴。运用SLEUTH模型对泉州中心城区未来城市增长进行情景模拟与预测,并剖析适宜情景下城市用地扩展的空间格局演化特征与驱动因素,也可为研究区的城市发展决策和管理实践提供有益参考。SLEUTH模型校准阶段各控制年份的Compare、Lee-Salle指数值依次变好,至控制末年末有91.48%的建设用地被捕捉到;Lee-Salle值超过0.6,且标准Kappa统计值达到0.786,这表明SLEUTH模型可较好地应用于研究区的城市增长模拟研究,其对城市用地扩展的数量拟合要优于空间匹配,可作为多方案情景模拟的一个技术手段。景观指数定量分析可以对SLEUTH模型情景模拟结果进行优选,2020、2030年自组织预案的MPS仅为规划引导预案的0.20、0.34倍,而ED则分别达2.33、1.85倍,反映了其建设用地斑块的细碎化特征。MPI和AWMSI分别表征景观类型的空间联系性与形态复杂性,可以间接反映城市扩展的



集中与离散模式。规划引导预案MPI较大,斑块连接性较优,表明其城市用地扩展更为紧凑;自组织预案AWMSI较大,斑块形状较为不规则,间接说明其城市用地扩展具有自发性、随机性特征。故确定规划引导预案为本次城市扩展模拟的适宜情景。

随预测时间的推移,研究区城市用地扩展的速率以及空间集聚性将有所减弱,城市增长的热点区也会发生演变与迁移。2008-2020年、2020-2030年研究区年均城镇扩展强度指数分别为0.90、0.55,规划近期城市用地的扩展速率为远期的1.64倍,城市增长受坡度影响、农地转用制约以及生态保护等的阻力将会持续增加。预测年份泉州中心城区城市增长总体呈现“多中心、组团式”模式;近期扩展热点区分布总体呈现“圈层式”结构,局部以“跨江发展”为主要特征;远期扩展热点区总体布局则较为发散,局部呈“环湾发展”与“孤立分布”特征。在土地利用规划“自上而下”刚性指标的约束下,城市规划的未来发展用地需求往往较难满足。本次基于SLEUTH模型的研究区城市增长情景模拟,是从模拟角度寻求“两规”空间协调的探索性尝试,准确地回答了预测近期、远期城市建设亟需的用地布局问题。相关城市管理部门需提前做好土地储备、基础设施布设、热点区控规覆盖等准备工作,使有限的土地利用规划刚性指标尽量用于最适合城市增长的区域,满足其城市建设及重点项目用地需求。

城市增长的关键驱动因素分析表明,规划引导、开发区促动、基础设施建设等政府主导作用将有效激发研究区的城市增长潜力。未来城市用地扩展以跨江、环湾以及开发区建设为主要特征,受地理环境“门槛效应”的约束较大,其城市用地扩展规律在全国的沿江、沿海丘陵城市中具有相当的典型性和代表性。需要指出的是,研究区各自为政的状态将不利于其城市增长潜力的发挥,尤其会抑制各县域组团的发展潜力,相关政府部门需以中心城区发展框架拉大为契机,加强各行政单元的有机协调并抓紧行政区划调整工作,形成合力,充分发挥中心城区的辐射带动能力。另外,快速城市化时期城市发展的复杂性与不确定性导致城市用地增长的影响因素广泛存在,使得SLEUTH模型的应用存在一定局限性。本文只给出了自组织预案与规划引导预案两类城市发展典型情景,略显不足。从系统角度综合考虑影响城市发展各类因子,充分模拟与评估未来可能的城市增长情景,将是下一步研究的方向。

## 参考文献(References)

- [1] Foody G M. Monitoring the magnitude of land cover change around the Southern Limits of the Sahara. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2001, 67(7): 841-847.
- [2] Weng Q H. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS, and stochastic modeling. Journal of Environmental Management, 2002, 64(3): 27-284.
- [3] Rawashdeh S Al, Saleh B. Satellite monitoring of urban spatial growth in the Amman area, Jordan. Journal of Urban Planning and Development, 2006, 132(4): 211-216.
- [4] Han J, Hayashi Y, Cao X, et al. Evaluating land use change in rapidly urbanizing China: Case study of Shanghai. Journal of Urban Planning and Development, 2009, 135(4): 166-171.
- [5] Luo J, Wei Y D. Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing. Landscape and Urban Planning, 2009, 91(2): 51-64.
- [6] Jantz C A, Goetz S J, Donato D, et al. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(1): 1-16.
- [7] Yeh A G O, Li X. Economic development and agricultural land loss in the Pearl River Delta, China. Habitat International, 1999, 23(3): 373-390.



- [8] Sui D Z, Zeng H. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: A case study in Shenzhen. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 53(1): 37-52.
- [9] 李加林, 许继琴, 李伟芳 等. 长江三角洲地区城市用地增长的时空特征分析. *地理学报*, 2007, 62(4): 437-447.
- [10] 王磊, 段学军. 长江三角洲地区城市空间扩展研究. *地理科学*, 2010, 30(5): 702-709.
- [11] 张落成, 吴楚材, 姚士谋. 苏南地区近20年城市用地扩展的特点与问题. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 639-645.
- [12] 刘登娥, 陈爽. 近30年来苏锡常城市增长形态过程与聚散规律. *地理科学*, 2012, 37(1): 47-54.
- [13] 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. *地理研究*, 2003, 22(6): 769-779.
- [14] 吴宏安, 蒋建军, 周杰 等. 西安城市扩张及其驱动力分析. *地理学报*, 2005, 60(1): 144-150.
- [15] 祝昊冉, 冯健. 经济欠发达地区中心城市空间拓展分析: 以南充市为例. *地理研究*, 2010, 29(1): 43-55.
- [16] 王勇. 论“两规”冲突的体制根源: 兼论地方政府“圈地”的内在逻辑. *城市规划*, 2009, 33(10): 53-59.
- [17] 聂婷, 肖荣波, 王国恩, 等. 基于 Logistic 回归的 CA 模型改进方法: 以广州市为例. *地理研究*, 2010, 29(10): 1909-1919.
- [18] 王磊, 王羊, 蔡运龙. 土地利用变化的 ANN-CA 模拟研究: 以西南喀斯特地区猫跳河流域为例. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(1): 116-122.
- [19] 吴晓青, 胡远满, 贺红士 等. 沈阳市城市扩展与土地利用变化多情景模拟. *地理研究*, 2009, 28(5): 1264-1275.
- [20] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos J. A self-modifying cellular automation model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 247-261.
- [21] Clarke K C, Gaydos J. Loose-coupling a cellular automation model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(7): 699-714.
- [22] 刘勇, 吴次芳, 岳文泽 等. 基于 SLEUTH 模型的杭州市城市扩展研究. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 797-807.
- [23] Jantz C A, Scott J Goetz, Shelley M K. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31(2): 251-271.
- [24] 吴巍, 周生路, 杨得志, 等. 规划跨江通道对滨江副城建设用地增长的影响研究: 以南京市浦口区为例. *地理科学*, 2011, 31(7): 829-835.
- [25] Silva E A, Clarke K C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, 26(6): 525-552.
- [26] 米丽娜. 基于 SLEUTH 模型的银川市空间扩展研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [27] Xi F M, He H S, Clarke K C, et al. The potential impacts of sprawl on farmland in Northeast China: Evaluating a new strategy for rural development. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(1): 34-46.
- [28] 徐昔保, 杨桂山, 张建明. 近50年兰州城市空间扩展模拟及其未来预测. *干旱区研究*, 2009, 26(5): 763-769.
- [29] Rafiee R, Mahiny A S, Khorasani N, et al. Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). *Cities*, 2009, (26): 19-26.
- [30] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000: 100-110.
- [31] 李明杰, 钱乐祥, 吴志峰等. 广州市海珠区高密度城区扩展 SLEUTH 模型模拟. *地理学报*, 2010, 65(10): 1163-1172.]
- [32] Verburg P H, Veldkamp A. The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1-3): 177-190.
- [33] Sudhira H S, Ramachandra T V, Jagadish K S. Urban sprawl: Metrics, dynamics and modeling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(1): 29-39.
- [34] 马晓冬, 朱传耿, 马荣华 等. 苏州地区城镇扩展的空间格局及其演化分析. *地理学报*, 2008, 63(4): 405-416.
- [35] 马荣华, 顾朝林, 蒲英霞, 等. 苏南沿江城镇扩展的空间模式及其测度. *地理学报*, 2007, 62(10): 1011-1022.
- [36] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.

## Scenario simulation and changes of urban growth patterns in central cities: A case study of Quanzhou, China

WU Wei<sup>1</sup>, ZHOU Shenglu<sup>1</sup>, WEI Yehua<sup>2</sup>, LIU Kehua<sup>3</sup>, CHEN Jianglong<sup>4</sup>, GUAN Weihua<sup>5</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Geography, University of Utah, Salt Lake City 84112, USA;

3. Urban and Rural Planning Bureau of Quanzhou, Quanzhou 362017, Fujian, China;

4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

5. College of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;)

**Abstract:** The paper examines the urban growth patterns in Quanzhou City based on remote sensing images over the period 1993-2008. Using SLEUTH cellular automata model, we simulate two typical scenarios of urban development: the self-organizing expansion and planning oriented growth in Quanzhou. We also employ landscape metrics and spatial statistical analysis methods to analyze the spatial characteristics of urban spatial expansion in the study areas over the study period. The results show that: (1) The SLEUTH model is a useful tool to predict urban growth patterns under different scenarios. (2) Four landscape metrics, i.e., MPS, ED, AWMSI and MPI, for the planning-oriented growth scenario are significantly greater than those derived from self-organizing expansion scenario. The planning oriented scenario is also characterized by better connectivity and integrity of urban growth patches. This further demonstrates that the urban planning, if efficiently implemented, can help to achieve the goal of compact and sustainable development. (3) However, over the years, we find that urban expansion rate and spatial aggregation in the study area are weakening and the hotspots of urban growth also changes as follows. First, from 2008 to 2020, the distribution of urban growth hotspots is characterized by a "single-ring" pattern with an emphasis on the "cross-river development". Second, from 2020 to 2030, the layout of hotspots is more dispersedly distributed characterized by "bay-area-oriented development" and "isolated development". We argue that a combination of simulation, landscape metrics and spatial analysis can provide more reliable evidence to support policy decision making concerning city planning and management in China.

**Key words:** central city; urban growth; hot spots; SLEUTH model; spatial association; Quanzhou