

广州市海珠区高密度城区扩展 SLEUTH 模型模拟

李明杰^{1,2,3}, 钱乐祥¹, 吴志峰⁴, 崔海山¹, 侯西勇²

(1. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 2. 中国科学院烟台海岸带所, 烟台 264003;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘要: 高密度城区是城市的核心区, 也是城区扩展的源, 对该区域的精确识别以及扩展模拟研究, 具有重要的意义与价值。以广州市海珠区 1979、1990、2000、2008 年 4 期 Landsat 影像为数据源, 运用非渗透表面端元选取模型 (V-I-S) 与归一化混合光谱分析模型 (NSMA) 相结合的方法, 辅以单窗算法反演地表温度数据 (LST), 高精度提取非渗透表面丰度, 进而设置合适阈值表征研究区高密度城区范围。在此基础上基于 SLEUTH 模型设置 4 种场景模拟和预测海珠区高密度城区扩展, 并用景观指数分析方法对研究区 1979-2050 年长达 70 年的空间扩展状况进行分析。主要结论为: ① SLEUTH 模型同样适用于小尺度区域的扩展模拟。② SLEUTH 模型模拟中基于自然、人文以及城市扩展内在动力机制等条件参数的设置, 促使模拟结果精度更高。③ SLEUTH 模型模拟结果表明, 自 1979 至今, 海珠区高密度城区以较快扩展速率扩张, 尤以 1990-2004 年间变动增长最快; 未来的 20 年其增长速率减缓, 并于 2030 年前后趋于稳定。这种扩张格局与变化状况与研究区产业结构、经济政策、土地规划决策等因素密不可分。

关键词: 非渗透表面丰度; 高密度城区; SLEUTH 模型; 模拟; 广州市海珠区

1 引言

非渗透表面, 是指水分不能通过其向下渗入的物质表面, 在 LUCC 及城市化研究中多指房屋、道路、停车场等用地区。随着遥感技术的深入发展以及对城市扩展 (非渗透表面扩展) 问题的关注, 国外不少专家学者提出用遥感技术提取非渗透表面从而表征城市范围^[1-4], 而由此界定的高密度城区是指非渗透表面丰度值比较高的区域。高密度城区是城区扩展的源, 研究高密度城区的扩展比单纯研究城区扩展有了更进一步的意义。SLEUTH 模型是一直被广泛应用的的城市增长模型^[5], 该模型已经被成功地用于许多大都市区未来 20~50 年的城市增长预测中^[6-7]。最近, Arthur-Hartranft 等^[8]利用 SLEUTH 模型, 研究了位于宾夕法尼亚州东南部和特拉华州东北部 White Clay Creek 流域城市化对地表水文的影响。Carlson^[9]利用 SLEUTH 模型和非渗透表面数据, 调查了城市扩展对径流的影响。陈学刚等^[10]、张岩等^[11]分别应用该模型模拟了乌鲁木齐、北京城市扩展。徐昔宝^[12]、米丽娜^[13]运用 SLEUTH 模型分别对兰州市、银川市土地利用变化进行模拟等。在目前的 SLEUTH 模型模拟应用中, 该模型存在自身优点的同时, 也普遍存在如下问题: ① 研究的区域多为大、中尺度区域。② 城市范围的确定多使用传统方法, 导致对模拟和预测精度有所限制。③ 只是对城区和非城区粗略进行模拟。针对上述问题, 本文以广州市海珠区小尺度区域为研究对象, 采用遥感技术高精度提取的非渗透表面丰度值界定高密度城区范围, 进

收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30970482); 原建设部科技项目 (2007-K9-26) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.30970482; The Scientific and Technological Foundation of the Former Ministry of Construction, No.2007-K9-26]

作者简介: 李明杰 (1984-), 女, 在读博士, 主要从事环境资源遥感与地理信息系统, 海岸带生态环境监测与全球变化方面研究。E-mail: mjli@yic.ac.cn

通讯作者: 钱乐祥, 男, 博士, 博士生导师, E-mail: qian-lx@163.com

而模拟和预测高密度城区扩展。另外,因海珠区四周为珠江航道环绕,是广州中心区唯一的“岛区”,其得天独厚的优越条件促使该区域受城市化影响较大。且因2000年广州开始实施“东进、西联、南拓、北优”的八字方针政策的影响,该区域作为广州市南拓的起点,受“南部商圈、信息之港、生物之岛”目标的驱使,区域城市扩展以及土地利用变更比较明显。从上述角度,选取该区域进行高密度城区扩展的模拟,也具有一定的现实意义。

2 数据准备与研究方法

2.1 数据组织与预处理

本文采用的数据除部分必要的社会经济统计数据以及遥感影像获取时间的气象资料外,其余原始资料主要为:1:10000比例尺海珠区等高线数据,2010年海珠区城市总体规划图数据,2002年Spot5影像数据,1979、1990、2000、2008年四期Landsat影像数据及相应年份道路图数据(其中,1979年道路数据被1984年道路图数据代替)。为达到减少数据畸变误差,提高图像自身质量,以及使所用数据具有相同空间参考等目的,对Landsat及SPOT5数据依次进行辐射校正、几何校正、图像增强等操作;对道路图、规划图、等高线图等进行数据格式、坐标系统转换等操作。本文所用图形数据均为:WGS-84坐标系下UTM北49带投影。

2.2 技术流程与关键技术方法

本文利用高精度提取的非渗透表面丰度数据确定SLEUTH模型输入所需的高密度城区核心数据。SLEUTH模型是基于元胞自动机的城市增长模型(UGM)和土地利用/土地覆盖Deltatron模型(DLM)的集成模型,当模型中包含土地利用数据时,Deltatron模型才被激活。因本文旨在用SLEUTH模型模拟研究区高密度城区的扩展变化,土地利用数据层未被使用。论文具体研究技术流程见图1。

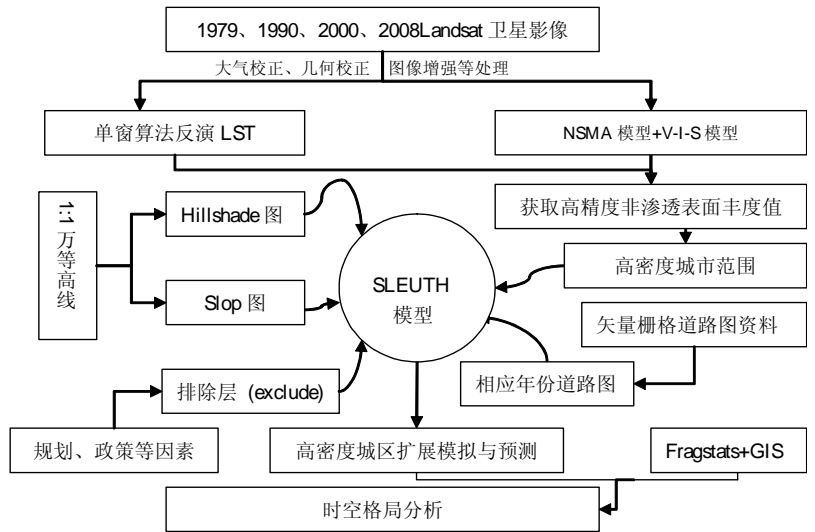


图1 技术路线图

Fig. 1 The flow chart of technology

3 高密度城区扩展SLEUTH模型模拟

3.1 高密度城区的识别

本文对非渗透表面丰度的提取基于植被—非渗透表面—土壤(V-I-S)模型、归一化线性混合光谱模型(NSMA)以及单窗算法反演的地表温度(LST)数据。其中,非渗透表面端元的确定是NSMA模型实施的关键,文中选用较易获取且能够代表与影像数据同尺度的光谱测量值的影像端元法选取非渗透表面端元;归一化线性光谱混合模型(NSMA)是首

先对各波段的光谱值进行归一化处理，然后依据线性光谱混合模型 (LSMM) 原理对混合像元进行高精度分解的方法^[14-15]；单窗算法简单可行且保持较高精度，覃志豪^[16-17]、钱乐祥^[18]等对 Landsat 数据采用该方法反演地表温度，均取得了较好的结果，本文亦采用此方法对海珠区 TM 及 ETM+数据进行地表温度反演，并以反演的地表温度数据辅助纠正 V-I-S 模型、NSMA 模型结合使用提取的非渗透表面丰度，具体实施过程为^[19]：对相同时相反演生成的 LST 数据与非渗透表面丰度影像进行 Overlay 操作，并设置一定的温度阈值 Ts：对于超过 Ts 的非渗透表面区，其丰度值不变，反之，则丰度值为 0；对于超过 Ts 的渗透表面区，给与一定的非渗透表面丰度值，反之，则丰度值为 0。阈值 Ts 因影像获取时间及天气状况不同而不同，1990、2000、2008 年三期影像的 Ts 值，分别为：298K，300K，293K (因 1979 年 MSS 影像没有热红外波段，只处理 1990，2000，2008 三期数据)。以 2002 年 SPOT5 数据为参考影像，对 2000 年 ETM+非渗透表面提取结果以 49 个 300 m×300 m 有效样区进行抽样检验，得到计算值与真实值存在 10.03% 的均方根误差以及 2.65% 的系统误差。误差结果表明，单窗算法模型、V-I-S 模型、NSMA 模型三者的结合提高了现行非渗透表面丰度获取方法的精度，并可适用于 TM 及 ETM+系列影像数据获取较高精度非渗透表面。对广州市海珠区研究区而言，从 ETM+以及 SPOT5 卫星数据提取的非渗透表面丰度图来看：当丰度阈值大于 0.5 时，几乎涵盖了所有已开发的的城市土地 (包括低密度、中密度和高密度居住区以及工商业中心区)。故以 0.5 为划分城区及非城区的丰度阈值，当丰度值大于此值时，该像元被分为城市用地，反之则为非城市用地。相应地城市开发密度同样可以用丰度阈值确定：丰度阈值为 0.5~0.6 时，为低密度城区，0.6~0.8 为中密度城区，大于 0.8 为高密度城区。海珠区四期高密度城区空间分布模式见图 2。

3.2 SLEUTH 模型数据输入与模型校准

经对广州市海珠区数据源的预处理以及高密度城区范围的确定等过程，SLEUTH 模型运行所需的数据集资料已准备充分。借助 ENVI、ArcGIS、Photoshop、XnView 等软件进行交互操作，获取模型输入所需的系列 GIF 格式数据，具体数据图层为：① 坡度图层 (Slope) 与山体阴影图层 (Hillshade)：坡度用百分比表示，值阈范围为 0~100，灰度值大于 20 的区域为不可城市化区。山体阴影图作为模型输出背景图，不参与计算；② 城市范围

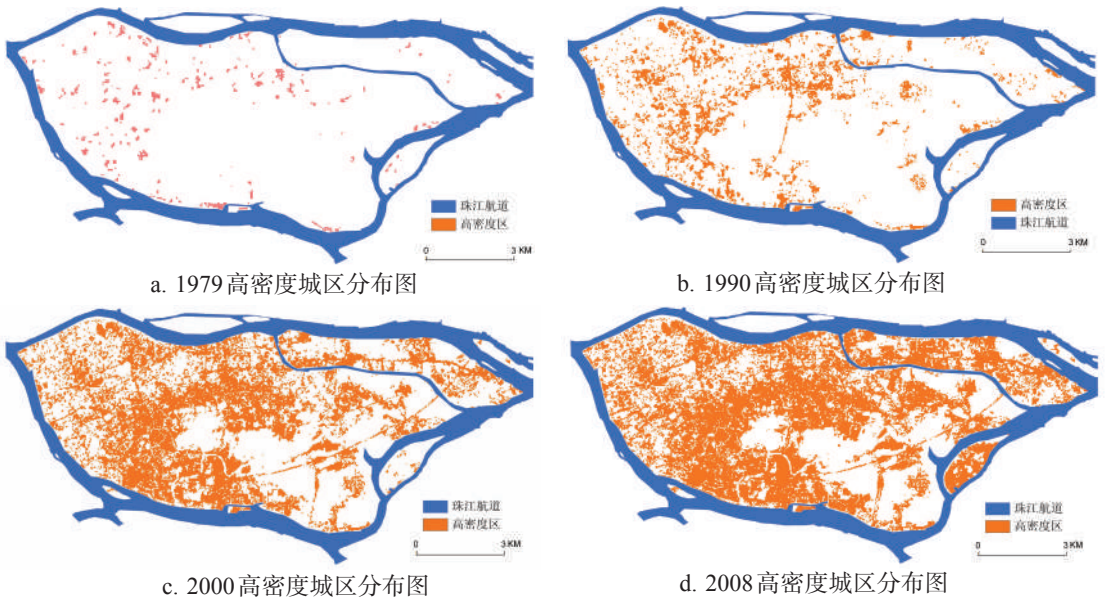


图2 高密度城区分布图

Fig. 2 The distribution map of high density urban area

图层 (Urban) 即海珠区高密度区城市范围图; ③ 道路交通图层 (Transportation): 依据不同来源的矢量栅格道路数据, 得到相应年份的 GIF 格式道路图; ④ 排除层 (Excluded): 排除层用来设置城市增长的限制因素, 通过排除层可以指定允许或禁止发生城市增长的区域, 文中依据以下原则设置排除层: 在校准过程中把 2008 年全部高密度区域赋值为 0, 水域, 坡度大于 20 的区域以及 2010 年城市规划中公园、绿地、文物保护区、基本农田保护区等区域设置为 100, 其他区域依据城市化发展的难易进行相应设置。

SLEUTH 模型的校准是该模型运行和预测的关键, 模型校准过程中, 对模型系数最佳取值范围和最佳预测系数值的确定采用 OSM 参数^[20-21]。其中模型内部具体参数的设定参见表 1, 这些参数与系数值可在各自校准过程产生的 Control_stats.log 文件中依据 OSM 值的大小选取。

参见表 1 获取的模型增长最佳拟合系数值, 可以看出: 除坡度系数值比较小外, 其余系数值都大于 40, 尤其是道路重力权重系数最大, 达 62。这表明研究区高密度城区扩展受坡度的影响较小, 受道路、自身以及周围区域城市化水平等因素影响较大, 且扩展速度较快。这与研究区的实际情况基本吻合: 海珠区海拔高度位于 0~53 m, 地势比较平坦, 除个别区域外坡度均小于 20, 城市扩展几乎不受地形因素的影响; 城市的发展遵循点—轴理论, 海珠区交通道路设施的建设对于城市扩展起着重要的作用; 该区作为珠三角核心区, 自改革开放以来, 在国家政策及区位因素等影响下, 大力建设, 大量土地转为城市用地, 西城东村的格局日益改变。

3.3 SLEUTH 模型模拟精度验证

参照获取的最佳预测拟合系数值, 借助 SLEUTH 模型中 GROW PREDICT 命令实现 1979 至 2008 年海珠区高密度城区历史场景的再现。现以 2008 年实际高密度城区图参照, 对 2008 年高密度区模拟图进行验证, 采样区的选择与分布见图 3、图 4 (对于模拟图而言, 图形黄色区为城市高密度区种子点区域, 红色区为在种子点基础上扩展成的高密度区, 绿色表示高密度区的下一蔓延发展趋势; 对于实际分布图, 黄色区域代表高密度城区分布范围)。通过计算得到值为 10.71% 的均方根误差 (RMSE) 以及值为 2.77% 的系统误差 (SE), 由此可知模拟重建结果以及预测系数的可用行。

3.4 SLEUTH 模型预测

SLEUTH 模型假设历史演化趋势是持续的, 未来发展演化趋势可以从过去历史发展趋

表 1 模型校准的具体参数设置表

Tab. 1 Calibration coefficients for model calibration

模型增长系数	粗校准		精校准		终校准		最佳拟合系数值
	蒙特卡洛迭代次数 = 4 循环迭代次数 = 3250 OSM 匹配 = 0.628356 范围	步长	蒙特卡洛迭代次数 = 6 循环迭代次数 = 7776 OSM 匹配 = 0.720621 范围	步长	蒙特卡洛迭代次数 = 10 循环迭代次数 = 3780 OSM 匹配 = 0.587742 范围	步长	
散布系数 (Diff)	25-100	15	25-70	9	25-43	4	41
繁殖系数 (Brd)	25-75	10	25-65	8	33-57	4	57
扩展系数 (Sprd)	0-100	25	25-50	5	45-50	2	49
坡度系数 (Slp)	0-100	25	0-25	5	5-25	4	9
道路重力权重系数 (Rg)	0-100	25	50-75	5	50-65	3	62
自修改规则参数数							
道路权重敏感系数	0.01		0.01		0.01		
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	15		15		15		
繁荣系数	1.01		1.01		1.01		
萧条系数	0.09		0.09		0.09		

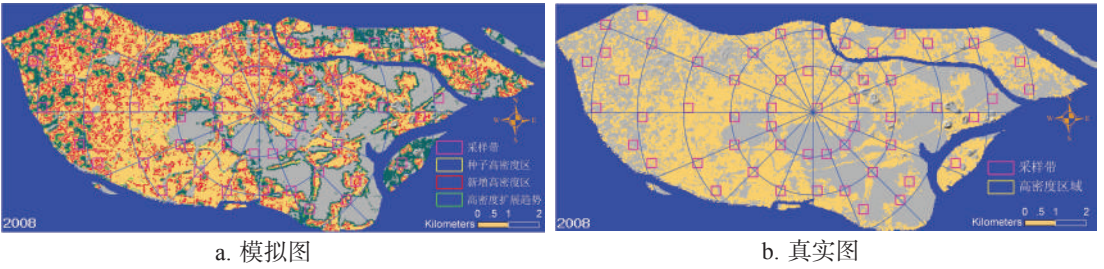


图3 2008年高密度区模拟图与真实图采样带分布

Fig. 3 The sample zone distribution map of simulation map and real map in 2008

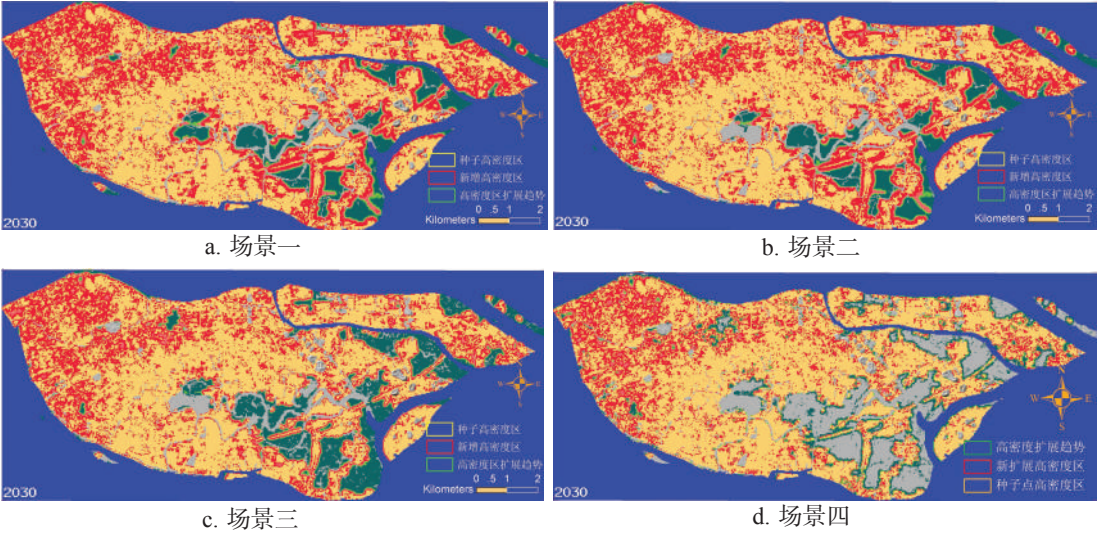


图4 四种场景2030年城市高密度区预测图

Fig. 4 Prediction map of high density city area for four scenarios in the year of 2030

势模拟得到。依据对该模型中不同排除层 (Exclude) 的设置可有不同的预测方案。本文设置四种不同的排除层，进行4种场景的预测模拟。场景一，只考虑坡度，河流，湖泊等自然限制条件；场景二，依据自然限制条件以及政策、规划等因素设置，但不考虑自身以及周围环境城市发展状况；在场景二设置条件基础上，考虑自身以及周围环境城市发展状况，并依据城市化发展快慢分为场景三、场景四，其中场景三是城市化速度较快发展的一种模式。为了降低模型自身的随机作用对预测结果的影响，4种不同情景预测的蒙特卡罗迭代数都设为200次，以2030年为预测年份，得到不同场景高密度城区空间分布预测图(图4)。

图4表明：① 因只有地形、地貌等自然因素限制，场景一中高密度城区扩展速度很快，到2030年除排除层设置的排除区域未被高密度城区化外，仅有少量区域为非高密度区。这是一种粗放式、不可持续的扩张模拟过程。② 场景二在场景一限定条件的基础上，考虑政府的决策以及土地利用规划因素，促使高密度城区扩展区域有所减少，但仍有大量农用地以及低密度或非城市区域仍被高密度建设区代替。因其未考虑不同区域转化为高密度城区的难易程度不同，未考虑发展模式是否合理等因素，仍是一种粗放式、不可持续的发展模式。③ 场景三考虑到不同土地利用类型、不同城市化水平区域，转为高密度城区的难易程度不同，其高密度区扩展范围与同期场景一、场景二模拟结果相比，有了较大程度的减少。但因其设定城市化速度较快，易造成只重质不重量，只追求发展速度不追求发展效率的发展模式，该模式亦不是我们倡导和推崇的最佳发展模式。④ 场景四与场

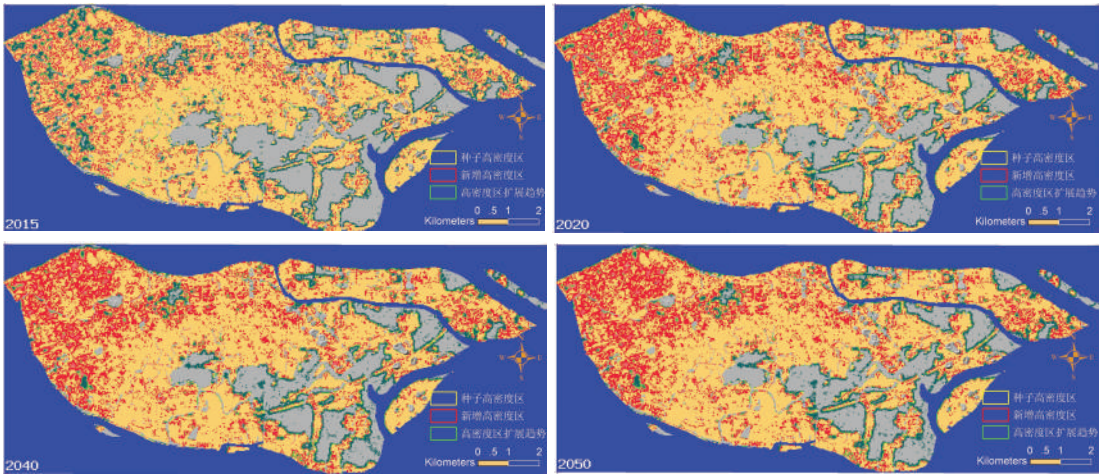


图5 2015、2020、2040、2050年城市高密度区预测图

Fig. 5 The prediction map of high density city area in 2015, 2020, 2040 and 2050

景三模拟预测图相比, 高密度城区扩展范围进一步缩小, 使得研究区东部农用地及低密度或非城市化区域在目前基础上得到最大保存。这是一种在考虑城市化发展内在动力机制的基础上, 考虑质与量相结合, 速度与效率相统一的发展原则, 人为限定城市化发展速度, 尽量维持和改善现有的生态环境, 努力做到可持续的发展模式。由此, 在场景四基础上运用SLEUTH模型对研究区1979-2050年70年时间序列的高密度城区空间分布进行模拟与预测。部分年份模拟空间分布图见图5。

4 结果与分析

尽管从研究区1979-2050年长达70年时间序列的高密度城区空间分布图上, 可以定性描述高密度城区的扩展方向、趋势以及发展速度, 但定量分析方面有所欠缺。基于此, 采用景观指数时间序列分析方法进一步挖掘潜在数据信息, 深层次表达该区高密度城区的时空演变格局。借助Fragstats3.3软件, 参考景观指数内涵^[22-26]。在类型和景观水平选取面积(CA), 最大斑块指数(LPI)、边界密度(ED)、平均最近邻近体距离(ENN_MN)、聚集度(CONTAG)和面积加权平均维数(FRAC_AM)等6个景观指数来反映海珠区1979-2050年高密度城区景观指数变化轨迹(图6)。

图6a为1979-2050年期间高密度区面积指数(CA)、最大斑块指数(LPI)时间序列图。CA值表示高密度区区域面积, LPI值表示最大高密度区区域面积所占该类型斑块总面积的比例, 二者均可表征高密度区区域面积变化状况。图6a中两指数表明: ① 1979-1990年间高密度区总面积较小, 最大高密度区面积值也较小, 这与该区80年代为广州市中心区边缘地带有关。这个时期, 该区以工业发展为主且发展规模较小, 生产与供需不配套, 曾出现“居住河南(海珠), 购物河北”的现象以及“宁要河北一张床, 不要河南(海珠)一套房”的说法; ② 1990-2000年间高密度区面积由921.96 hm²急剧增至3025.62 hm², 这与90年代海珠区兴起的房地产开发热有关。房地产开发作为建设扩展的主导因素, 从政府到地方到个人, 都把房地产作为引领经济发展的首要选择。在这期间, 大量农田变为建设用地, 高密度城区扩展速度和趋势明显; ③ 2000-2008年间高密度区面积仍然增加, 但与1990-2000年期间相比增幅变小许多, 这与政府于2004年后推行的限制房地产开发, 变工业布局为生活布局的政策有关。与此同时随着时间的推移, 高密度区最大面积指数值曾变比率增加态势, 说明高密度区有聚集连片现象出现, 而不是80年代分散零星分布状态;

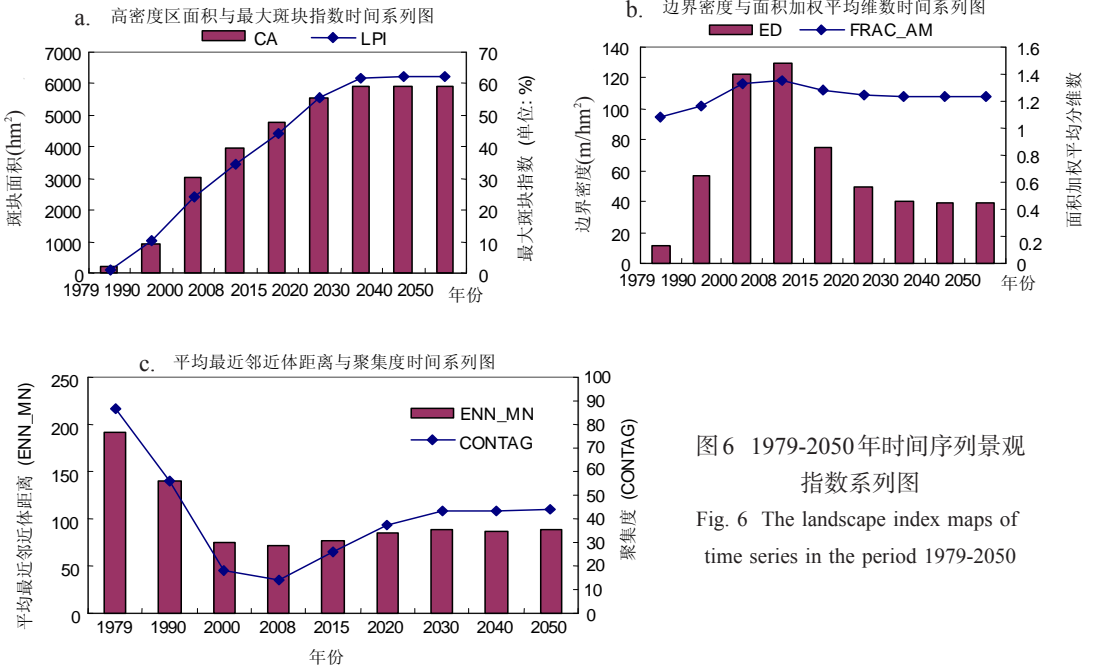


图6 1979-2050年时间序列景观指数系列图

Fig. 6 The landscape index maps of time series in the period 1979-2050

④ 2008-2030年间高密度区CA以及LPI值处于增加状态，但增幅不大，这与政府的土地、城市规划政策以及城市经济发展计划策略有关。效率与公平、数量与质量、生态与环境、可持续发展等议题的提出促使城市建设与发展不再是粗放式、摊大饼式、毫无限制增长而是依据发展决策，适量建设与改造，走可持续发展之路；⑤ 2030-2050年间高密度区CA与LPI值趋于稳定，表明海珠区经20年的发展后高密度区达到一种稳定和饱和状态。这也是实现可持续发展的表现之一。

图6b为1979-2050年期间高密度区边界密度(ED)指数、面积加权平均分维数(FRAC_AM)指数时间序列图。ED描述景观和类型被边界分割的程度，是景观破碎化程度的直接反映。取值范围为ED ≥ 0，无上限。其值越大，表示被边界分割的程度越大，景观越破碎；FRAC_AM可以理解为不规则几何形状的非整数维数，用来测度斑块形状的复杂程度。取值范围：1 ≤ FRAC_AM ≤ 2，当FRAC_AM为1时，表示景观斑块的形状为欧几里德几何形状；当大于1时表示其形状的复杂度提高。由图6b可以看出：① 1979-2008年期间ED、FRAC_AM值都处于增加状态，说明该时期高密度区破碎化程度增加，这说明，这段时期高密度区扩展区域较多，且边界形状不规则复杂程度加剧，这种现象尤以1990-2000年时段表现明显，其原因与该时段CA、LPI变化原因相吻合；② 2015-2030年期间ED、FRAC_AM值有所减小，这说明，未来的10至20年发展中高密度区破碎化程度有所改善，区域边界趋于规正，这与后期的高密度区扩展聚集进一步减小景观破碎度有关。③ 2030-2050年期间，ED、FRAC_AM值均趋于稳定状态，进一步表明该段时期高密度区扩展变动较小，与CA、LPI值描述达到一致效果。

图6c为1979-2050年期间高密度区平均最近邻近体距离(ENN_MN)指数、聚集度(CONTAG)指数时间序列图。ENN_MN度量斑块之间的空间联系性及孤立性，取值范围大于0，无上限，其值越大，表示同类邻体斑块之间孤立性越大，分布越分散；CONTAG反映景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度，通常度量同一类型斑块的聚集程度，但其取值还受到类型总数及其均匀度的影响概率。取值范围为0 ≤ CONTAG ≤ 100，其值为0时表示景观中各斑块类型最大程度上的分散，为100时表示最大程度上的积聚，值越

大, 斑块类型的聚集程度越高。图 6c 表明: ① 1979-2008 年间 ENN_MN、CONTAG 值呈减小趋势, 且 1990-2000 年期间降幅明显, 这说明高密度区的建设扩展, 促使高密度区域之间的联系加强, 孤立型减少, 同时也因高密度区的扩张建设星罗棋布比较分散, 促使描述聚集度指标的 CONTAG 值减小。也潜在表明该时期的高密度区扩展是一种粗放式、蔓延式的扩展, 2000-2008 年时段表明粗放式扩展模式有所改观。② 2008-2030 年间 CONTAG 值呈上升趋势, 且 2008-2020 时段增幅较快, 这主要因为高密度区在原有区域基础上扩展后面积增加, 聚集度相应增加的缘故。而 ENN_MN 值也呈上升趋势在于高密度区聚集度相应增加的同时促使形成越来越明显的区域中心, 导致各高密度区与邻近高密度区联系不是增强反而有所减弱。③ 2030-2050 年间 ENN_MN、CONTAG 值均趋于稳定状态, 与 CA、LPI、ED、FRAC_AM 值表述结果殊途同归, 进一步表明海珠区高密度城区 2030 年后趋于稳定, 变更和扩展状况不明显, 基本达到饱和状态。

除上述分析外, 海珠区高密度城区的扩展格局及变化状况与研究区产业结构, 经济政策, 土地规划决策等因素密不可分。20 世纪 70-80 年代, 海珠区是广州重要的工业基地, 经济发展主要依托工业, 高密度城区自然而然沿着海珠区西部主干道路和工业区蔓延。上世纪 90 年代至本世纪初, 海珠区发展依托地产, 房地产大量开发促使海珠区东南部高密度城区增长和扩展明显。2004 年 7 月“海珠区城市建设总体发展概念规划”专家论证会上提出了“抑制房产, 完善配套”方针, 并构想“一城两片、绿心蓝脉, 四轴四心”的海珠区发展格局, 力图打造“西部宜居”、“东部创业”的现代化生态型城区。上述规划目标对海珠区西部城区工业型向生活型的转变、商业中心的打造以及旧城区环境的改善起着积极的促进作用, 进一步增加了该片区高密度城区的扩展面积; 与此同时, 海珠区东部片区国际生物岛、海洋科技园、瀛洲生态产业园的发展模式对高密度城区的扩展及变化趋势起着重要的导向作用。这也进一步证实基于自然、人文以及城市扩展内在动力机制等条件参数设置的 SLEUTH 场景模拟与其他场景相比具有更高的模拟精度与合理性。

5 结论

本文综合运用遥感、GIS、SLEUTH 模型、景观指数分析等方法对广州市海珠区高密度城区扩展进行模拟预测主要结论为:

(1) 运用单窗算法、V-I-S 模型以及 NSMA 模型相结合方法进行非渗透表面丰度值提取具有较高的精度, 其均方根误差、系统误差分别为 10.03%, 2.65%。参照海珠区实际情形, 以非渗透表面丰度值 ≥ 0.5 界定城区范围, 以非渗透表面丰度值 ≥ 0.8 界定高密度城市区域, 从而为解决城市范围的界定问题, 提供了思路与方法。

(2) SLEUTH 模型可适用于小尺度区域, 且基于自然、人文以及城市扩展内在动力机制等条件参数设置的 SLEUTH 场景模拟与其他场景相比具有更高的模拟精度与合理性。

(3) SLEUTH 模型对海珠区高密度区的模拟结果表明, 自 1979 至今, 海珠区高密度城区以较快扩展速率扩张, 尤以 1990-2004 年间变动增长最快; 未来 20 年其增长速率减缓, 并于 2030 年前后趋于稳定。这种扩展格局及变化状况与研究区产业结构、经济政策、土地规划决策等因素密不可分。

上述研究对广州市海珠区土地、城市规划等具有一定的辅助作用, 有助于拓展其他区域城市土地扩展研究的同时, 也具有一定的方法创新与实践应用价值。但因时间、资料、资金以及自身学术水平等多方面因素的限制, 还有待在非渗透表面丰度值提取方法以及 SLEUTH 模型校准方法方面进行更深入的研究与拓展。

参考文献 (References)

- [1] Arnold Jr C A, Gibbons C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key urban environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [2] Clapham Jr W B. Continuum-based classification of remotely sensed imagery to describe urban sprawl on a watershed scale. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 322-340.
- [3] Yang L, Xian G, Klaver J M et al. Urban land-cover change detection through sub-pixel imperviousness mapping using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(9): 1003-1010.
- [4] Xian G, Crane M. Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 203-215
- [5] Larke K C, Hoppen S, Gaydos L J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 247-261.
- [6] Candau J. Temporal calibration sensitivity of the SLEUTH urban growth model [D]. Santa Barbara: University of California, 2002.
- [7] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling of a cellular automaton model and GIS: Long-term growth prediction for the San Francisco and Washington Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12: 699-714.
- [8] Arthur-Hartranft S T, Carlson T N, Clarke K C. Satellite and ground-based microclimate and hydrologic analyses coupled with a regional urban growth model. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 385-400.
- [9] Carlson T N. Analysis and prediction of surface runoff in an urbanizing watershed using satellite imagery. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(4): 1087-1098.
- [10] Chen Xuegang. The simulation study of urban growth based on cellular automata [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2005. [陈学刚. 基于细胞自动机的城市增长模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005.]
- [11] Zhang Yan, Li Jing, Chen Yunhao. Simulation of Beijing urbanization using SLEUTH. *Remote Sensing Information*, 2007, (2): 50-56. [张岩, 李京, 陈云浩. 利用SLEUTH模型进行北京城市扩展模拟研究. 遥感信息, 2007, (2): 50-56.]
- [12] Xu Xibao. Urban land use dynamic evolution simulation and optimization based on GIS and cellular automata: A case study of Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. [徐昔保. 基于GIS与元胞自动机的城市土地利用动态演化模拟与优化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.]
- [13] Mi Lina. The study of spatial expansion based on SLEUTH model in Yinchuan City [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. [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.]
- [14] Wu C S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93: 480-492.
- [15] Qian Lexiang, Cui Haishan. Using normalized spectral mixture model analysis of urban surface composition. *Land Resources Remote Sensing*, 2006, (2): 64-68. [钱乐祥, 崔海山. 运用归一化光谱混合模型分析城市地表组成. 国土资源遥感, 2006, (2): 64-68.]
- [16] Qin Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karnieli et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466. [覃志豪, 张明华, Arnon Karnieli 等. 用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.]
- [17] Qin Zhihao, Li Wenjuan, Zhang Minghua et al. Single-window algorithm for atmospheric parameter estimation method. *Land Resources Remote Sensing*, 2003, (2): 37-43. [覃志豪, 李文娟, 张明华 等. 单窗算法的大气参数估计方法. 国土资源遥感, 2003, (2): 37-43.]
- [18] Qian Lexiang, Ding Shengyan. Pearl River Delta land cover change on surface temperature effects. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 761-770. [钱乐祥, 丁圣彦. 珠江三角洲土地覆盖变化对地表温度的影响. 地理学报, 2005, 60(5): 761-770.]
- [19] Lu D S, Weng Q H. Use of impervious surface in urban land-use classification. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1/2): 146-160.
- [20] Charles D, Clarke K C. Determination of optimal calibration metrics through the use of self-organizing maps//Institute for Environmental Studies, Amsterdam//Integrated Assessment of the Land System Workshop, 2004, 10: 28-30.
- [21] Dietzel C, Clarke K C. Toward optimal calibration of the SLEUTH land use change model. *Transactions in GIS*, 2007, 11(11): 29-45.
- [22] Herold M, Goldstein N C, Clarke K C. The spatiotemporal form of urban growth: Measurement analysis and modeling. *Remote Sensing Environment*, 2003, 86: 286-302.
- [23] Li Mingjie, Qian Lexiang, Xia Lihua et al. Effects of grain change on landscape indices of landuse in Shantou. *Geography and Geographic Information Science*, 2008, 24(6): 93-96. [李明杰, 钱乐祥, 夏丽华 等. 汕头市土地利用景观指数粒度效应初探. 地理与地理信息科学, 2008, 24(6): 93-96.]

- [24] Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Liding. Effects of grain change on landscape indices. *Quaternary Research*, 2003, 23(3): 326-333. [赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 景观指数的粒度变化效应. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 326-333.]
- [25] Lu Ling. Analysis on the landscape structure and change of the Heihe River Basin [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, 2000. [卢玲. 黑河流域景观结构与景观变化研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2000.]
- [26] Wu Jianguo. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 185. [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: 185.]

The SLEUTH Model Simulation of High Density Urban Sprawl in Haizhu District of Guangzhou City

LI Mingjie^{1,2,3}, QIAN Lexiang¹, WU Zhifeng⁴, CUI Haishan¹, HOU Xiyong²

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, Shandong, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: High-density urban area is the core of urban region and the source of urban sprawl. Its precise identification and expansion simulation are receiving more and more attention. This study used Landsat image data of 1979, 1990, 2000 and 2008 in the Haizhu District of Guangzhou city as basic data sources, in combination with Vegetation-Impervious-Soil Model and Normalized Mixing Spectral Analysis Model. It was also aided with the Land Surface Temperature data inverted by mono-window algorithm as modification to extract highly precise percent impervious surface and to represent the high-density urban area by setting an appropriate threshold for the impervious surface fraction. We ran the SLEUTH Model to simulate and predict the high-density urban sprawl of the study area from 1979 to 2050 in four scenarios, then used the landscape indices method to analyze the spatial and temporal patterns for the 70-year time series of high-density regions. The major conclusions can be drawn as follows. The SLEUTH model is suitable for simulating the sprawl of small-scale region. The excluded layer parameters of the SLEUTH model based on the natural and social dynamic mechanism of urban expansion and other conditions produced more accurate simulation results. The SLEUTH model simulation analysis results show that Haizhu District has been developed at a rapid rate of high-density urban expansion since 1979, particularly in the period from 1990 to 2004 when it witnessed a much faster growth change. In the next 20 years (from 2008-2030), its growth rate would be relatively low. In the 2030s, there would be a stabilized situation in the study area and the sprawl pattern would be closely related to the factors of industrial structure, economic policy and land planning.

Key words: percentage of impervious surface; high-density urban area; SLEUTH Model; Simulation; Haizhu District of Guangzhou City