

基于空间句法的扩张强度指数及其在城镇扩展分析中的应用

王海军^{1,2}, 夏 畅¹, 张安琪^{1,3}, 刘耀林^{1,2,4}, 贺三维⁵

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079;
3. 北京大学城市规划与设计学院, 深圳 518055; 4. 武汉大学地理空间信息技术协同创新中心, 武汉
430079; 5. 中南财经政法大学公共管理学院, 武汉 430073)

摘要: 扩张强度指数(Expand Intensity Index, EII)是目前城市扩展数量特征研究的常用指标,用以表征城市扩张程度和速度,但该指标是从城市扩张的结果,即从城市用地面积变化角度对物质空间变化的简单描述与分析,忽略了人在空间中的感受,未能从城市扩张的动因角度揭示城市扩张特征,缺乏对城市外部空间形态演变模式的深入研究,不能反映人在城市扩展空间上的活动。本文从交通网络对城市扩张的驱动作用入手,基于空间句法,提出一种新的扩张强度指数——基于空间句法的扩张强度指数(Space Syntax Expand Intensity Index, SS-EII),SS-EII包涵可反映空间集聚和离散程度的句法变量,可用于分析空间可达性的变化等情况。与传统扩张强度指数相比,SS-EII是基于空间句法从城市扩张的驱动力方面计算扩张强度,不仅关注城市扩张的结果,同时关注交通对城市扩张模式、方向的导向作用和主观感知下城市空间的变化。将SS-EII应用于广东省棉湖镇2002-2014年期间的城镇扩展特征分析中,研究结果表明,SS-EII可用于分析比较建成区不同方向的扩张速率与建设状况,其计算结果与棉湖镇建成区实际扩张情况相符,与EII相关度 R^2 达0.95以上。

关键词: 空间句法;扩张强度指数;城镇扩展;广东省棉湖镇

DOI: 10.11821/dlxb201608002

1 引言

城市是经济社会活动集聚地,也是区域人口密集、产业集聚、政治经济发展迅速的中心地带。城市发展的战略及其空间结构优化是城市研究者关注的焦点之一,如何实现对城市增长的有效控制,保证城市健康发展是城市发展亟待解决的重要课题^[1]。解决这一问题,掌握城市扩张特征是前提。

分析城市边界扩展特征的方法众多,主要包括GIS空间分析、景观格局和数理统计等。研究者们通常采用扩张强度指标,反映建成区空间扩展速率;用紧凑度指数、分形维数、重心指数、放射状指数等指标反映建成区空间扩展形态变化;采用等扇区分析法

收稿日期: 2015-09-25; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571384); 国家基础科学人才培养基金项目(J1103409); 国土资源部土地资源调查评价项目(DCPJ161207-01) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571384; Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China, No.J1103409; Land Resources Survey and Evaluation Project of Ministry of Land and Resources of China, No.DCPJ161207-01]

作者简介: 王海军(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事地理模拟、土地利用覆盖变化和土地资源评价等研究。

E-mail: landgiswhj@163.com

通讯作者: 张安琪(1992-), 女, 硕士生, 主要从事城市与区域规划、地理模拟等研究。E-mail: 630331509@qq.com

来比较不同方位建成区空间扩张差异^[2-4]。由刘盛和等^[5]提出的城市扩张强度指数(Expand Intensity Index, EII)是指单位时间内建成区面积增长率,本质是经过面积标准化后的建成区年平均增长速率。城市面积的扩大是城市扩张最直观的表现^[6],基于此计算的城市扩张强度是目前使用最多的,用于描述城市扩张程度和速度的指标^[7],可分析比较不同时期城市沿不同方向扩展的快慢、强弱和趋势。随后刘小平等又提出景观扩张指数^[8],通过建立最小包围盒,来识别景观扩张的3种类型,即填充式、飞地式、边缘式,并将其应用于城市扩张领域,实现了定量识别城市扩张类型。

但现有的城市扩张强度指数只是侧重对城市用地面积的变化进行简单描述与分析,是对物质城市空间的描述,忽略了人在空间中的感受,未能从城市扩张的动因角度揭示城市扩张特征,缺乏对城市外部空间形态演变模式的深入研究,不能反映交通对城市扩张的导向作用和人在城市扩展空间上的活动。本文提出一种新的扩张强度指数——基于空间句法的扩张强度指数(Space Expand Intensity Index, SS-EII),是通过交通状况的变化来定量刻画城市扩张速率,与传统扩张强度指数相比,SS-EII从推动城市扩张的重要驱动力之一的交通系统入手,不仅关注城市物质空间扩张的结果,同时关注交通格局引导下城市空间扩展的发展模式和方向,反映人主观感知下的城市空间变化。

2 交通网络与城市空间扩张

在城市化进程的推动下,城市功能不断变化,城市空间发生位移与扩张,农用地向建设用地演替,城市外部空间形态随之演变。城市空间扩张主要有4种方式:同心圆式扩张、星状扩张、带状生长和跳跃式生长。其中星状扩张模式是城市演替的主要形式,是指城市沿主要道路辐射扩张的模式。4种扩张模式的本质都是沿发展轴(Development Axis)发展,即沿城市交通干线发展的最优方向发展。均匀发展轴下城市呈星状扩张,发展轴过密或进一步向心发展转变为同心圆式扩张;若某条发展轴具有明显优势则转变为带型发展^[9]。大量研究指出城市沿可达性高的交通干线发展,交通系统对城市空间形态有重要影响^[10-12]。

城市交通系统的建设引导着城市扩展的发展模式和方向,同时也是推动城市扩张重要驱动力。城市边界扩展必然带来对交通需求的增加,推动城市边缘的交通建设,而交通状况的改良又将反作用于城市,提升城市边缘地带的可达性,从而增大了人们的出行半径,带动更多的人向城市边缘移动,进而改变城市周边土地区位条件,引发土地利用结构的演变,形成城市发展轴,推动城市向外更快的发展。潘竞虎等^[13]研究1990-2010年中国62个主要城市的空间形态变化特征,并得出主要城市基本都呈星状扩张,交通状况的改变是城市空间扩张最直接的原因之一。吴宏安等^[14]提取西安城市边界信息,分析认为是政策指引下固定资产投资的增加、经济发展、人口增加和交通等基础设施的完善推动了西安的城市扩张。刘涛等^[15]通过对既有文献的梳理、归纳,从不同视角得出城市扩张的核心驱动力,并肯定了交通对城市扩张的推动作用。城市研究者普遍认为推动城市扩张的驱动力主要包括社会经济的发展,人口的增长,居住环境的改善,交通系统等基础设施的完善和国家政策的转变等^[16-19]。

城市交通和城市扩张、土地利用开发密切相关,在城市拥堵问题越来越严重、城市病态发展的背景下, Peter^[20]提出了TOD(Transit-Oriented Development)城市发展模式理论。公交导向型的土地开发被视为可以引导城市有序发展,塑造良好城市结构的发展方式,为控制中国城市无序蔓延式发展提供了有效途径^[21]。作为发展中国家,中国具有实

施TOD模式的先天优势,并已引发国内各界的广泛关注。TOD模式下,交通格局对城市发展的导向作用及其与城市扩张的关系将更加密切。关于二者的关系,现有的研究多从宏观层面对其进行定性分析,如闫小培等^[22]提出交通系统的发展能够引起土地利用价格、用地布局特征和城市空间形态的变化;反之,土地利用特征的改变也能作用于交通网络,引起其格局、密度及交通模式等特征的改变。毛蒋兴等^[23]分析并论证了城市交通系统建设对沿线土地利用存在的廊道效应和对土地开发存在的刺激作用,进而得出城市交通建设对城市空间演化具有重大影响。目前,关于交通系统与城市扩展特征间关系的量化研究较少,而基于交通网络研究城市问题的空间句法的出现,为研究二者间定量关系提供了良好理论基础。

3 空间句法

空间句法,是由英国伦敦大学Hillier教授提出,以空间形态分析为基础的分析城市空间的方法。它是通过形态分析变量来定量描述位于城市自由空间中的交通线路的空间属性。连接值^[24]、控制度^[25]、深度值^[25]和整合度^[26]是传统空间句法模型的主要形态分析变量,后又衍生出选择度^[27]指标。空间形态分析变量是通过构建线段地图,并借助计算机软件得到。空间句法是依据“最少且最长”的原则,用很长轴线来描绘和抽象城市交通网络,得到轴线地图,并可通过软件转译为线段地图。用轴线来描绘可通视的空间,表达人在空间中的主观感受,即一条有转折的道路会带给人多个空间层次感,人根据道路的邻接关系来识别行走而不是依据道路的实际距离^[28]。

空间句法自出现以来,已被国内外学者广泛用于城市空间问题的分析^[29-35],并在实证中得到不断地验证和完善,其合理性得到普遍认可。虽然空间句法目前在城市边界扩展方面的研究成果较少,但本文认为空间句法具备研究城市扩展的优势条件,归纳如下:

(1) 空间句法能通过交通格局变化解释城市扩张过程。城市空间复杂多变,以往对其研究多着重于分析经济和社会因素,认为城市空间的形态和模式是它们在地域上的投影,是经济和社会过程塑造了物质城市,社会和经济因素才是推动城市扩张的根本原因。空间句法则首要关注已经形成的城市物质空间,认为交通网络对城市进行了分割,形成了现有的城市结构。交通网络本身是决定运动的因素之一,通过其对运动的影响塑造土地利用模式,不同类型的土地会在这种运动下找到合适的位置,如商业用地会移动到网络中的人流汇集处,而其他类型土地则会移动到人流相对较少的地点^[36]。大量文献已经证实,空间句法通过交通网络结构可以对城市土地利用空间结构和形态演变进行分析^[37-39]。在空间句法的思想下,城市被看作网络,任何局部网络变化都将改变整个城市空间网络结构,进而引起网络中运动的变化。城市外围交通系统的完善,使边缘地带的运动增强,人流聚集程度增强,吸引了与之前不同类型的土地,形成新的土地利用模式,表现为城市的不断向外扩展。

(2) 空间句法能描述交通网络结构对城市扩张的影响。空间句法解释了人在空间中的行为与空间形态本身的关系,认为交通网络很大程度上决定人的行为,人在空间中的运动形成了不同层级的交通网络。这种方法可以描述交通网络的发展变化过程,准确把握城市空间中运动的分布。交通网络格局的变化会引起空间可达性、城市中运动的分布状况和土地利用空间结构等发生变化。城市边缘空间可达性增强,城市空间中运动分布范围逐渐变大,城市边缘运动和商业用地比例增加都是城市扩张的重要表现形式,已有研究证明空间句法可以通过形态分析变量值的变化来反映交通系统完善带来的这些变

化。白永平等^[40]、李江等^[39]和鲁海军等^[41]等分别采用空间句法中的整合度指标，实现对关中—天水经济区和武汉市的空间可达性分析。Wang等^[42]、Shen等^[43]和盛强等^[44]等分别对深圳、天津、北京进行研究证明空间句法整合度指标与商业用地比例呈正比；A van Nes等^[45]以欧洲的城镇为研究对象，基于空间句法分析道路建设与城市变化的关系，并研究环形道路对零售商店分布的影响；Hiller等^[46]基于空间句法提出人、车出行受城市内街道网络的可达性结构影响；Turnal等^[47]通过50个案例分析证实空间句法选择度指标与车流量的相关性在0.6以上。各区域交通状况变化各异，导致各地可达性、运动分布和用地结构等变化不尽相同，即城市不同区域扩张强度各异。通过空间句法得到的形态分析变量变化值的大小可以反映交通网络不同程度变化带来的城市扩张差异。

(3) 空间句法在定量描述交通网络结构中具有优势。城市空间与交通网络结构密切相关。对城市结构的研究多采用抽象的拓扑网络展开，但这种方法只能反映纯粹的空间拓扑关系，未从人对空间结构的感知出发研究城市空间，忽略了人在城市空间中的移动，缺乏对空间社会性认知的表达。空间句法是借助计算机来量化研究具有社会学意义的空间构成关系的理论和方法，是在对物质性城市空间进行客观的拓扑分析基础上，又顾及人在运动中对城市空间的主观感知^[8]，因而基于空间句法对交通网络结构的描述更为科学合理。

鉴于交通网络与城市空间扩展的密切联系和空间句法在描述交通网络及其对城市扩张影响中的特有优势，本文认为用空间句法来描述城市扩张特征切实可行。

4 基于空间句法的扩张强度指数

基于空间句法的形态分析变量众多，对交通网络包括密度在内的众多特征进行了详细刻画，其中全局变量适用于分析区域整体状况，而局部变量则反映一定空间尺度范围内的局部特征。整合度（Integration）是空间句法的特有概念，是一个空间到其他空间最短路径之和的倒数，可用于衡量空间的集聚和离散程度。整合度高的地方，往往是城市中人流、车流量大、土地利用率高、地价昂贵的中心地段。

根据空间句法各变量的计算过程可以发现，控制度在连接值基础上计算得到，平均深度值又是计算整合度的中间变量，深度值可以反映一条道路到达其它所有道路的难易程度，因此可以用整合度来反映网络的通达性^[48]。整合度与其他形态分析变量具有较高的相关性，句法变量可以反映空间可达性、运动分布（如人流量和车流量等）、土地利用方式（如商业用地分布）和地价^[49]等与城市扩张强度相关的信息，故可通过整合度指标的变动推算一个区域的扩张强度。

本文将空间句法应用于城市扩张，从交通系统对城市扩张模式和方向的导向作用及交通网络变化对城市空间格局的影响出发，定量研究城市扩张的程度与速率，提出基于空间句法的扩张强度指数。该指数是指单位时间内，建成区局部整合度指标的变化率。以扩展后的建成区为研究对象，选取合适最小单元建立格网，根据传统城市扩张强度计算公式，可采用下式计算基于空间句法的扩张强度指数：

$$SS-EII = \frac{|\Delta I|}{\Delta T \times I_0} = \frac{|I_t - I_0|}{\Delta T \times I_0} \quad (1)$$

$$I_0 = \frac{\sum_{i=1}^n I_{0i}}{n}; \quad I_t = \frac{\sum_{i=1}^n I_{ti}}{n}$$

式中：SS-EII为基于空间句法的扩张强度指数； I_0 为拓展前研究区内各个格网点局部整合

度值; I_i 为拓展后研究区内每个格网点局部整合度平均值; I_{0i} 为拓展前研究区内第 i 个格网点局部整合度值; I_{1i} 为拓展后研究区内第 i 个格网点局部整合度值; ΔI 为拓展前后研究区内局部整合度指标值变化量; n 为拓展后建成区内格网总数; ΔT 为变化前后时间间隔。

与传统扩张强度指数相比, SS-EII 突破了传统意义上的城市扩张速率, 不再只关注对物质城市空间的描述, 即城市用地面积的变化, 而是采用空间句法建立起人主观感知下的空间, 从推动城市扩张的原动力入手, 关注城市扩展模式以及交通网络建设带来的城市扩张的具体表现。城市建设用地面积的变化并不能充分说明城市开发的强度, 相同的面积变化可以采用高密度的开发方式, 也可以采用低密度的, 甚至不能排除有闲置的状况, 采用原有测算方法, 可能会造成对某些区域扩张强度错误的估计。而 SS-EII 包涵整合度指标, 可用于分析空间可达性、运动分布、商业用地分布、地价等的变化情况, 在给出城市扩张强度的同时, 也对应着对相应扩张强度的解释和对相应区域发展状况的基本描述, 更能反映扩展区域的实际开发强度。根据研究者设定的 SS-EII 指数统计单元, 如: 一个网格单元、城市扩展的一个方向或整个研究区等, 可实现对不同尺度下空间扩展强度的测度。

5 研究区概况与数据处理

本文选取广东省棉湖镇为研究区域, 利用 GIS 和遥感技术提取棉湖镇 2002 年、2008 年、2014 年 3 个时期的用地信息, 绘制线段地图对城镇边界扩展特征进行分析。棉湖镇地处广东省揭阳市揭西县的东南部, 是揭西县的主要出入门户, 东连洪阳赤岗镇, 西隔榕江与凤江镇相望, 南临大坝镇, 北与榕江、东园镇相接, 镇域面积 30 km²。棉湖镇内地形起伏不大, 地势中心高四周低。棉湖镇的经济总量常年位居全县首位, 其经济增长速度也在全县居于前列, 表现出良好的经济成长性, 但工农业比例失调, 是一个工业占有绝对优势的工业型城镇。

以 2002 年、2008 年、2014 年遥感影像图为底图, 提取城镇建成区边界, 绘制线段地图 (图 1), 并计算局部整合度 I 指标值, 根据棉湖镇的面积大小, 将局部尺度的研究范围定为 800 m。

依据流程图 (图 2), 以 2014 年棉湖镇建成区重心为原点 (大地坐标: $X = 39412442.62$ m, $Y = 2593036.52$ m), 从北偏东 22.5° 开始, 用 8 个相同的扇形将棉湖镇划分为 8 个子区域, 获取棉湖镇建成区分扇区图 (图 3) 及传统方法计算的拓展特征数量指标。

以线段地图为底图, 在棉湖镇建立 30 m×30 m 的网格, 参考《城镇土地分等定级规程 GB/T 18507-2014》中道路通达度作用分算法, 将描述线段的形态分析变量赋值给格网, 其中道路级别由收集到的道路数据 (道路类型、宽度等) 计算, 作用

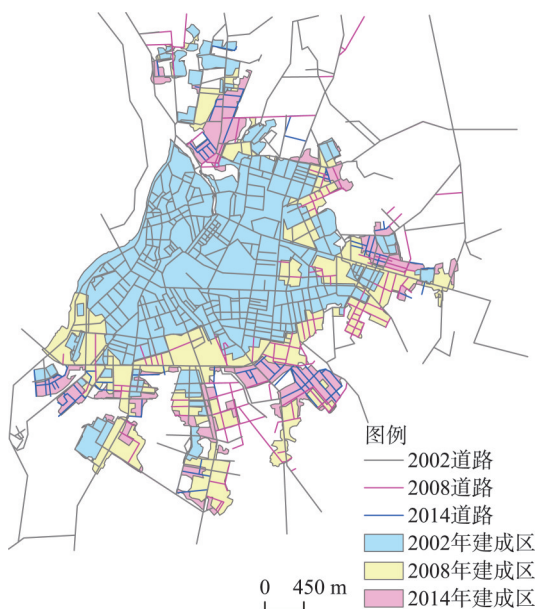


图 1 棉湖镇线段地图

Fig. 1 Segment map of Cotton Lake Town



图2 边界扩展特征分析流程

Fig. 2 The flow chart of characteristics of boundary expansion

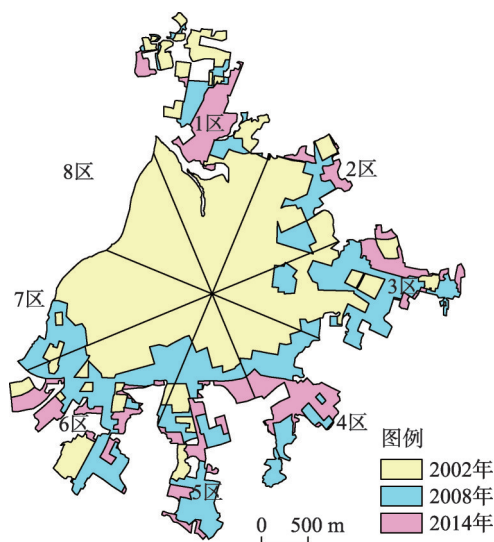


图3 不同时段棉湖镇建成区分扇区图

Fig. 3 The sector map of the built-up area of Cotton Lake Town in different periods of time

半径按照建成区面积与各级别道路总长度计算得到^[50]。各路段作用半径内的网格点通达度随其到该路段的距离按指数衰减。对于不同研究时段，计算每个网格点的SS-EII指数值，再分别分扇区对建成区内部格网点的局部整合度指标值进行统计分析，得到不同时期各个分区的局部整合度的平均值，计算每个分区SS-EII，并进一步与传统方法得到的城市扩张强度指数（EII）对比。

6 应用及结果分析

6.1 棉湖镇交通网络变化特征初步分析

(1) 2002-2008年，棉湖镇建成区及其周边道路建设迅速，新增路段89段，新增道路总长度达30多km。其中南部和东部交通网络扩充迅速，棉湖大道南部和东部新增路段总长度占总增长的77.2%。2008-2014年，棉湖镇道路稳步增长，但增长速率有所放缓，新增路段60段，累计道路总长增加超过17km，其中东南部和北部扩充较为明显。根据道路对土地开发的导向作用，初步判断棉湖镇建成区有明显的向外扩展，2008年前的扩张强度大于2008年后；前一时段建成区以沿棉湖大道南侧的花园路、湖西路、湖坡路和东侧的道江东路沿线开发建设为主，向南部和东部扩张；后一时期则向湖坡路南段两侧沿东南部扩展为主，沿棉东路向北部扩展为辅。

(2) 局部交通网络格局的变化会引起整个交通网络结构变化，对变化区域网络空间的影响更为显著。棉湖镇建成区整合度最高的区域集中分布在道江西路和兴华路与棉湖大道交汇处，即棉湖镇建成区的交通中心。研究区交通系统的发展会使系统内全局整合度值均提升，除新增路段外，全局整合度有明显提高的路段主要是连通性好，聚集能力强的区段，而并非新增路段周边区域，通过全局整合度不能判断产生变化的来源。而局部整合度显著增加的路段则集中分布于交通网络结构变化明显的区域。全局整合度能反映系统内交通网络的集聚和离散状况，而局部整合度则能实现对交通网络引发的局部区

域变化更准确地刻画。整合度指标携带了局部空间可达性等信息,初步判断2002-2008年内城镇南部局部整合度提升明显,即该区域空间可达性得到明显改善,有更多的人、车流向该区域移动,农用地向建设用地转变,城市扩张强度较大;2008-2014年的建成区东南部和北部有相似变化(图4)。

6.2 基于SS-EII的棉湖镇建成区扩张强度特征分析

采用基于局部整合度的SS-EII分析建成区扩张特征,可以得到以下结论:

(1) 棉湖镇扩张呈现明显的交通导向特征。2002-2014年,区域整体呈现沿主要交通干道扩展的星状扩展模式,SS-EII指数为0.023,城镇扩展强度与交通网络变化表现出明显的一致性。研究时段内各方向扩张强度变异系数较大,说明各区域扩张强度不一,总体来看,城市扩张以南为主,并逐渐向北转移。从微观尺度上看,扩张强度最大的点集中在东南部和北部,这两个区域表现为小范围集中开发建设;而城镇南部、西南部和东部扩张强度值空间分布差异较小,表现为大范围稳步开发。

(2) 2002-2008年,棉湖镇建成区的SS-EII指数为0.027,高于这12年间的平均水平,建成区这一时期呈高速扩展的状态。城镇南部和东部主干道两侧路网完善,成为城镇主要发展轴,城镇沿发展轴向南、向东扩展明显。微观尺度下计算的SS-EII指数,高值散落分布于南部和东部区域(图5),建成区内不存在大面积的高强度开发;宏观尺度上,以正南方向城市扩张强度最为突出,SS-EII指数明显高于同期平均水平(表1),达0.07,城西受限于河流,并无扩张,对应SS-EII指数接近0。整体来看,这一时期棉湖镇呈现以正南方向为核心,带动周边东南和西南方向的高速扩展,城市南部空间可达性明显增强,棉湖大道南段发展迅速,商业活动明显增多;扩张强度最弱的方向是西北、正

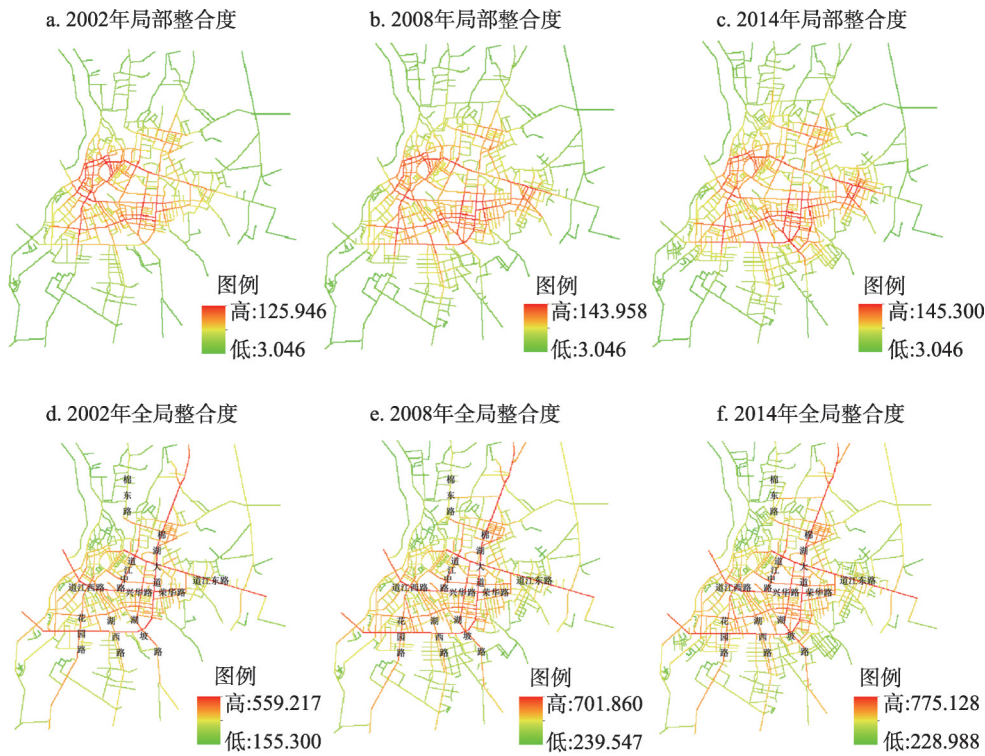


图4 2002-2014年棉湖镇整合度分布

Fig. 4 Integration distribution maps in Cotton Lake Town in 2002-2014

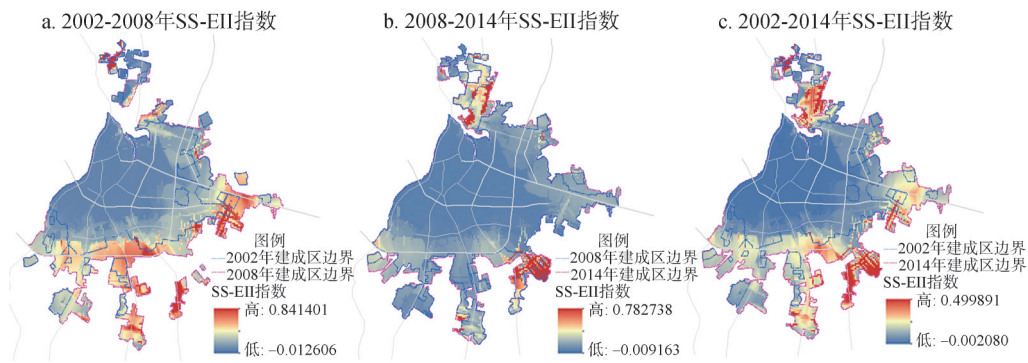


图5 2002-2014年棉湖镇建成区各网格单元SS-EII分布

Fig. 5 SS-EII distribution map of each grid cell in he built-up area of Cotton Lake Town in 2002-2014

表1 棉湖镇建成区各时期EII与SS-EII对比

Tab. 1 The comparison between EII and SS-EII of the built-up area of Cotton Lake Town in different periods	
传统方法 EII	空间句法 SS-EII 相关性(R^2)
	0.964
	0.954
	0.958

西和东北方向。

(3) 2008-2014年, 城镇扩展速率放缓, 全区 SS-EII 指数为 0.014, 建成区呈现多翼状缓慢扩张趋势, 城镇东南方向和正北方向构成这一时期城镇高速扩张的两个主轴线。微观尺度上扩张强度大的集中分布在东南部和北部区域, 具体表现为两大住宅小区建设项目在城镇东南部启动, 东南部和北部区域被集中开发建设, 是城市这一时期发展的重点(图 5); 而西南和正南、正东方向局部扩张强度很大的点并不存在, 但各网格单元的扩张强度相对较为均衡。宏观尺度上建成区在沿原发展轴稳步扩展的同时, 城镇北部通往东园镇的棉东路形成新的发展轴, 城镇北部土地开发明显增强; 东南部通往普宁大坝的湖坡路超越正南方向的湖西路成为最具优势发展轴, 但相较前一时期总体的扩张速率仍有所放缓。城镇东部则在两个时期均保持稳定扩张速率, 维持快速增长态势。

6.3 SS-EII 指数检验

比较利用传统方法计算的各扇区扩张强度 EII 与基于空间句法的计算的扩张强度 SS-EII, 对 SS-EII 的科学性进行定量评估(表 1)。由于整合度指标反映的是不同道路通达度的相对大小, 并不具有绝对意义, 在此基础上计算得到的 SS-EII 指标, 可用于反映不同区域城市扩张的强度, 但与 EII 两者取值本身并不具有可比性, 因而主要对 EII 与 SS-EII 计算结果中各扇区扩张强度的相对大小进行对比。

棉湖镇建成区在研究时段内扩张迅速, 总面积增长 436.23 hm², 面积增长率达 75.6%, 其中仅 2002-2008 年 6 年间增长了 293.35 hm², 新增城镇建设用地区域内基础设施不断完善, 道路路网纵横交错, 而 2008 年后发展速度相对放缓, 与 SS-EII 指数分析结果相同。棉湖镇建成区不存在占地而未开发的状况, 各个方向的开发密度相近, 两种分析方法得到的雷达图形状相似, 即对各年份相对扩张强度关系判断一致, 两者相关度高达 95% 以上, 两种分析方法结果具有相似性, 采用空间句法进行城镇边界扩张强度分析具有可行性。

2002-2008 年, 正东方向 SS-EII 指数略大于东南方向, 而 EII 指数则相反。虽然正东方向面积扩展较大, 但其面积基数大, 而东南方向面积基数较小, 因此采用 EII 指数得到的东南方向建成区面积增长更快。但由微观尺度下得到的 SS-EII 值可知正东方向各点空间扩张强度都很大, 空间可达性得到明显改善, 集聚程度提升明显, 沿道江东路和荣华路发展态势良好; 而东南方向 SS-EII 分布空间差异较大, 部分区域的空间可达性并没有明显改善, 发展仍然受限, 需要进一步开发。

据《棉湖镇总体规划(2003-2020)》, 棉湖镇 2002-2004 年居住用地以老城(镇)区为起点, 向南部和东部逐渐呈半圈层式扩张, 而北部则以农田为主, 发展较为缓慢。规划还制定棉湖近期(2003-2005)发展方向将移向南部地区, 将南部作为近期发展的主导方向, 北部作为近期发展的辅方向, 远期(2003-2020)发展的主方向。依据 SS-EII 指数得到的研究时段内棉湖镇空间扩展趋势及主要扩展轴线分析结果(表 2)与棉湖镇制定的规划中的发展重点一致, 也与在棉湖镇的实际调查走访结果相同。

以上结果表明, 基于空间句法的扩张强度指数能够很好的定量描建成区扩张的程度与速度, 同时能够更准确反映研究区扩张强度的微观差异。

表 2 2002-2014 年棉湖镇建成区空间扩展趋势及主要轴向
Tab. 2 Summary of the space expanding trend and
main axis of the built-up area of Cotton Lake Town in 2002-2014

时间段	总体扩展趋势	主要扩展方向	次要扩展方向
2002-2008 年	高速扩展	正南	东南、西南、正东
2008-2014 年	缓慢扩展	东南、正北	正南、西南、正东
2002-2014 年	快速扩展	正南、东南	西南、正东、正北

7 结论

目前的扩张强度指数算法是从城市扩张结果的角度计算扩张的程度, 侧重对城市用地面积变化进行简单直白地描述, 只是从物质的角度研究城市, 忽略了人的感受, 缺乏对扩张根本原因及扩张区域发展状况的深入研究, 并未考虑交通对城市扩展模式和方向的导向作用。本文提出的扩张强度指数, 是基于空间句法的思想, 顾及城市扩张的重要驱动力, 构建人主观感知下的城市空间模型, 从城市边缘交通状况的改善会推动城市快速向外发展的角度, 通过分析能够反映空间可达性、空间中的运动和土地利用模式等信息的句法变量, 反映城市扩展强度状况, 是对传统扩张强度指数的良好补充。

本文利用基于空间句法的扩张强度指数来研究广东省棉湖镇建成区 2002-2008 年、2008-2014 年的扩张过程, 分析其边界扩展特征, 并得出以下结论:

(1) 交通状况改善是城市扩张的驱动力之一, 交通对城市发展模式和方向具有重要的导向作用, 交通网络格局演变所引起的城市空间的一系列变化可以反映城市扩张的强度。SS-EII 指数从城市扩张的推动力——交通网络, 来分析城市扩张, 不仅能够反映扩张的强度, 更重要的是蕴含着对扩张强度高低的合理解释, 是对城市扩张强度更全面的描述。

(2) 基于空间句法的扩张强度指数能够从微观和宏观两个视角, 网格、扇区和研究区 3 个尺度定量描述区域扩张的程度、速度及交通网络结构变化所引起的城市空间的一系列变化, 并且其计算结果与传统扩张强度高度相关, 具有科学性, 可用于分析城市扩张的趋势和主要扩展轴向。在进行城市规划时, 可通过规划交通网络和现有交通网络计算 SS-EII 指数来测度城市未来扩张强度, 实现对城市扩张状况的预估, 为改进和完善规划方案提供依据; 根据预估的城市发展状况, 规划者可以合理调整城市交通网络结构, 严格把控道路等的新修与改造, 采用 TOD 模式引导城市土地利用开发, 来实现对城市盲目扩张的控制; 在重点扶植发展的区域, 通过交通等基础设施的合理建设, 来构建城市发展轴促进区域更快的发展。

(3) SS-EII 指数能够反映人主观感受下城市空间的变化, SS-EII 值高的区域往往就是可达性明显增强, 人、车流量加大, 适合商业发展, 地价提高的区域, 可以为政府划定城市土地利用类型, 确定基准地价提供参考。

(4) 本文通过对棉湖镇建成区扩张特征的分析实现对 SS-EII 指数的应用和检验, 但棉湖镇交通网络结构简单, 不存在轨道交通等复杂的道路系统, 通过 SS-EII 来实现对更为复杂大城市的扩张强度分析值得更深一步研究。

参考文献(References)

- [1] Fang Chuanglin, Chen Tian, Liu Shenghe. China's urban geography marching into the new era: The achievements and perspective of urban geography and urban development since 1940. *Progress in Geography*, 2011, 30(4): 397-407. [方创琳, 陈田, 刘盛和. 走进新时代的中国城市地理学: 建所 70 周年城市地理与城市发展研究成果及展望. *地理科学进展*, 2011, 30(4): 397-407.]
- [2] Guan Xingliang, Fang Chuanglin, Zhou Min, et al. Spatial and temporal characteristics of spatial expansion of urban land in Wuhan urban agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1447-1459. [关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 武汉城市群城镇用地空间扩展时空特征分析. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1447-1459.]
- [3] Guan Xingliang, Hu Shilin, Lan Xueqin, et al. Dynamic pattern of urban land expansion and its mechanism in Wuhan urban agglomeration. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(11): 1493-1501. [关兴良, 胡仕林, 蔺雪芹, 等. 武汉城市群城镇用地扩展的动态模式及其驱动机制. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(11): 1493-1501.]
- [4] Liu Xiaoping, Ma Lei, Li Xia, et al. Simulating urban growth by integrating landscape expansion index (LEI) and

- cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(1): 148-163.
- [5] Liu Shenghe, Wu Chuanjun, Shen Hongquan. A GIS based model of urban land use growth in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 407-416. [刘盛和, 吴传钧, 沈洪泉. 基于GIS的北京城市土地利用扩展模式. *地理学报*, 2000, 55(4): 407-416.]
- [6] Zhang Zhanlu. An analysis of driving forces of urban land expansion in Beijing. *Economic Geography*, 2009, 29(7): 1182-1185. [张占录. 北京市城市用地扩张驱动力分析. *经济地理*, 2009, 29(7): 1182-1185.]
- [7] Erdeniqigigel, Alatengtuya, Wudun. Evolvement characteristics of urban form of Hohhot in nearly hundred years: A GIS study. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 41(6): 675-680, 157-161. [尔德尼其其格, 阿拉腾图雅, 乌敦. 基于GIS的呼和浩特市近百年城市形态演化特征研究. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2012, 41(6): 675-680, 157-161.]
- [8] Liu Xiaoping, Li Xia, Chen Yimin, et al. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1430-1438. [刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. *地理学报*, 2009, 64(12): 1430-1438.]
- [9] Duan Jin. *Urban Spatial Development Theory*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2006: 144-149. [段进. *城市空间发展论*. 南京: 江苏科学技术出版社, 2006: 144-149.]
- [10] Schaeffer K H, Sclar E. *Access for All: Transportation and Urban Growth*. Baltimore, MD: Penguin, 1975.
- [11] Giannopoulos G A, Curdes G. Innovations in urban transport and the influence on urban form. *An historical review. Transport Reviews*, 1992, 12(1): 15-32.
- [12] He Ning, Gu Baonan. An analysis of the influence of urban mass transit upon land use. *Urban Mass Transit*, 1998(4): 32-36. [何宁, 顾保南. 城市轨道交通对土地利用的作用分析. *城市轨道交通研究*, 1998(4): 32-36.]
- [13] Pan Jinghu, Dai Weili. Spatial-temporal characteristics in urban morphology of major cities in China during 1990-2010. *Economic Geography*, 2015, 35(1): 44-52. [潘竞虎, 戴维丽. 1990-2010年中国主要城市空间形态变化特征. *经济地理*, 2015, 35(1): 44-52.]
- [14] Wu Hong'an, Jiang Jianjun, Zhou Jie, et al. Dynamics urban expansion in Xi'an city using Landsat TM/ETM+ data. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 143-150. [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): 143-150.]
- [15] Liu Tao, Cao Guangzhong. Progress in urban land expansion and its driving forces. *Progress in Geography*, 2010, 29(8): 927-934. [刘涛, 曹广忠. 城市用地扩张及驱动力研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(8): 927-934.]
- [16] Luo Ti, Liu Yaolin, Kong Xuesong. Spatial-temporal characteristics and the driving mechanism of urban-rural construction land changes in Wuhan: Based on the perspective of urban-rural integration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(4): 461-467. [罗媞, 刘耀林, 孔雪松. 武汉市城乡建设用地时空演变及驱动机制研究: 基于城乡统筹视角. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(4): 461-467.]
- [17] Tan Minghong, Li Xiubin, Lu Changhe. An analysis of driving forces of urban land expansion in China. *Economic Geography*, 2003, 23(5): 635-639. [谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 我国城市用地扩张的驱动力分析. *经济地理*, 2003, 23(5): 635-639.]
- [18] He Dan, Diao Chengtai, Xu Jingjing, et al. Analysis of driving forces of urban land expansion in the cities with population over 106 in China. *Territory & Natural Resources Study*, 2005(3): 8-9. [何丹, 刁承泰, 许静静, 等. 我国特大城市用地扩张的驱动力分析. *国土与自然资源研究*, 2005(3): 8-9.]
- [19] Liu Xiaoping, Li Xia, Shi Xun, et al. Simulating land use dynamics under planning policies by integrating artificial immune systems with cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(5): 783-802.
- [20] Calthorpe Peter. *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream*. Princeton Architectural Press, 1993.
- [21] Chen Renchun. Transportation-oriented city land development. *Fujian Architecture & Construction*, 2007(3): 67-70. [陈仁春. 交通导向型的城市土地开发. *福建建筑*, 2007(3): 67-70.]
- [22] Yan Xiaopei, Mao Jiangxing. The mutual relationship between urban transport system and land use in highly densely developed cities: A case study of Guangzhou. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 643-652. [闫小培, 毛蒋兴. 高密度开发城市的交通与土地利用互动关系: 以广州为例. *地理学报*, 2004, 59(5): 643-652.]
- [23] Mao Jiangxing, Yan Xiaopei. Corridor effects of the urban transport artery on land use: A case study of the Guangzhou Avenue. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(5): 58-61. [毛蒋兴, 闫小培. 城市交通干道对土地利用的廊道效应研究: 以广州大道为例. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(5): 58-61.]

- [24] Qin Tao. The relation of the city traffic network and the land price based on the space syntax. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(1): 55-59. [秦涛. 基于空间句法的徐州市道路结构与地价关系分析. 首都师范大学学报(自然科学版), 2010, 31(1): 55-59.]
- [25] Jiang Bin, Huang Bo, Lu Feng. *Spatial Analysis and Geovisualization in GIS*. Beijing: Higher Education Press, 2002. [江斌, 黄波, 陆锋. GIS环境下的空间分析和地学可视化. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [26] Hillier B. *Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture*. 3rd ed. Yang Tao, Wang Xiaojing, Zhang Ji trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. [比尔·希列尔. 杨滔, 王晓京, 张洁, 译. 空间是机器: 建筑组构理论. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.]
- [27] Mu Yi, et al. *Space Syntax: A Very Short Introduction*. Shenzhen: The Institute of Architecture Design & Research, 2015:101-115. [穆一, 等. 空间句法简明教程. 深圳: 深圳大学建筑设计研究院, 2015: 101-115.]
- [28] He Zizhang, Qiu Guochao, Yang Zhe. Research of Xiamen urban morphology development based on space syntax analysiurban plan. *Landscape Architecture and Virescence*, 2007, 25: 106-108. [何子张, 邱国潮, 杨哲. 基于空间句法分析的厦门城市形态发展研究. 城乡规划·园林建筑及绿化, 2007, 25: 106-108.]
- [29] Jose J L. Socio Spatial segregation and urban form: Belem at the end of the 1990s. *Geoforum*, 2001, 32(4): 493-507.
- [30] Chetty R, Hendren N, Kline P, et al. Where is The Land of Opportunity? The Geography of Intergenerational Mobility in the United States [EB/OL]. working paper, <http://obs.rc.fas.harvard.edu/chetty/mobilith geo.pdf>. 2014-07-07.
- [31] Jiang B, Claramunt C. Integration of space syntax into GIS: New perspectives for urban morphology. *Transaction in GIS*, 2002, 6(3): 295-309.
- [32] Jiang B, Claramunt C B. Geometric accessibility and geographic information: Extending desktop GIS to space syntax. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23(2): 127-146.
- [33] Kim Hong-Kyu, Dong Wook Sohn. An analysis of the relationship between land use density of office configuration. *Cities*, 2002, 19(6): 409-418.
- [34] Porras R, Takeshita T, Ikezoe M, et al. A study on the pedestrian space applying space syntax and the segment unit. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2002, 1: 197-203.
- [35] Raford N, Ragland D R. An Innovative Pedestrian Volume Modeling Tool for Pedestrian Safety [EB/OL]. <http://repositories.cdlib.org/its/tsc/UCB-TSC-RR-2003-11>.
- [36] Duan Jin, Hillier B, et al. *Urban Space*. Nanjing: Southeast University Press, 2007: 1-24. [段进, 比尔·希列尔, 等. 空间句法与城市规划. 南京: 东南大学出版社, 2007: 1-24.]
- [37] Hillier B. Centrality as a process: Accounting for attraction inequalities in deformed grids. *Urban Design International*, 1999, 4(3/4): 107-127.
- [38] Wang Jingwen, Mao Qizhi, Dang Anrong, et al. An evolution model of Beijing: A discussion on the evolution of urban spatial and functional patterns based on space syntax. *Urban Planning Forum*, 2008(3): 82-88. [王静文, 毛其智, 党安荣. 北京城市的演变模型: 基于句法的城市空间与功能模式演进的探讨. 城市规划学刊, 2008(3): 82-88.]
- [39] Li Jiang, Guo Qingsheng. Quantitative research of urban spatial morphology based on syntactic analysis. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2003, 36(2): 69-73. [李江, 郭庆胜. 基于句法分析的城市空间形态定量研究. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(2): 69-73.]
- [40] Bai Yongping, Chen Bowen, Wu Changyan. Spatial accessibility of road network in Guanzhong-Tianshui Economic Region. *Progress in Geography*, 2012, 31(6): 724-732. [白永平, 陈博文, 吴常艳. 关中—天水经济区路网空间通达性分析. 地理科学进展, 2012, 31(6): 724-732.]
- [41] Lu Haijun, Liu Xuejun, Cheng Jianquan. Analysis of urban road network accessibilities based on space syntax. *China Water Transport*, 2007, 7(7): 131-133. [鲁海军, 刘学军, 程建权. 基于空间句法的城市道路网可达性分析. 中国水运, 2007, 7(7): 131-133.]
- [42] Wao Haofeng, Shi Su, Rao Xiaojun. A study of urban density in Shenzhen: The relationship between street morphology, building density and land use. *Proceedings of the Ninth International Space Syntax Symposium*, Seoul, 2013.
- [43] Shen Y, Karimi K, Xia Q. Morphological transformation of historical centers in Tianjin. *Proceedings of the Ninth International Space Syntax Symposium*. Seoul, Korea, 2013.
- [44] Shen Qiang, Han Linfei. Distribution of shops and markets in old Beijing based on scale-structure in movement networks. *Journal of Tianjing University (Social Science)*, 2013, 15(2): 122-130. [盛强, 韩林飞. 北京旧城商业分布分析: 基于运动网络的层级结构. 天津大学学报(社会科学版), 2013, 15(2): 122-130.]
- [45] A van Nes. *Road building and urban change. The effect of ring roads on the dispersal of shop and retail in western European towns and cities* [D]. Oslo: Agricultural University of Norway, 2002.

- [46] Hiller B, Penn A, Hanson J, et al .Nature movement: Or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning & Design*, 1993, 20: 29-66.
- [47] Turner A. From axial to road-centre lines: A new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2007, 34(3): 539-555.
- [48] Zhao Hu, Li Lin, Zhu Haihong. Application of extended space syntax in urban land grading. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(2): 9-11. [赵虎, 李霖, 朱海红. 扩展空间句法在城市土地定级中的应用. *测绘信息与工程*, 2007, 32(2): 9-11.]
- [49] Duan Ruilan, Zheng Xinqi. The relation of the city road structure and the land price based on the space syntax. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(5): 76-79. [段瑞兰, 郑新奇. 基于空间句法的城市道路结构与地价关系研究. *测绘科学*, 2004, 29(5): 76-79.]
- [50] GB/T 18507-2014. Regulations for gradation and classification on urban land. [GB/T 18507-2014. 城镇土地分等定级规程.]

Space syntax expand intensity index and its applications to quantitative analysis of urban expansion

WANG Haijun^{1,2}, XIA Chang¹, ZHANG Anqi^{1,3}, LIU Yaolin^{1,2,4}, HE Sanwei⁵

(1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information Systems, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China;

4. Collaborative Innovation Center for Geospatial Information Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 5. School of Public Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

Abstract: Expand intensity index (EII) is an index commonly used to characterize the extent and speed of urban expansion. In other words, it is simply used to describe and analyze the physical spatial change from the perspective of urban area. But this index only represents the result of urban expansion neglecting the feeling of people to space and the underlying mechanisms of urban expansion. Moreover, an in-depth study is ignored on the evolving pattern of urban space and cannot reflect human activities in urban space. This paper presents a new expansion intensity index based on space syntax by considering the driving effect of transport network on urban expansion, namely space syntax expand intensity Index (SS-EII). SS-EII can reflect the syntactic variables about spatial clustering and dispersion and analyze the changes of spatial accessibility. Compared to the conventional expand intensity index, SS-EII not only cares about the result of urban expansion, but also captures the effect of transportation on the pattern and direction of urban expansion as well as the feeling of human to urban space. With Cotton Lake Town in Guangdong Province, China as an example, SS-EII is utilized to compare expansion speeds of built-up areas in different directions. It can be concluded that the result based on SS-EII is consistent to the actual situation of urban expansion and the correlation coefficient with EII is higher than 0.95.

Keywords: space syntax; expansion intensity index; urban expansion; Cotton Lake Town in Guangdong Province