

# 城市群视角下空间联系与城市扩张的关联分析

焦利民<sup>1,2</sup>, 唐欣<sup>1</sup>, 刘小平<sup>3</sup>

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079;  
3. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

**摘要:**在城市群发展的不同阶段,城市扩张表现出不同的时空特征。从城市群视角研究城市扩张的时空规律,对于理解城市扩张与城市群网络化组织结构之间的复杂耦合关系具有重要意义。本文以长江三角洲城市群为例,基于交通网络、引力模型和空间句法模型,结合1980、1990、2000和2010年Landsat遥感影像提取建设用地扩张信息,计算城市扩张强度与速度指标;采用核心城市可达性与空间相互作用力强度分析城市的交通网络区位;采用空间句法模型计算城市交通网络的通达性和城市在城市群交通路网中的地位。结果表明:城市扩张强度与核心城市可达性、核心城市空间相互作用力强度、空间句法变量指标呈正相关关系。城市扩张速度与上述指标在第一阶段(1980-1990年)和第二阶段(1990-2000年)呈正相关关系;但在第三阶段(2000-2010年)整体表现为负相关,分布在城市群外围、交通路网联系程度较低的城市扩张速度更快,呈现出空间收敛的趋势。表明城市群中的城市空间联系在城市扩张中起到重要但又不断演变的作用,研究结果对于长三角城市群规划和其他城市群城市扩张调控具有借鉴意义。

**关键词:**城市扩张;交通路网;空间句法;空间相互作用;长三角城市群

## 1 引言

随着城镇化的发展,在世界各地逐步形成了在一定地域内具有层级结构、网络化组织和相互联系的城市群。城市群内部的城市增长已不是城镇化初期各城市孤立的发展,而是在城市之间相互作用影响下的协同发展。目前中国正在编制和实施以城市群为主体形态的城市空间战略规划。从城市群的整体视角研究城市扩张的规律和机制,对于城市群发展空间规划决策具有重要意义。

过去对城市扩张的分析大多局限于对单个城市分析或者孤立地分析区域系统内各个城市的城市扩张(Liu et al, 2010; Liu et al, 2014; Jiao, 2015; Jiao et al, 2015),很少从区域内城市间联系的角度来研究城市扩张。相关研究表明,区域内城市的相对位置、交通路网等因素都是影响城市扩张的驱动力

(Lu et al, 2013; 冯志新等, 2014)。通过分析城市相对位置与交通路网通达性可定量计算城市群内城市联系的紧密程度。城市相对位置主要采用核心城市可达性与作用力测算。Wu等(2013)认为,区域中心城市对周围城市的发展会产生辐射影响,带动其发展。Sohn(2012)认为,到区域核心城市的距离会影响周围城市人口增长。空间相互作用强度可定量测算核心城市对其他城市的辐射作用(关伟等, 2014),引力模型则是测算空间相互作用的有效方法(杨丽华等, 2014)。交通路网将城市群内各城市有机联系成一个整体,空间句法模型主要揭示交通路网联系的紧密程度。在城市扩张过程中,交通路网发挥着日益重要的作用(李京涛等, 2014; Iacono et al, 2016)。Jiang等(2000)提出运用空间句法模型来定量分析城市空间形态。该方法后被研究者广泛应用于单个城市的道路网分析(刘承良等,

收稿日期:2016-06;修订日期:2016-08。

基金项目:国家自然科学基金项目(41571385) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571385]。

作者简介:焦利民(1977-),男,河南安阳人,教授,博士生导师,主要从事土地利用/覆盖变化、城市扩展、空间分析等方面的研究,E-mail: lmjiao027@163.com。

引用格式:焦利民,唐欣,刘小平. 2016. 城市群视角下空间联系与城市扩张的关联分析[J]. 地理科学进展, 35(10): 1177-1185. [Jiao L M, Tang X, Liu X P. 2016. Spatial linkage and urban expansion: An urban agglomeration perspective[J]. Progress in Geography, 35(10): 1177-1185.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.10.001

2015),以及城市群的路网通达性分析(朱桃杏等, 2011)。目前,基于区域城市间空间联系的方法来分析城市扩张的研究尚少;但随着城镇化进程的加快,基于城市群的整体视角研究城市扩张的规律和机制更加符合现势性。

长江三角洲城市群是中国经济最发达、城镇集聚程度最高的城镇化地区,也是世界六大城市群之一。由于率先经历了城镇化历程,城市扩张尤为迅速。本文以长江三角洲城市群为研究区,基于城市相对位置和交通路网,定量分析其空间联系与城市扩张之间的相关关系,以期今后从城市间联系的角度研究其他城市群的城市扩张现象提供借鉴。

## 2 研究区域及数据来源

### 2.1 研究区域

长江三角洲城市群位于中国东部(27°3'N~35°07'N, 117°09'E~122°6'E 之间),面积 25.12 万 km<sup>2</sup>。根据《中国城市群发展报告》(刘士林等, 2014),长江三角洲城市群包括:上海市,江苏省和浙江省的全部地级及以上城市,安徽省的合肥市、芜湖市、淮南市、马鞍山市、滁州市等共 30 个城市(图 1)。由于主要考虑道路交通与城市扩张的时空

关系,而浙江省舟山市与其他城市相连的道路交通 2009 年底才开通,故本文并未将舟山市包含在研究区内。

### 2.2 数据来源及预处理

研究数据包括主城区建设用地数据、主城区人口数据和道路交通数据。综合考虑地理意义的城市范围与统计年鉴数据的有效结合,选取长江三角洲城市群各城市市辖区范围作为其主城区。城市主城区建设用地数据采用 1980、1990、2000 和 2010 年的 Landsat TM/ETM+ 的遥感影像(空间分辨率为 30 m),运用监督分类的方法,提取上述年份的建设用地。城市主城区人口数据采用第六次全国人口普查得到的 2010 年主城区常住人口数据。道路交通数据包括铁路、高速公路和国道,基于 2010 年 OpenStreetMap 的道路数据,并根据上述道路开通时间进行修正,得到 1990 和 2000 年的道路数据。

## 3 研究方法

### 3.1 城市扩张指标

采用 3 个指标定量计算主城区城市扩张水平:建设用地年均增长量(AI)、建设用地年均增长率(AGR)和各阶段建设用地扩张程度(AE)(以 10 年为一个阶段,即第一阶段(1980-1990 年)、第二阶段(1991-2000 年)、第三阶段(2001-2010 年))。AI(单位为 km<sup>2</sup>/a)直接测算建设用地面积年均变化量,揭示同一城市在不同阶段扩张水平的差异。AGR(单位为%)去除城市规模效应的影响,比较不同城市在同一时期扩张速度的差异。AE(单位为%)是指城市主城区在不同阶段建设用地增长量占其主城区面积的百分比,可以比较不同时期建设用地扩张的强度。其公式为:

$$AI = (A_{\text{end}} - A_{\text{start}}) / n \quad (1)$$

$$AGR = (A_{\text{end}} - A_{\text{start}}) / (A_{\text{start}} \times n) \times 100\% \quad (2)$$

$$AE = (A_{\text{end}} - A_{\text{start}}) / (A_{\text{urban}}) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $A_{\text{end}}$  表示某一时期末的主城区建设用地面积;  $A_{\text{start}}$  表示某一时期初的主城区建设用地面积;  $A_{\text{urban}}$  表示主城区行政区域面积;  $n$  表示时间跨度(年数)。

### 3.2 引力模型

引力模型综合考虑距离衰减原理和牛顿万有引力定律,计算两城市的空间相互作用力大小。其公式为:

$$F_{ij} = K_{ij} \times \sqrt{P_i G_i \times P_j G_j} / R_{ij}^2 \quad (4)$$

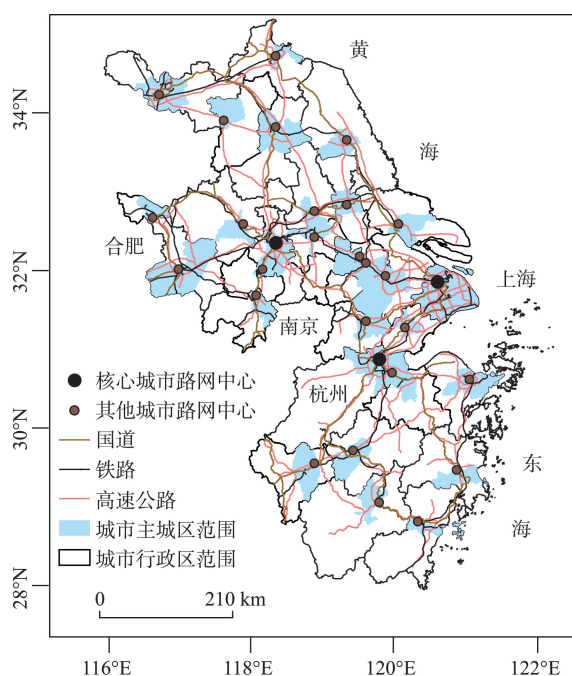


图1 2010年长江三角洲城市群主要道路网分布图

Fig.1 Network of main roads in the Yangtze River Delta (YRD) region in 2010

$$K_{ij} = G_i / (G_i + G_j) \quad (5)$$

式中:  $F_{ij}$  表示城市  $i$  与城市  $j$  的空间相互作用力/(元·人×10<sup>8</sup>/km<sup>2</sup>);  $G_i$  和  $G_j$  分别表示城市  $i$  和城市  $j$  主城区的GDP;  $P_i$  和  $P_j$  分别表示城市  $i$  和城市  $j$  主城区的常住人口;  $R_{ij}$  表示两城市铁路和高速公路路网距离之和;  $K_{ij}$  为权数,反映的是城市  $i$  对  $F_{ij}$  的贡献率。

### 3.3 空间句法模型

空间句法变量用于表示交通路网的通达性、空间联系的紧密程度等。其中,连接值用来表示路网轴线的局部联系,集成程度值和全局整合度值用来表示轴线的全局联系。通常局部连接性好的轴线全局连接能力也高。城市群中连接城市间的交通路网主要是铁路、高速公路和国道,针对不同类型交通路网,分别通过分区统计功能计算各个城市的总连接值,集成程度值和总全局整合度值。

(1) 连接值( $C_i$ ),即城市中各道路的连接值,表示某条轴线(道路) $i$ 在整个拓扑网络中的连接能力,其公式为:

$$C_i = K \quad (6)$$

$$CC_j = \sum_{i=1}^n C_i \quad (7)$$

式中:  $K$  表示道路  $i(i=1, 2, 3, \dots, n)$  直接相邻的道路条数;  $CC_j$  为城市  $j$  内轴线的总连接值,为城市内各道路连接值总和。

(2) 集成程度( $CA_j$ ),表示一个城市与其他所有城市的空间关系,即局部与整体的关系。某一个城市的通达条件不仅与总连接值有关,与平均深度值也有很大关系(陈明星等, 2005)。其公式为:

$$CA_j = CC_j / D_j \quad (8)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n MD_i / n \quad (9)$$

$$MD_i = \sum_{b=1}^m d_{ab} / (m-1), \quad (b=1, 2, 3, \dots, m) \quad (10)$$

式中:  $D_j$  为城市  $j$  内所有轴线平均深度值的平均值,即城市内各道路  $i$  平均深度值取平均;  $n$  为轴线数;  $MD_i$  为平均深度值,表示轴线某一节点  $a$  到其他所有节点的最短距离之和的平均值;  $m$  为节点个数;  $d_{ab}$  表示连接  $a$ 、 $b$  两节点间的最短距离。

(3) 总全局整合度( $TGI_j$ ),表征一个城市与其他所有城市的积聚和离散程度,其值为城市内所有轴线全局整合度值之和。全局整合度  $GI_i$ ,表征轴

线在一个系统网络通达性,即局部与整体的关系。其公式为:

$$RA_i = 2 \times (MD_i - 1) / (n - 2) \quad (11)$$

$$RRA_i = RA_i / S_n \quad (12)$$

$$S = 2 \times \{n[\log_2((n+2)/3) - 1] + 1\} / (n-1)(n-2) \quad (13)$$

$$GI_i = 1 / RRA_i \quad (14)$$

$$TGI_j = \sum_{i=1}^n GI_i \quad (15)$$

式中:  $n$  为城市内的总轴线数;深度值可标准化为相对不对称值  $RA_i$ ,进一步标准化为真实相对不对称值  $RRA_i$ ,消除结构干扰;  $S$  是适应不同系统理想结构的基准相对不对称值(Yang et al, 2015)。

### 3.4 加权距离指数

加权距离指数是路网距离经过加权标准化后的结果,表征区域内各城市到核心城市的邻近程度。计算城市到3个核心城市的高速公路和铁路的路网距离,并计算以各个核心城市的GDP和人口规模设定其辐射能力的权重系数,最后通过 min-max 标准化处理得到各城市的加权距离指数。其公式为:

$$d_j = \sum_{i=1}^3 w_i \times \frac{(d_{ij} - (d_{ij})_{\min})}{(d_{\max} - (d_{ij})_{\min})} \quad (16)$$

$$w_i = \frac{1}{2} \times \frac{GDP_i}{(GDP_1 + GDP_2 + GDP_3)} + \frac{1}{2} \times \frac{pop_i}{(pop_1 + pop_2 + pop_3)}, \quad (i=1, 2, 3) \quad (17)$$

式中:  $w_i$ 、 $GDP_i$  和  $pop_i$  分别是核心城市  $i$  的权重、GDP 和常住人口;  $d_j$  表示城市  $j$ (非核心城市)的加权距离指数;  $d_{ij}$  表示非核心城市  $j$  到核心城市  $i$ (1—上海, 2—南京, 3—杭州)的铁路和高速公路路网距离之和;  $(d_{ij})_{\min}$  表示长江三角洲城市群中非核心城市  $j$  分别到核心城市  $i$  的路网距离最小值,  $d_{\max}$  表示长三角城市群中非核心城市  $j$  到所有核心城市  $i$  的路网距离最大值。

## 4 结果与分析

### 4.1 城市相对位置与城市扩张的关联分析

采用核心城市可达性与核心城市空间相互作用强度分析城市相对位置。到核心城市的交通路网距离可以定量计算核心城市的可达性;采用引力模型计算各城市受到核心城市作用力大小。前者重点从到核心城市距离的角度分析城市相对位置,



后者则在距离的基础上考虑城市本身规模的影响。本文通过两者结合来定量分析城市在城市群中的相对位置。

基于以下指标确定区域核心城市:研究期内(1980-2010年)城市主城区GDP、城市主城区常住人口、基于空间句法变量得出的城市在城市群交通路网中的地位。上海市、南京市和杭州市在研究期内上述各指标值均为长江三角洲城市群的前3位,并且均为区域政治中心。综上,选取上海市、南京市和杭州市作为长江三角洲城市群的区域核心城市。

#### 4.1.1 核心城市可达性与城市扩张的关联分析

加权距离指数分析核心城市的可达性,核心城市的可达性测算城市在城市群体系中的相对区位,并进行其与城市扩张之间的关联分析。基于加权距离指数值,将29个城市按照数值由大到小,平均分为6级,其中前5级各5个城市,第六级4个城市(表1)。

图2是基于路网距离得到各城市的加权距离指数,采用反距离加权法得到距离指数的空间插值图。从图3可以看出,总体而言,距离城市群区域中心越近的城市,城市扩张强度(AI和AE)越大。2000年后,中国进入快速城镇化进程,距离区域中心较远的城市这一趋势波动较大。由于区域核心城市的影响范围、辐射半径有限,位于城市群边缘的城市建设用地扩张强度与核心城市可达性之间的相关关系不明显。从表2可见,核心城市可达性与城市扩张指标在第二阶段(1990-2000年)秩相关系数最高。20世纪90年代以后,城市发展的总体格局发生了2个重要的变化:一是受经济聚合与外扩效应的影响,大型城市规模和数量大幅突破;二是大城市的良性发展没有引起令人生畏的“城市顽疾”,反而对周边的中小城市发展起到了强有力的辐射

带动作用(王明, 2015)。而秩相关系数在第三阶段(2000-2010年)有所降低,表明城镇化和城市扩张达

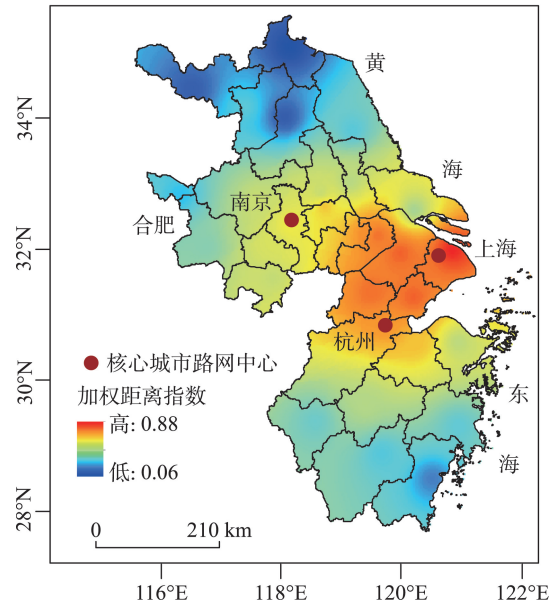


图2 加权距离指数空间插值

Fig.2 Spatial interpolation of weighted distance index

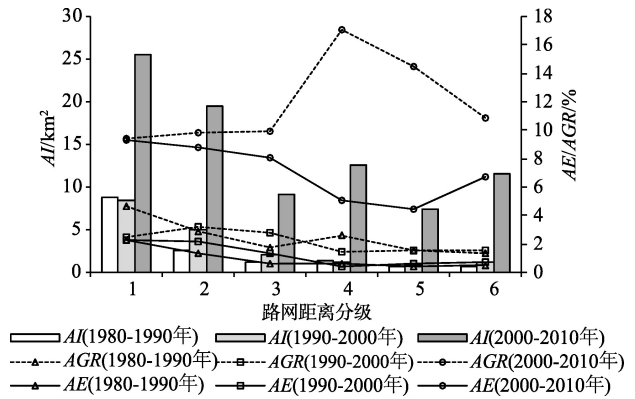


图3 不同阶段核心城市可达性与城市扩张相关关系

Fig.3 Relationship between road network distance to core cities and urban expansion in different stages

表2 加权距离指数与城市扩张指标的  
斯皮尔曼秩相关系数值

Tab.2 Spearman's rank correlation coefficient between  
weighted distance index and urban expansion indicators

$\bar{d}_j$	AI/km <sup>2</sup>	AGR/%	AE/%
1990年	0.345	0.297	0.307 <sup>*</sup>
2000年	0.576 <sup>**</sup>	0.372 <sup>**</sup>	0.614 <sup>**</sup>
2010年	0.315	-0.210	0.391 <sup>*</sup>

注:\*\*、\*分别表示在0.01、0.05水平(双侧)上显著,表4、表7同。

表1 基于加权距离指数分级结果

Tab.1 Classification result based on the  
weighted distance index

级 别	$\bar{d}_j$	城市	1980年主城 区面积/km <sup>2</sup>
1	0.81	上海市、苏州市、嘉兴市、湖州市、无锡市	166.10
2	0.68	常州市、杭州市、绍兴市、镇江市、南京市	123.04
3	0.53	马鞍山市、扬州市、滁州市、芜湖市、宁波市	55.31
4	0.44	泰州市、金华市、南通市、合肥市、衢州市	59.65
5	0.31	台州市、盐城市、宿迁市、丽水市、淮南市	63.54
6	0.13	温州市、徐州市、淮安市、连云港市	93.03

注: $\bar{d}_j$ 为加权距离指数。

到一定程度后,核心城市对周边城市的城市扩张影响减弱。整体而言,城市扩张速度在第一阶段(1980-1990年)和第二阶段(1990-2000年)随着核心城市可达性降低而递减,但第三阶段(2000-2010年)距离核心城市较远的城市建设用地增长率相对更大。由此得出结论:城市扩张初期,核心城市对周边城市的城市扩张影响显著;随着城镇化进入高速发展阶段,城市群核心城市可达性对其他城市的城市扩张影响减弱。

4.1.2 空间相互作用与城市扩张的关联分析

基于引力模型,以2010年统计数据为样本,计算各城市受到核心城市(上海市、南京市和杭州市)的空间相互作用力。每个城市受到的核心城市空间相互作用力之和为该城市受到的总作用力。按照受到的总空间相互作用力大小,将除核心城市外的26个城市由大到小,平均分为5级,其中前4级每级5个城市,第5级6个城市(表3)。

图4从城市与区域中心城市空间联系强度的角度分析其与城市扩张水平之间的相关关系。从表4可以看出,各城市受到的区域核心城市空间相互作用力与城市扩张强度在各阶段均显著正相关。区域中心对城市的引力越强,建设用地增长量和扩张程度也相对越大。城市扩张速度与空间相互作用强度的秩相关系数仅在第二阶段为正且显著。在第一和第三阶段,除第一级城市(靠近核心城市)受到核心城市引力最大、城市扩张速度最快外,对其他级别城市、初始规模较小的城市其城市扩张则相对更快。城市相对位置与城市扩张的关联分析表明:城市相对位置指标与城市扩张指标相关系数在

第二阶段最强,第三阶段次之,第一阶段最弱。改革开放初期,城市群的网络化组织结构还未形成,城市扩张孤立进行;20世纪90年代,城市发展总体格局转变,大城市对周边中小城市的发展起到强有力的辐射带动作用;2000年后,城镇化进入高速发展时期,城市扩张既受到区域核心城市的影响,低位序城市的城市扩张更受到相邻的高位序城市影响。

4.2 空间句法指标与城市扩张的关联分析

通过 ArcGIS 中的 axowoman 插件计算空间句法变量指标值,图5为2010年长江三角洲城市群交通路网空间句法指标的连接值和全局整合度值的分级结果。连接值表明(图5a),南京市—上海市—杭州市的沿线城市其连接值更高、局部通达性更好、空间联系更加紧密。全局整合度值表明(图5b),长江三角洲城市群中部城市全局通达性更强,到城市群其他城市的可达性更高。交通路网局部与整体联系均表明:长江三角洲城市群中部地区的交通路网通达性更高。此外,基于空间句法变量进行核密度分析,选取核密度值最高的点作为各城市的交

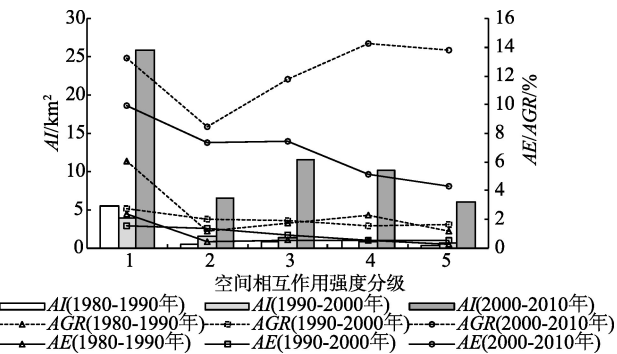


图4 不同阶段空间相互作用强度与城市扩张相关关系  
Fig.4 Relationship between spatial interaction intensity and urban expansion in different stages

表4 空间相互作用强度与城市扩张指标的  
斯皮尔曼秩相关系数值

Tab.4 Spearman's rank correlation coefficient between spatial interaction intensity and urban expansion indicators			
<i>F</i>	<i>AI</i> /km <sup>2</sup>	<i>AGR</i> /%	<i>AE</i> /%
1990年	0.442 <sup>*</sup>	0.312	0.495 <sup>*</sup>
2000年	0.740 <sup>**</sup>	0.402 <sup>*</sup>	0.708 <sup>**</sup>
2010年	0.551 <sup>**</sup>	-0.106	0.584 <sup>**</sup>

注:*F*表示某城市受到的空间相互作用强度。

表3 基于空间相互作用强度分级结果

Tab.3 Classification result based on spatial interaction intensity			
级别	$\bar{F}$ (元·人×10 <sup>6</sup> /km <sup>2</sup> )	城市	1980年主城区面积/km <sup>2</sup>
1	21.09	苏州市、无锡市、常州市、宁波市、合肥市	98.89
2	3.80	镇江市、马鞍山市、扬州市、嘉兴市、绍兴市	70.72
3	1.59	湖州市、芜湖市、南通市、徐州市、温州市	69.23
4	0.45	泰州市、台州市、淮安市、盐城市、金华市	68.85
5	0.19	滁州市、淮南市、宿迁市、衢州市、连云港市、丽水市	54.24

注: $\bar{F}$ 表示某级别所有城市空间相互作用力的平均值。

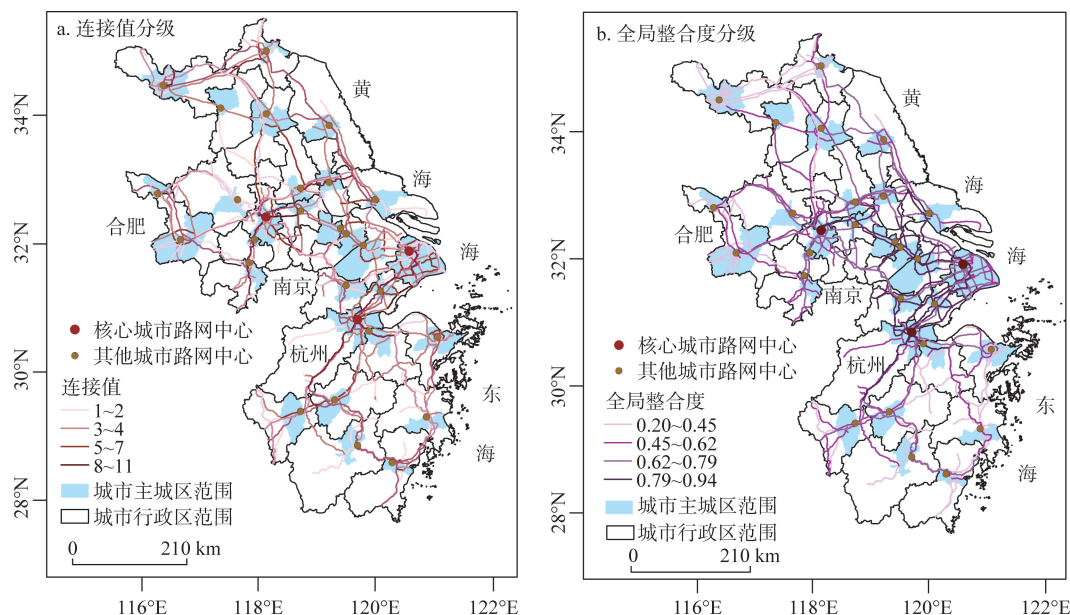


图5 长江三角洲城市群空间句法变量的空间分异

Fig.5 Spatial differentiation of space syntax variables of road network in the Yangtze River Delta region

通中心点。

对于不同类型的交通路网,根据其速度设定相应权重,得到各城市加权空间句法指标值。根据《中华人民共和国公路工程技术标准(JTGB-2006)》和长江三角洲城市群的道路实际情况,得出不同等级道路在各时期的平均速度,如表5所示。

基于交通路网均速(因1988年底开通第一条高速公路,故1990年前不考虑高速公路的影响)得到不同类型路网的权重,并通过min-max标准化处理得到城市空间句法变量(总连接值、集成程度和总全局整合度)的标准化值。以2010年城市总连接值为例,其计算公式为:

$$CC_i = (v_j / \sum_{j=1}^3 v_j) \times CC'_{ji} \quad (18)$$

$$CC'_{ji} = (CC_{ji} - (CC_j)_{\min}) / ((CC_j)_{\max} - (CC_j)_{\min}), (j=1,2,3) \quad (19)$$

式中:  $CC_i$  表示城市  $i$  的总连接值标准化值;  $CC_{ji}$  表示城市  $i$  道路类型  $j$  (1—高速公路, 2—国道, 3—铁路) 的总连接值;  $CC'_{ji}$  表示对应的标准化结果,

表5 长三角城市群不同类型交通路网平均速度/(km/h)

时间	国道	铁路	高速公路
1990年	60	50	—
2000年	70	100	110
2010年	80	140	120

$(CC_j)_{\max}$  表示所有城市道路类型  $j$  总连接值的最大值;  $(CC_j)_{\min}$  表示所有城市道路类型  $j$  总连接值的最小值;  $v_j$  表示道路类型  $j$  的速度。同理,可得到各城市集成程度和总全局整合度的计算公式。

总连接值、集成程度和总全局整合度表示城市在城市群交通网络中的地位,定量地刻画城市交通的通达程度以及与城市群内其他城市联系的紧密程度。通过min-max标准化处理,上述指标标准化后结果处于[0, 1]。对空间句法变量标准化后指数做双变量皮尔逊相关分析,结果发现:皮尔逊相关系数均在0.96以上,且其显著相关,故上述指标具有可替代性。对空间句法变量指标和城市扩张指标进行双变量皮尔逊相关分析,结果表明总全局整合度(TGI)与城市扩张指标相关系数更大(相关系数值见表6),故采用总全局整合度表示路网通达性与联系紧密程度。

表6 总全局整合度与建设用地扩张指标  
双变量相关分析结果/(km/h)

Tab.6 Correlation of TGI and urban expansion in the Yangtze River Delta region/(km/h)

TGI	AI/km <sup>2</sup>	AGR/%	AE/%
1990年	0.744***	0.328*	0.574**
2000年	0.860***	0.482**	0.870***
2010年	0.850***	-0.254	0.373*

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在0.001、0.01、0.05水平(双侧)上显著。



除2010年总全局整合度与建设用地年均增长率不相关外,其余均具有正相关关系。其中,总全局整合度与建设用地增长量的相关系数最高,与建设用地扩张程度的相关系数次之,与建设用地增长率的相关系数最低且在2010年不相关。从表7可以看出,根据不同阶段总全局整合度标准化系数由大到小,将29个城市平均分为6级,其中前5级每级分别有5个城市,最后一级4个城市。

表6显示,交通路网通达性与城市扩张强度的相关系数均为正且显著,且第二阶段的相关系数明显大于第一阶段和第三阶段,表明城市群交通路网组织的不断完善,对城市扩张的影响先增强后减弱。交通路网通达性与城市扩张速度的相关系数在第一和第二阶段显著正相关;第三阶段的相关系数为负,表明交通路网通达程度较弱(*TGI*低)的城市,此时建设用地扩张速度更为迅速。并且图6表明,*AI*、*AGR*和*AE*在第一阶段和第二阶段相差不

大,第三阶段和第一、第二阶段差异显著。2000年以来,由于国家城镇化政策调整,从之前的“严格控制城市规模,合理发展中等城市和小城市”,转为加快城镇化进程,坚持大中小城市和城镇协调发展(方创琳等,2008)。2000年之后,长江三角洲城市群进入高速发展阶段,城市扩张更为迅速。综上可得,城市扩张强度与交通路网通达性联系更为紧密;城市扩张速度变化表明城市扩张呈现收敛趋势,路网通达性较弱的城市(主要分布在城市群边缘)在城市扩张加速阶段(第三阶段)扩张更快。

5 结论与讨论

本文从城市群整体视角分析了长三角1980-2010年间空间联系与城市扩张之间的动态相关关系。总体而言,第一阶段(1980-1990年)和第二阶段(1990-2000年)间的城市扩张相对较慢、较缓和;第三阶段(2000-2010年)城市扩张进入加速发展,城市扩张的强度和速度都明显高于2000年前的城市扩张水平。

研究表明,区域核心城市可达性和辐射作用会促进周围城市的发展。但区域核心城市有一定的作用范围,超出这一范围后城市扩张的强度与核心城市可达性不具有正相关关系。随着城市扩张进程的加快,核心城市可达性对城市群内其他城市的城市扩张影响逐渐减弱。考虑城市自身规模(以主城区GDP和常住人口表示)后,核心城市的空间相互作用力依旧促进城市扩张。20世纪90年代,城市发展总体格局改变,大城市对周边中小城市的发展起到强有力的辐射带动作用,此时核心城市对周边城市的城市扩张关联最紧密。进入加速扩张阶段(第三阶段)后,受到核心城市引力最强以及与核心城市邻近的城市扩张速度仍然保持最快。对于其他级别城市,这一规律则不明显,此时初始规模较小的城市扩张速度更快,城市规模扩张呈现收敛的趋势。

随着城镇化进程的不断加快,交通路网与城市扩张强度的相关系数先增大后降低,说明城市群交通网络组织的不断完善,对城市扩张的影响先增强后减弱。城镇化进入高速发展阶段后,城市在城市群交通路网中的地位与城市扩张速度相关系数为负,此时交通路网通达性较低的城市扩张更快。并且,在第三阶段,到核心城市可达性相对较低、在城

表7 总全局整合度与城市扩张指标的  
斯皮尔曼秩相关系数值

Tab.7 Spearman's rank correlation coefficient between  
*TGI* and urban expansion indicators

级别	城市(2010年)
1	上海市--、南京市--、杭州市--、苏州市--、镇江市↓-
2	徐州市↓-、合肥市--、无锡市↑-、嘉兴市--、宁波市-↓
3	常州市↑↑、湖州市--、马鞍山市--、芜湖市--、绍兴市--
4	淮安市↓↓、扬州市--、衢州市--、金华市--、南通市--
5	泰州市↑↑、连云港市--、温州市--、盐城市-↓、淮南市--
6	台州市-↑、丽水市--、滁州市--、宿迁市--

注:“-”表示城市级别没有变化,“↓”表示向下移动一级,“↑”表示向上移动一级。第一个符号表示2000年城市的级别变化,第二个箭头表示1990年城市的级别变化。

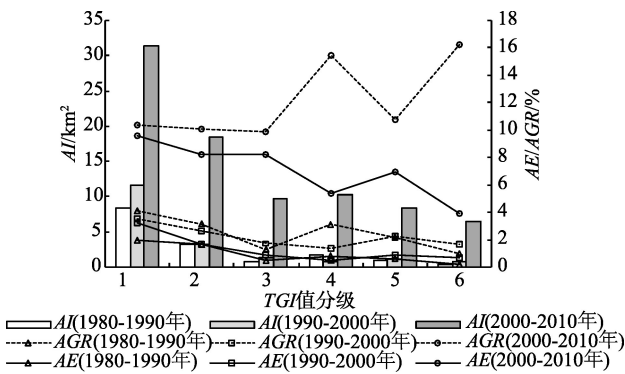


图6 空间句法指标与城市扩张相关关系

Fig.6 Relationship between road network space syntax  
variable and urban expansion

市群交通网络中地位较低、分布在城市群外围的城市的建设用地扩张速度较快;而核心城市周围的大规模城市的地建设用地扩张速度放缓,呈现空间收敛的趋势。

除了本文采用的城市相对位置及其在交通网络中的地位,还可以采用其他方法来衡量城市间的空间联系。城市间空间联系的网络包括实体网络和虚拟网络,如基于道路网构建实体网络,基于信息流和经济流构建虚拟网络。城市群不同网络之间的关系、不同网络与城市扩张的时空关系等有待进一步探讨。本文结果表明,城市群中的城市空间联系在城市扩张过程中起到重要作用,但在城市群不同发展阶段,这一作用的强弱也随之发生变化。除长江三角洲城市群外,对其他处于不同城镇化水平的城市群,城市空间联系与城市扩张的关系有待进一步研究。

#### 参考文献(References)

- 陈明星, 沈非, 查良松, 等. 2005. 基于空间句法的城市交通网络特征研究: 以安徽省芜湖市为例[J]. 地理与地理信息科学, 21(2): 39-42. [Chen M X, Shen F, Zha L S, et al. 2005. A research on urban traffic network based on space syntax: A case study on Wuhu City[J]. Geography and Geo-Information Science, 21(2): 39-42.]
- 方创琳, 刘晓丽, 蔺雪芹. 2008. 中国城市化发展阶段的修正及规律性分析[J]. 干旱区地理, 31(4): 512-523. [Fang C L, Liu X L, Lin X Q. 2008. Stages correction and regularity analysis of urbanization course of China[J]. Arid Land Geography, 31(4): 512-523.]
- 冯志新, 陈颖彪, 千庆兰, 等. 2014. 东莞市交通路网格局对城市空间扩张影响研究[J]. 地球信息科学学报, 16(1): 79-86. [Feng Z X, Chen Y B, Qian Q L, et al. 2014. Relationship between the structure of urban traffic network and urban spatial expansion: A case study of Dongguan City[J]. Journal of Geo-Information Science, 16(1): 79-86.]
- 关伟, 周忻桐. 2014. 辽中南城市群空间相互作用的时空演变[J]. 经济地理, 34(9): 48-55. [Guan W, Zhou X T. 2014. The spatio-temporal evolvement of spatial interaction among cities of south central Liaoning[J]. Economic Geography, 34(9): 48-55.]
- 李京涛, 周生路, 吴绍华. 2014. 道路交通网络与城市土地利用时空耦合关系: 以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 23(1): 18-25. [Li J T, Zhou S L, Wu S H. 2014. Relationship between traffic network and urban land use in Nanjing with Landsat TM/ETM+ images[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 23(1): 18-25.]
- 刘承良, 余瑞林, 段德忠. 2015. 基于空间句法的武汉城市圈城乡道路网通达性演化分析[J]. 地理科学, 35(6): 698-707. [Liu C L, Yu R L, Duan D Z. 2015. The evolution of spatial accessibility of urban-rural road network based on the space syntax in Wuhan Metropolitan Area[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(6): 698-707.]
- 刘士林, 刘新静. 2014. 中国城市群发展报告 2014[M]. 上海: 东方出版中心: 1-270. [Liu S L, Liu X J. 2014. Zhongguo chengshiqun fazhan baogao 2014[M]. Shanghai, China: Orient Publishing Center: 1-270.]
- 王明. 2015. 改革开放以来中国城市化的历程演进、态势与新进程[J]. 经济与社会发展, 13(4): 81-85. [Wang M. 2015. Gaige kaifang yilai Zhongguo chengshihua de lishi yanjin, taishi yu xinjincheng[J]. Economic and Social Development, 13(4): 81-85.]
- 杨丽华, 孙桂平. 2014. 京津冀城市群交通网络综合分析[J]. 地理与地理信息科学, 30(2): 77-81. [Yang L H, Sun G P. 2014. Comprehensive analysis of the Beijing-Tianjin-Hebei city cluster transportation network[J]. Geography and Geo-Information Science, 30(2): 77-81.]
- 朱桃杏, 吴殿廷, 马继刚, 等. 2011. 京津冀区域铁路交通网络结构评价[J]. 经济地理, 31(4): 561-565, 572. [Zhu T X, Wu D T, Ma J G, et al. 2011. Evaluation of rail transport network within Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Economic Geography, 31(4): 561-565, 572.]
- Iacono M, Levinson D. 2016. Mutual causality in road network growth and economic development[J]. Transport Policy, 45: 209-217.
- Jiang B, Claramunt C, Klarqvist B. 2000. Integration of space syntax into GIS for modelling urban spaces[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2(3-4): 161-171.
- Jiao L M. 2015. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion[J]. Landscape and Urban Planning, 139: 26-39.
- Jiao L M, Mao L F, Liu Y L. 2015. Multi-order landscape expansion index: Characterizing urban expansion dynamics [J]. Landscape and Urban Planning, 137: 30-39.
- Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. 2010. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data[J]. Landscape Ecology, 25(5): 671-682.



- Liu X P, Ma L, Li X, et al. 2014. Simulating urban growth by integrating Landscape Expansion Index (LEI) and cellular automata[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(1): 148-163.
- Lu C, Wu Y Z, Shen Q P, et al. 2013. Driving force of urban growth and regional planning: A case study of China's Guangdong Province[J]. *Habitat International*, 40: 35-41.
- Sohn J. 2012. Does city location determine urban population growth? The case of small and medium cities in Korea[J]. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 103(3): 276-292.
- Wu K, Fang C L, Huang H B, et al. 2013. Comprehensive delimitation and ring identification on urban spatial radiation of regional central cities: Case study of Zhengzhou[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 139(4): 258-273.
- Yang T X, Jing D, Wang S B. 2015. Applying and exploring a new modeling approach of functional connectivity regarding ecological network: A case study on the dynamic lines of space syntax[J]. *Ecological Modelling*, 318: 126-137.

## Spatial linkage and urban expansion: An urban agglomeration perspective

JIAO Limin<sup>1,2</sup>, TANG Xin<sup>1</sup>, LIU Xiaoping<sup>3</sup>

(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 Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Urban expansion displays varied spatial characteristics in different periods of urban agglomeration development. Studying the spatial and temporal patterns of urban expansion from the perspective of urban agglomeration is important for understanding the complex relationship between urban expansion and network structure of urban agglomerations. In this study we analyzed urban expansion in the Yangtze River Delta urban agglomeration based on road network, a gravity model, and a space syntax model. Construction land expansion was obtained from Landsat remote sensing data in 1980, 1990, 2000, and 2010 and then was used to calculate intensity and speed of urban expansion. Position of cities in the traffic network of the urban agglomeration was analyzed by accessibility to and spatial interaction intensity of core cities. The space syntax model was used to compute accessibility of the road network and the status of a city in the network of the urban agglomeration. The results show that, first, urban expansion intensity displayed a positive correlation with accessibility to core cities, spatial interaction intensity of core cities, and space syntax indicators. Second, there was a positive correlation between urban expansion velocity and indicators identified above in the first (1980-1990) and second (1990-2000) periods. However, it exhibited a negative correlation in the third period (2000-2010). Cities with a relatively poor interconnectivity of traffic network and located in the periphery of the urban agglomeration developed more quickly in the last time period, displaying a trend of spatial convergence. This study shows that spatial linkage played an important but evolving role in urban expansion within the urban agglomeration of the Yangtze River Delta. In addition, it serves as a reference for the planning of the Yangtze River Delta urban agglomeration and the regulation of urban expansion of other urban agglomerations.

**Key words:** urban expansion; road network; space syntax; spatial interaction; Yangtze River Delta Urban Agglomeration