

武汉城市圈城市空间相互作用时空演变分析^{*1}

俞艳 童艳* 胡珊珊 柯圆圆

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070)

【摘要】: 引入人口重心、GIS 网络分析及时序全局主成分分析法对传统引力模型进行修正, 由此测算城市潜力值, 以定量测度 2002 ~ 2013 年武汉城市圈城市空间相互作用强度, 并结合 IDW 空间插值法和 CTCSTP 算法揭示出其时空演变规律。结果表明: (1) 武汉城市圈各城市与其他城市间相互作用总强度总体呈增长趋势, 其中武汉市增幅远高于其他城市, 其与孝感—鄂州—黄石形成显著的轴线式发展格局, 其余城市始终为空间联系弱区地带。(2) 武汉市辐射带动作用日趋强劲, 辐射范围逐年扩大并呈现一定的“圈层式”分布, 其余城市辐射带动作用较弱, 仅孝感市略显对外辐射趋势。(3) 整个区域的空间相互作用表现出显著的“西南部低、北部高、东部适中”的空间分异特征, 且其重心由南向北转移明显, 区域发展不均衡特性显著。

【关键词】: 空间相互作用; 潜力模型; IDW; CTCSTP; 武汉城市圈

【中图分类号】: F299. 27 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)11-1784-11

DOI: 10. 11870 /cjlyzyyhj201711007

城市群是城市化过程中的一种高级空间组织形态, 在区域发展中占据着重要地位^[1]。城市群城市空间相互作用用于描述和表达城市之间相互联系的程度, 其强弱可以强化或削弱空间差异, 也直接影响着城市群竞争力强弱及其空间格局的动态变化, 对城市群整体发展产生显著的影响^[2]。随着城市化进程的加快, 城市群逐渐成为城镇化发展的主体形态和提升国家综合竞争力的重要载体, 城市群城市空间相互作用因此一直备受国内外学术界的青睐。国外学者注重对城市空间相互作用的理论基础研究及模型构建探讨。早在 19 世纪 80 年代, 英国人口学家 E. G. Ravenstein 便将物理学中的牛顿万有引力定律运用到人口迁移现象中, 并提出具有开创性的引力模型。美国学者 E. L. Ullman 于 1957 年首次提出空间相互作用理论, 认为互补性、中介机会、可运输性是空间相互作用产生的基本条件。此后, 空间相互作用相关研究逐渐进入了快速发展阶段, 大量学者致力于对新理论^[3]和新模型^[4, 5]的挖掘与探索, 以及从多尺度、多视角、多层次对城市空间联系的表现形式、发展特征进行了深入分析。相比较而言, 国内学者则多注重对模型的实际应用, 主要表现为借鉴国外研究成果, 并结合国内现状, 从区域空间联系测度及其特征探讨^[1, 2, 6~10]、区域空间结构优化^[11, 12]、城市空间整合研究^[1, 13]、商业布局规划^[14]、城市服务范围界定^[15~17]等方面进行了积极的探索, 为从事城市空间相互作用的研究工作奠定了坚实的基础。近年来 GIS 技术发展迅猛, 其与空间相互作用理论相结合成为相关应用研究的新方向。自宋小东^[18]提出基于 GIS 的改进潜能模型后, GIS 在城市联系中的应用变得愈加广泛。孟德友^[19]在引力、潜力和场强模型的基础上引入 GIS 网络分析功能, 以实例验证了其在解决路网可达性分析中的可靠性。

¹ 收稿日期: 2017-02-29; 修回日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471339, 41571514) [National Natural Science Foundation of China (41471339, 41571514)]

作者简介: 俞艳(1976 ~), 女, 副教授, 博士, 主要从事土地资源管理及区域规划中计量模型的建模与应用研究. E-mail: yyhrose@126. com

*** 通讯作者 E-mail**: yaner_t@163. com

薛景丽等^[20]将社会学中的结构方程模型和 GIS 相结合,为空间相互作用测度提供了新思路。此外,关伟^[7]、刘静玉等^[8]分别利用 GIS 空间分析中的 IDW、Kriging 插值法得到了各城市潜力的空间分异图。总体而言,相关研究呈现出以下特点:①在测度方式上,逐渐从定性、定量研究过渡到定性与定量相结合的方式,多以引力模型和潜力模型为主要量化手段,但传统模型及其修正模型中参数界定较为粗略,在综合准确量化方面仍有待进一步探索。②在区域选择上,多关注长三角^[13, 21]、珠三角^[6, 22~25]及京津冀^[2, 26]3 大城市群,对中西部城市群的研究相对偏少。③在时间尺度上,多停留在单一时间截面上,在时空演变研究方面尚处弱势。④在分析方法上,关于城市空间相互作用的空间演变特征分析仅涉及定性层面,未能对多时点空间演变规律进行定量探讨。

中部崛起战略提出以来,武汉城市圈经济发展迅猛,城镇体系发生了巨大变化,城市空间联系不断增强,逐渐发展成为中部 4 大城市群之首。2014 年政府关于“要依托黄金水道,建设长江经济带”的举措将武汉城市圈的发展建设推向新高度。因此,定量研究武汉城市圈城市空间相互作用及其时空演变规律,对于完善我国中西部城市空间联系研究体系、加强城镇体系空间结构判别及优化、确定促进城市群内部优势互补及互动发展战略以实现区域综合竞争力稳步提升具有重要的指导意义。

为此,本研究充分考虑城市形态影响,基于空间相互作用理论内涵修正引力模型,据此利用潜力模型测度空间相互作用强度,并结合 GIS 空间插值方法及 CTCSTP 算法对 2002 ~ 2013 年武汉城市圈城市空间相互作用强度时空演变规律和特征进行定性分析和定量描述,以期揭示城市间相互作用关系,从而为近域城市的整合发展提供合理的调控和引导参考。

1 资料与方法

1. 1 研究区概况

武汉城市圈共覆盖武汉、黄石、鄂州、孝感、黄冈、咸宁、仙桃、潜江、天门 9 市^[27],地处华中腹地,具有纵贯南北、乘东启西的交通区位优势,是长江中游城市群的核心区域,也是整个中部崛起的重要战略支点。自 2004 年批准成立以来,其发展一直受到国家政府的重点关注。武汉城市圈 2007 年底获批“两型社会”综合配套改革试验区,2010 年被列为国家“十二五”重点发展区域,2012 年中部崛起战略的提出使得武汉城市圈的内需潜能研究上升到国家层面。据统计,2015 年武汉城市圈土地面积仅为湖北省的 31. 2%,却集中了全省 53. 3%的常住人口、62. 7%的经济总量,其中武汉市的经济总量占全区域的 58. 8%,其次是黄冈(8. 6%)、孝感(7. 9%)、黄石(6. 6%)三市。目前武汉城市圈处于从发育型转向成熟型的关键时期,为加强中心城市的辐射带动能力并促进其他城市的发展以削弱区域发展规模差异,建立区域产业一体化布局成为当前发展的迫切需求。因此开展近 12 a 武汉城市圈城市空间相互作用时空演变研究,有利于全面掌握其发展演变特征及规律,挖掘当前发展瓶颈,从而为其未来发展规划政策的修订与优化提供依据。

1. 2 研究方法

1. 2. 1 引力模型及其修正

引力模型由万有引力定律推导而来,其一般形式为:

$$F_{ij} = \frac{(W_i \times P_i) \times (W_j \times P_j)}{D_{ij}^b}, \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中: F_{ij} 为 i 、 j 两城市间的引力值; W_i 、 W_j 为经验确定的权重; P_i 、 P_j 分别为 i 、 j 两城市的质量; D_{ij} 为 i 、 j 两城市间的距离; b 为距离摩擦系数。

早期研究多以区域的人口数量或单一社会经济指标衡量城市质量^[14, 18, 28]，以两地间欧式距离表达距离^[29]，简单以 1 或 2 界定距离摩擦系数^[14, 18, 28]。然而，随着城市化进程加快，城市的面貌发生巨大变化，传统引力模型已无法准确地量化城市空间相互作用强度。首先，城市间相互作用成因复杂，以单一指标表征城市质量存在片面性，目前已有研究选取多个指标综合评价城市质量^[1, 2, 6~8]，但基于空间相互作用目的的选取较少，所选指标解释性较差。其次，区域交通可达性不断提高，目前已有学者利用两地间实际交通距离修正距离^[1, 2, 6, 7]，但要素的流动不仅与交通网络有关，而且受到人的主观意识影响，即人口是要素流动的直接驱动因子，而人们对时间的关注往往多于距离，因此城市几何中心间的直线距离或交通距离均与城市间相互作用的实际衰减路径有所差异。最后，b 主要取决于货物的运输性，受交通网络现状和方式、信息网络等的组成和比例制约，以统一赋值的方式忽略了空间关系对城市联系的影响。

文献调研发现，诸多致力于修正引力模型的学者仅对单一或两个参数进行修正^[2, 6~11]，缺乏对模型修正的全面阐述。鉴于此，本研究从 3 方面进行修正：①从城市流角度出发，有针对地选择能有效揭示其要素流动特征的指标，从而构建合理的城市质量指标体系，并以时序全局主成分分析法确定指标权重；②以人口重心间交通网络的最短行车时间替代空间距离；③参考已有成果^[30]对 b 进行界定：当两城市邻接且之间有可通行的高速公路或国道连接，则 b 为 2.25，否则 b 为 2.5；当两城市非邻接且之间有可通行的高速公路或国道连接，则 b 为 2.75，否则 b 为 3。

其中城市质量指标体系由城市空间相互作用的要素流动内涵挖掘建立，指标及其解释见表 1。

表 1 武汉城市圈各城市质量指标体系

一级指标	因素	二级指标	指标解释
经济实力		人均地区生产总值	反映经济发展程度，是辐射带动作用的基本支撑，值越高代表对外溢出辐射作用越强
		全社会固定资产投资	
		投资	
辐射力	科技实力	财政总收入	决定政府在社会经济活动中提供服务及公共物品的范围和数量，实现经济资源在空间上分布的重新配置
		社会消费品零售总额	消费水平决定人口外溢程度
		专利授权当年累计	反映科学技术实力，城市通过外技术转让等形式辐射带动外部区域
产业结构		第三产业占 GDP 比重	反映产业结构，城市通过服务业对外扩张和转移以实现资本溢出等
		高新技术产业增加值占第二产业比重	比重变化反映产业转移及升级的发展现状
		重	
资产流动		进出口总额	
		出口额	衡量资金流动情况，反映对外交流能力
		规模以上工业企业流动资产合计	
人口规模		常住人口	反映对外部区域的需求资源规模，其值的变化体现人流的变化
教育资源		普通高等学校数	教育资源的属性特征
		普通高等学校在校学生数	值越大说明教育资源对人才吸引越大

吸引力	工业企业单位数	说明就业资源情况，如外来人口因就业机会前来工作
	就业机会 就业人数	说明就业岗位情况，值越大说明就业机会对人的吸引越大
	城镇居民人均可支配收入	说明工资待遇情况，如外来人口因工资待遇前来工作
人口输入	入境旅游者人数	外来人口流入规模
	资金输入 实际直接外商投资	外来经济流入规模
交换力	货运总量	反映物流情况
	流通能力 客运总量	反映人流情况
	邮电业务总量	反映信息流情况
服务能力	第三产业就业人数	反映基础服务设施规模

1. 2. 2 潜力模型

潜力模型由引力模型引申而来，用以表征某城市与其所在城市空间分布体系中所有城市间相互作用的可能性强度，即该城市所具备的集聚能力，可以作为反映城镇体系空间相互作用的代表性指标^[31]。其一般表达式为：

$$F_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{P_i P_j}{D_{ij}^b} + \frac{P_i P_i}{D_{ii}^b}, (i \neq j) \quad (2)$$

式中： $\sum_{j=1}^n F_{ij}$ 为 i 城市与其他 n 个城市及其自身的相互作用量总和，即该城市的潜力值 F_i ； D_{ii} 以 i 城市与其最邻近城市之间距离的一半或 i 城市本身面积的平均半径表示。

1. 2. 3 IDW 空间插值法

对城市群城市空间相互作用强度进行连续空间趋势分析是揭示其结构布局空间演变规律的有效方式。因此，基于 ArcGIS10.1 的反距离权重法 (Inverse Distance Weighted, IDW) 对各城市相互作用强度进行空间插值，生成强度的连续空间趋势图，并结合同色渲染对比法定性分析其时空演变特征。

1. 2. 4 CTCSTP 算法

基于重心转移曲线的时空演化模型表达方法 (Centroid Transferring Curve Based Spatio-temporal Pattern Expression, CTCSTP)^[32] 即在重心模型的基础上引入时间维度，以多时期的加权重心点构成的转移曲线准确客观地描述属性重心转移量及转移方向，从而实现地理现象在“空间格局”和“时间过程”双维度上分布特征及变化规律的定量表达，能有效弥补 IDW 插值法图形分析中不可避免的主观判断。其一般计算步骤包括：①计算研究区域的几何中心；②利用属性加权计算各时点的事件重心，组成事件重心点集；③计算各时点事件重心与几何中心的偏移向量，根据其大小和方向判断区域地理时间分布的均衡度；④计算相邻时点的重心转移向量，定量表达地理事件的时间演变规律；⑤绘制事件重心转移轨迹，实现地理事件时空演变格局的可视化表达。其中事件重心计算公式见 (3)，重心偏移向量公式见 (4)，重心转移向量公式见 (5)。

$$\begin{aligned} X_t &= \frac{\sum_{i=1}^n (A_{ti} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n A_{ti}}, Y_t \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (A_{ti} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n A_{ti}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_t &= \sqrt{(Y_t - Y_G)^2 + (X_t - X_G)^2}, \\ E\theta_t &= n \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{Y_t - Y_G}{X_t - X_G}\right) \quad (n=0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} L_t &= \sqrt{(Y_{t+1} - Y_t)^2 + (X_{t+1} - X_t)^2}, \\ L\theta_t &= n \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{Y_{t+1} - Y_t}{X_{t+1} - X_t}\right) \quad (n=0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (5)$$

式中： X_t 、 Y_t 为第 t 年区域的某属性分布重心坐标； n 为第 t 年区域的总区（县）数； A_{ti} 为第 t 年区域内 i 区（县）的某属性值； X_i 、 Y_i 为区域内 i 区（县）的几何中心坐标； X_G 、 Y_G 为区域的几何中心坐标； E_t 、 $E\theta_t$ 分别为第 t 年区域某属性重心偏移于区域几何中心的距离和角度； L_t 、 $L\theta_t$ 分别为第 t 年到第 $t+1$ 年区域某属性重心的转移距离和转移角度。

1. 3 数据来源及处理

本研究以武汉城市圈中的 9 个城市为基本地域单元，研究的时间跨度为 2002 ~ 2013 年，以探索武汉城市圈建立前后空间相互作用变化特征的思路将其分为 2002、2004、2006、2008、2010、2011、2012、2013 年共 8 个时间节点。

空间数据包括武汉城市圈市（县）域的行政区划图及历年道路网络，其中行政区划图来源于 1 : 400 万国家基础地理信息矢量数据，部分缺失县域由城市的栅格地图经配准、矢量化等处理进行补充；历年道路网络数据由历年《中国高速公路及城乡公路网地图集》经地理配准、数字化等处理得到，并根据《中华人民共和国公路工程技术标准》(JTG B01-2003)及湖北省的实际限速规定，给定各级道路网平均时速，其中高速路为实际规定限速，一般国道为 80 km/h，一般省道为 60 km/h。

统计数据主要来自历年《湖北省统计年鉴》，部分来自历年《中国城市统计年鉴》、《湖北省交通运输年鉴》、《湖北省教育年鉴》、《湖北企业年鉴》、各城市统计年鉴及对应国民经济和社会发展统计公报。个别年份存在数据缺失，本研究采用插值法进行补充。

2 武汉城市圈城市空间相互作用时空演变分析

2. 1 武汉城市圈城市间引力值测算

基于空间相互作用理论内涵及城市空间形态变化对其的影响，合理界定引力模型中各参数，由此测算武汉城市圈城市间引力值。步骤如下：

(1) 城市质量得分测算。依据表 1 所列指标及其历年统计数据，引入时序全局主成分分析法求取各指标权重，计算得到各城市历年综合质量得分，并使用 Origin9. 0 绘制城市质量折线图(图 1)。

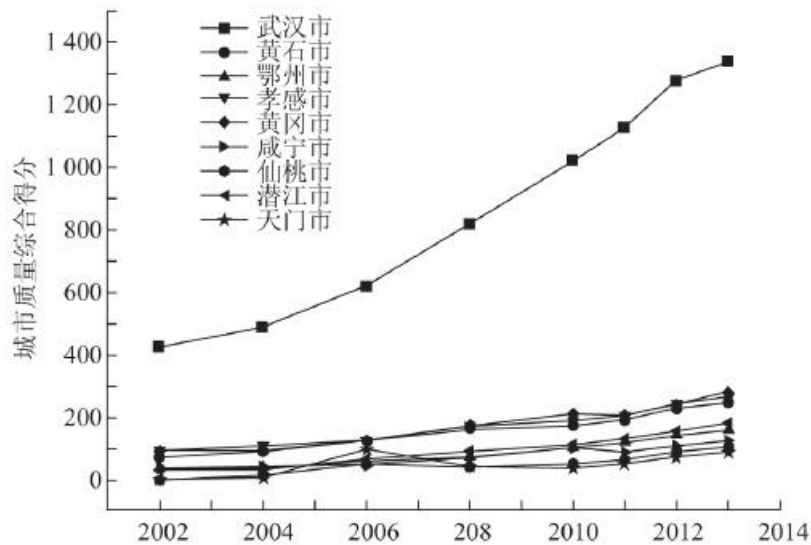


图 1 2002~2013 年武汉城市圈各城市质量综合得分
Fig. 1 Scores of the Comprehensive Power of Cities in
Wuhan Metropolitan Area from 2002 to 2013

(2) 城市间时间距离测算。对历年道路矢量数据进行拓扑重建并生成网络数据集，通过人口重心模型测算历年人口重心坐标，并以其作为城市抽象节点，依次进行网络分析得到历年城市间最短时间距离。

(3) 距离摩擦系数界定。例如界定武汉市与其他城市间 b 的取值，由于武汉市仅与潜江、天门两市不邻接，那么其与这两市间相互作用 b 的取值为 2.75 或 3，而与其他城市的 b 值为 2.25 或 2.5。进一步逐年判断武汉与各城市间是否有高速公路通行来确定最终的界定结果。这种充分考虑城市之间的空间邻接关系及高等道路通行情况，从而对距离摩擦系数 b 进行修正的方式，能更充分体现城市空间相互作用的产生依托于道路通行的本质。

(4) 城市间引力值测算。依据修正的引力模型计算得到武汉城市圈历年城市间引力值。其中 2013 年城市间引力值见表 2。

表 2 2013 年城市间引力值

引力值	武汉	黄石	鄂州	孝感	黄冈	咸宁	仙桃	潜江
黄石	17.491							
鄂州	40.932	13.523						
孝感	78.237	0.144	0.249					
黄冈	15.338	3.998	3.697	2.035				
咸宁	4.455	2.213	0.089	0.055	0.060			
仙桃	10.078	0.050	0.076	1.498	0.037	0.025		
潜江	0.370	0.023	0.029	0.057	0.019	0.012	1.916	
天门	0.376	0.021	0.028	0.724	0.020	0.012	2.158	2.315

2. 2 武汉城市圈城市空间相互作用强度的时空演变

2. 2. 1 基于潜力模型的潜力强度测算及其时间演变

依据引力测算结果，利用式(2) 计算得到潜力值，表征武汉城市圈历年城市空间相互作用强度(表3) ， 并据此绘制城市空间相互作用强度及其排名的动态变化趋势(图2) 以分析其时间演变特征。

表 3 2002 ~ 2013 年武汉城市圈各城市潜力强度

	武汉市	黄石市	鄂州市	孝感市	黄冈市	咸宁市	仙桃市	潜江市	天门市
2013	167. 277	37. 462	58. 624	82. 999	25. 205	6. 922	15. 838	4. 741	5. 654
2012	147. 887	30. 588	51. 180	72. 915	20. 187	5. 627	12. 892	3. 544	4. 144
2011	106. 392	22. 405	30. 332	59. 179	14. 446	4. 534	10. 731	2. 043	2. 421
2010	90. 291	17. 535	23. 632	50. 056	13. 253	2. 847	11. 267	1. 534	1. 690
2008	57. 900	13. 000	14. 547	34. 970	5. 770	1. 922	6. 370	1. 072	1. 458
2006	28. 553	7. 868	9. 076	15. 411	3. 237	1. 038	2. 997	0. 722	0. 524
2004	13. 175	4. 347	5. 015	5. 582	1. 784	0. 380	1. 886	0. 144	0. 006
2002	9. 913	3. 055	3. 534	4. 199	1. 540	0. 359	1. 351	0. 009	0. 004

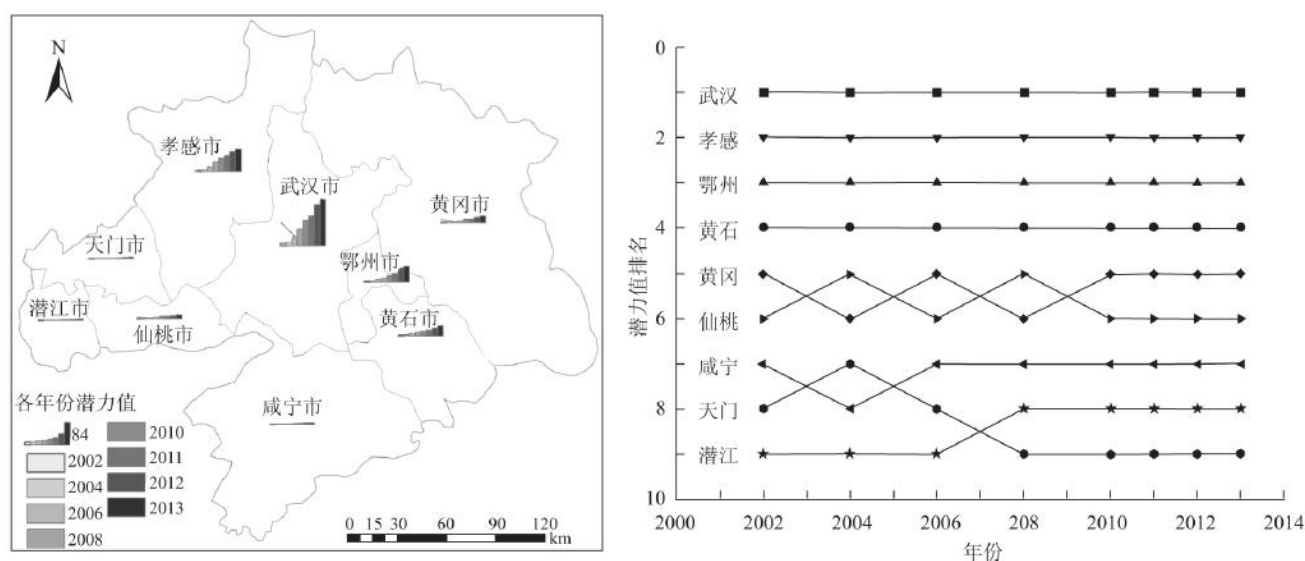


图 2 2002~2013 年武汉城市圈各城市潜力强度的时间演变

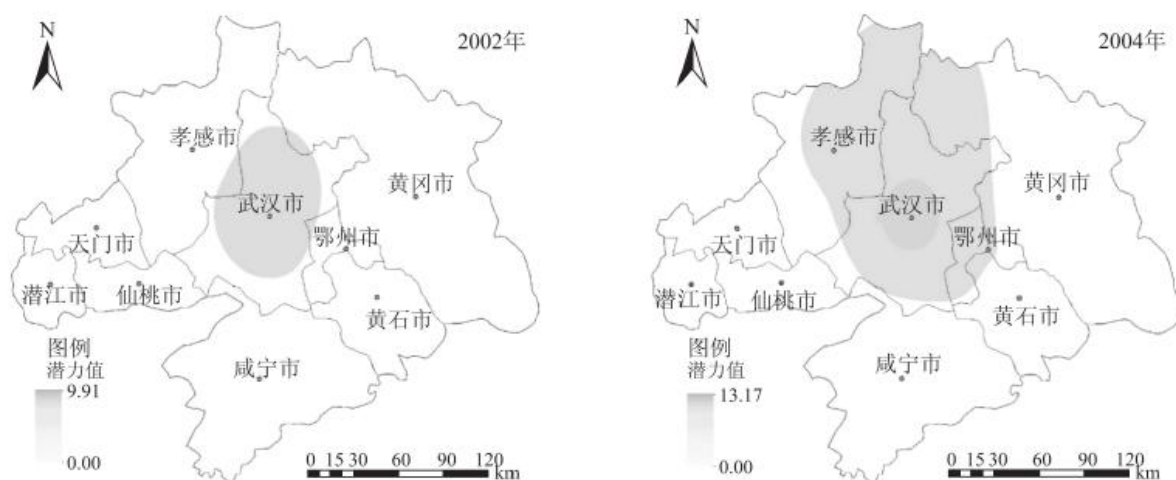
Fig. 2 Potential Time Evolution of Cities in Wuhan Metropolitan Area from 2002 to 2013

由图2 可知：①近 12a 来武汉、孝感、鄂州、黄石潜力值一直稳居前 4 名，“西北—东南”方向轴线式发展特征明显； 4 市潜力值始终高于其他城市，且均呈逐步增长趋势。尤其武汉市的潜力值远大于其他城市且其增幅日趋显著，充分说明其作为武汉城市圈的中心城市对周边城市有着很强的辐射带动作用，在整个城市圈内处于核心地位。而孝感、鄂州和黄石 3 市，相对于其他城市也有着明显的集聚优势，在城市圈发展过程中起到了越来越重要的作用，有望形成新的区域集散中心。②潜力值次之的是黄冈和仙桃，其排名一直处于第 5 或第 6，两市均与武汉和孝感地理位置紧邻而受到较大的经济辐射影响。2002 ~ 2010

年间两市潜力值相当，排名保持第 5、6 位间的螺旋变化；自 2010 年以后黄冈增幅明显高于仙桃，两市潜力值差异逐渐变大，排名分别稳定在第 5、6 位。作为武汉城市圈西翼副中心城市，仙桃市的潜力值除 2011 年外均有所提高，对外辐射能力逐步加强。③咸宁、天门、潜江三市始终位于最后三名但数值均在逐年增大，三者位次略有起伏变化，集聚能力均较弱。其中天门、潜江两市基本稳定在最后两名，由于地理位置距离其他城市较远且自身发展水平不高，受腹地经济支持有限，对武汉城市圈的发展贡献最小。

2. 2. 2 基于 IDW 的潜力强度空间扩展演变

利用 IDW 对历年各城市潜力值进行空间插值，得到 8 个时间断面的潜力强度空间分异图(图 3)。由此将近 12a 武汉城市圈城市潜力强度空间演变格局划分为 3 个阶段：①低速发展阶段(2002 ~ 2004 年)，中心城市对外辐射范围缓慢扩张，整体低水平潜力提高缓慢。2002 年武汉城市圈的空间相互作用强度整体都处于偏低状态，仅武汉市与其地理邻接的孝感市、黄冈市、鄂州市具有 5 个单位以上的空间相互作用强度；至 2004 年，武汉市辐射范围逐渐向西北方向移动且范围扩大，涉及孝感及鄂州等地。②快速发展阶段(2004 ~ 2008 年)，中心城市对外辐射范围急剧扩大，整体潜力水平提高迅猛。2004 年即武汉城市圈成立之后，城市间的经济联系不断加强。至 2006 年，武汉市的辐射范围已覆盖到其周边所有邻接城市，仅位于武汉城市圈边缘西南部的天门、潜江、仙桃、咸宁几乎未受到武汉市的经济辐射影响，空间相互作用强度处于整个区域的最低水平。2008 年，武汉市对外辐射网络已基本覆盖整个区域。③稳定发展阶段(2008 ~ 2013 年)，辐射网络持续稳定增长并逐渐趋近饱和。2008 年以后中心城市辐射范围扩大趋势逐渐变缓，2011 年基本保持稳定，至 2013 年基本达到饱和状态，总体表现为辐射能力的持续强化。在这一阶段中，孝感市一直积极加强与武汉市的空间联系，并逐渐成为区域内第二小型辐射中心，主要带动西南部与之相邻的天门市和潜江市，以促进区域内因距离及自身实力限制而形成的发展盲区的空间相互作用强度的提高。



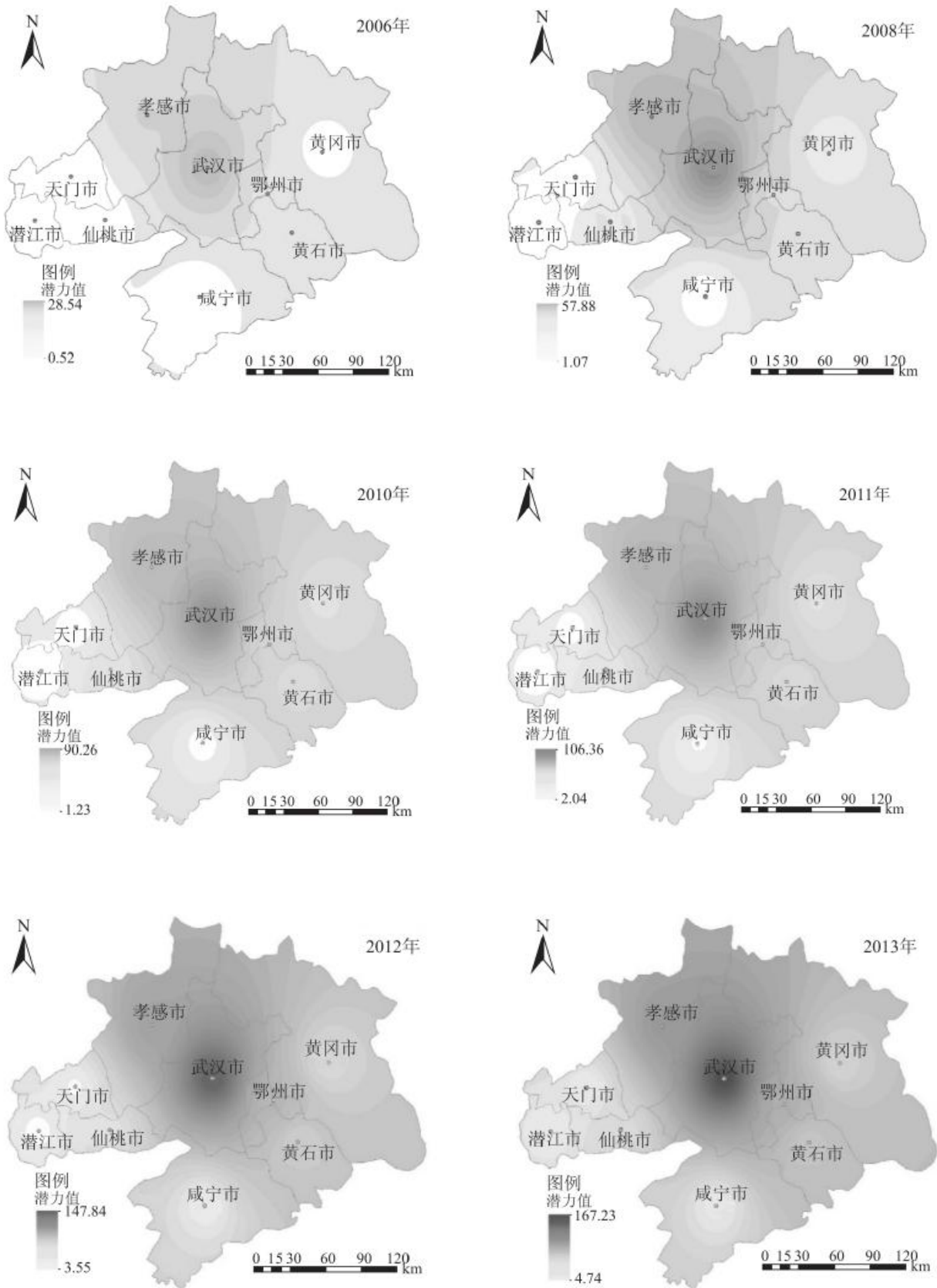


图3 2002~2013年武汉城市圈潜力强度空间分异图

Fig. 3 Potential Spatial Differentiation of Wuhan Metropolitan Area from 2002 to 2013

由图 3 总结规律：①城市圈内部空间相互作用强度分布表现出以武汉为中心向四周递减的规律，并具有显著的圈层式结构特征；递减量呈现出一定的空间变异性，西南部地区一直以来是整个区域的空间相互作用低值聚集区。②与中心城市地理位置邻接效果越显著，其受到的辐射作用越强烈。孝感与武汉的整个西北部紧邻，其受到的辐射作用最为强烈；西南部的潜江、天门、仙桃、咸宁 4 市位于整个研究区域的边缘地带，与武汉相距较远，交通通达性发展较慢，属于中心城市辐射能力的薄弱地带。③空间相互作用强的城市对外辐射能力也强。武汉市潜力强度及其增长幅度一直保持最高水平，中心地位十分显著，其“一城独大”现象在研究期内并未得到缓和；其次是孝感市，在自身发展不断变强的情况下，逐渐成为武汉城市圈内继武汉之后新的对外辐射中心，但其辐射网络尚处于初级发展阶段。

2. 2. 3 基于 CTCSTP 的潜力重心结构布局演变

重心偏移向量即区域几何中心和属性重心连接而成的有向线。该向量可以表达地理属性分布的位置，其偏移方向为地理属性发生热区的方向。利用式(4) 计算结果见下表 4。

表 4 2002 ~ 2013 年武汉城市圈潜力重心偏移距离及角度

年份	偏移距离 (m)	偏移角度	年份	偏移距离 (m)	偏移角度
2002	10 512.03	西北 68.69	2010	2 3620.36	西北 50.82
2004	9 922.65	西北 61.24	2011	22 069.19	西北 51.27
2006	18 482.41	西北 49.71	2012	18 939.85	西北 53.76
2008	25 319.74	西北 46.82	2013	18 131.43	西北 52.69

由表 4 可知，潜力中心均偏离于几何中心的西北方向，即空间联系发生较紧密的热区地带，不同年份的热区地带偏移距离和角度存在一定差异，表明空间联系逐年产生变动，其中 2008 年的偏移距离最大，表明空间联系强度的“高密度”部位达到不均衡状态的峰值阶段，之后偏移距离缓慢减少，即城市圈空间联系的不均衡发展态势逐渐得到缓解与控制。

重心转移向量即区域当前时点与其后一相邻时点的属性重心连接的有向线。利用式(5) 计算结果见下表 5，将潜力重心转移向量连续绘制即得到潜力重心转移曲线(图 4)。

表 5 2002 ~ 2013 年武汉城市圈潜力重心转移距离及角度

年份	转移距离 (m)	转移角度	年份	转移距离 (m)	转移角度
2002	/	/	2010	2 372.55	东南 7.43
2004	1 340.36	西南 43.95	2011	1 560.80	东南 44.49
2006	8 934.80	西北 37.59	2012	3 241.55	东南 37.18
2008	6 919.26	西北 39.27	2013	8 72.38	东南 77.53

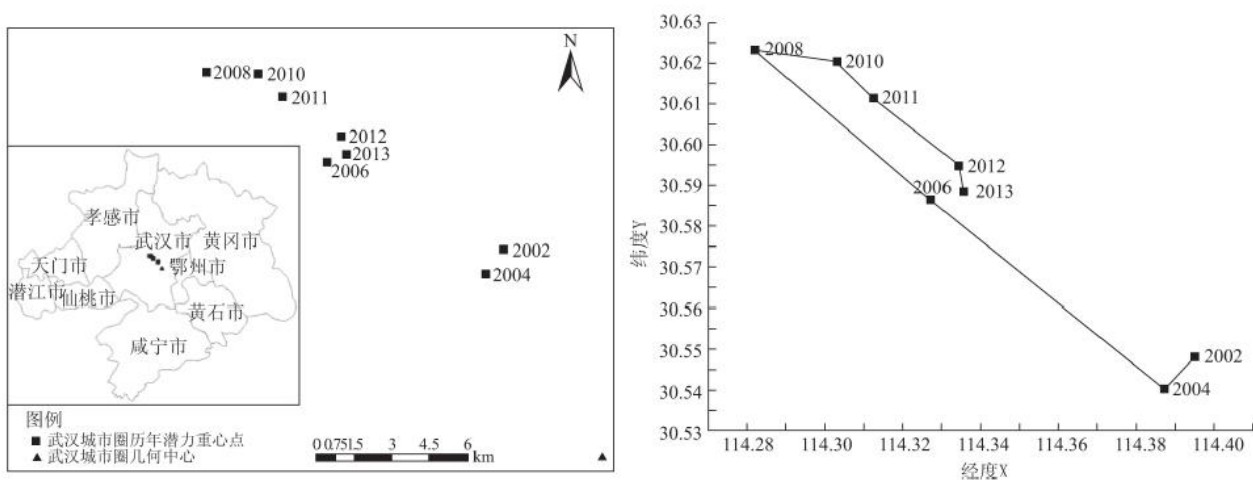


图4 2002~2013年武汉城市圈潜力重心位置(左)及转移轨迹(右)

Fig. 4 Centroid(left) and Its Transferring Curve(right) of Potential Strength in Wuhan Metropolitan Area from 2002 to 2013

分析知, 2002 ~ 2013 年武汉城市圈潜力重心转移存在如下特点: ①历年潜力重心处于几何中心西北部, 在武汉市主城区的武昌、江岸两区中移动, 表明历年来武汉市在整个区域的空间相互作用优势明显, 体现了武汉市显著的中心城市地位; 潜力重心偏离区域几何中心且偏移程度存在一定差异, 表明研究期间武汉城市圈的空间相互作用强度分布存在一定的地域差异性。②潜力重心的时空格局总体上表现出由东南向西北的移动特征, 究其原因, 武汉城市圈西南部诸如仙桃、天门、潜江等城市由于经济实力较弱、交通水平的相对不发达, 与其他城市间的相互作用强度受到严重阻碍。2002 ~ 2004 年潜力重心较集中, 偏移几何中心的距离较小, 说明城市之间的联系量保持均衡稳定性发展; 2004 ~ 2008 年潜力重心向西北方向转移, 移动幅度明显增大, 说明武汉城市圈内西北部城市与外界城市的联系活动产生急剧增大效应, 城市圈机制的建立促进了近邻城市间的空间联系; 2008 年以后, 潜力重心移动幅度明显变缓, 出现逐步稳定回调趋势, 城市圈内城市之间的联系机制已趋于成熟, 但仍处于几何中心西北部地区, 武汉城市圈应及时通过产业结构转移等措施带动西南部地区, 以加强多核心及组团发展模式, 调整目前整个城市圈显著的“一城独大”发展现状。

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究首先从空间相互作用内涵出发挖掘其影响因素, 并结合特定研究区域对城市质量指标体系进行重构, 采用时序全局主成分分析法测算城市质量; 其次引入人口重心及网络分析法, 对城市间交通时间进行测算; 最后依据空间关系界定距离摩擦系数, 由此测算引力值和潜力强度, 并结合 GIS 空间分析技术和重心转移算法对武汉城市圈 2002 ~ 2013 年城市空间相互作用时空演变规律进行了多角度探索。得到如下结论: (1) 武汉城市圈城市空间相互作用强度整体上呈现递增趋势, 局部差异明显。其中武汉市与城市圈内其他城市间相互作用总强度远大于其他城市; 孝感和鄂州次之, 且均表现为依附武汉市发展。此外, “孝感—武汉—鄂州—黄石”轴线式空间联系特征明显, 其余城市始终为空间联系发展弱区。(2) 武汉城市圈城市空间相互作用呈现出以武汉为中心且对外依次减弱的圈层式辐射结构, 近 12a 来辐射范围持续扩大且于 2011 年基本趋于稳定。(3) 武汉城市圈空间相互作用呈现“西南部低、北部高、东部适中”的空间分异特征; 区域空间相互作用重心由南向北转移特点明显, 区域发展不均衡特性显著。

总体而言, 武汉城市圈处于空间差异化较大且日趋显著的发展时期, 近 12a 来, 其“跨度”瓶颈并未得到明显突破。究其原因, 各城市产业发展存在差异性, 且协作分工未能形成一套统一的组织化制度; 城市内部交通网络系统存在差异性。因此,

政府应该不断激发区域创新发展活力,积极推进区域内弱小城市的发展进程;充分发挥其决策力量,完善产业合作机制,把握城市间互补优势;重视区域副中心城市和西翼副中心城市的发展,加强“仙桃—潜江—天门”的组团式发展。此外,加强联络线建设,尤其要完善武汉城市圈核心区外部及边缘地带的交通网络结构,以促进中心城市与边缘城市的联系强度,使武汉城市圈形成健康均衡的循环发展模式,最终实现综合竞争力的提高。

3. 2 讨论

本研究对城市空间相互作用测算方法进行了有益探索,在城市群空间联系定量测度研究中具备一定的理论价值和现实意义。其优点在于从空间相互作用内涵出发,引入空间形态因素对引力模型进行了全面修正,使得测算结果更符合城市联系特征,同时采用定性与定量相结合的方法进行结果分析,能更全面地掌握空间相互作用演变规律。但本研究采用大量静态数据,且针对缺失数据选用的填补方式缺乏实践支撑。城市空间相互作用表现为人流、物流、信息流、资金流、技术流等城市流形式,若能采用这些流动数据作为模型的原始数据,模型测度结果可能与实际更为逼近。目前基于移动设备可获取海量个体的移动轨迹数据,带有位置标记服务的社交媒体签到数据可提取出大空间尺度的个体移动模式,这些海量的时空动态数据能更好地描述城市空间联系强度。如何实时抓取并存储海量的流动数据,并将之合理运用到空间交互领域中,这是值得尝试的方向。同时,针对数据缺失问题,如何选取合适的填补模型及对填补效果进行定量评价也是后期需要深入研究的一点。

参考文献:

- [1] 李俊峰,焦华富. 江淮城市群空间联系及整合模式[J]. 地理研究,2010,29(3):535~544.
- 【LI J F, JIAO H F. Research on spatial combination and integrated patterns of Jianghuai Urban Agglomeration [J]. Geographical Research, 2010, 29(3):535-544.】
- [2] 关晓光,刘柳. 基于修正引力模型的京津冀城市群空间联系分析[J]. 城市问题,2014,33(11):21-26.
- 【GUAN X G, LIU L. The spatial connection analysis based on the modified gravity model in urban agglomeration of Beijing Tianjin-Hebei [J]. Urban problems, 2014, 33(11):21-26.】
- [3] HAGGETT P, CLIFF A D, FREY A. Locational analysis in human geography [J]. Geographical Review, 1967, 68(2):363-67.
- [4] WILSON A G. A statistical theory of spatial distribution models [J]. Transportation research, 1967, 1(3):253-269.
- [5] SIMINI F, GONZ LEZ M C, MARITANA, et al. A universal model for mobility and migration patterns[J]. Nature, 2012, 484(7392):96-100.
- [6] 梅志雄,徐颂军,欧阳军,等. 近20年珠三角城市群城市空间相互作用时空演变[J]. 地理科学,2012,32(6):694-701.
- 【MEI Z X, XU S J, OU Y J, et al. The spatio-temporal evolvement of spatial interaction among cities of Zhujiang River delta in recent 20 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6):694-701.】

-
- [7] 关伟, 周忻桐. 辽中南城市群空间相互作用的时空演变 [J]. 经济地理, 2014, 34(9) : 48—55.
- 【GUAN W, ZHOU X T. The spatio-temporal evolvement of spatial interaction among cities of South Central Liaoning [J]. Economic Geography, 2014, 34(9) : 48—55. 】
- [8] 刘静玉, 杨虎乐, 宋琼, 等. 中原经济区城市间相互作用时空格局演变研究 [J]. 地理科学, 2014, 34(9) : 1060—1068.
- 【LIU J Y, YANG H L, SONG Q, et al. Spatio-temporal pattern evolution of the interaction among the cities in central plains economic zone [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(9) : 1060—1068. 】
- [9] 鄢小兵, 徐艳兰, 高谦. 武汉城市圈经济空间关联研究 [J]. 地域研究与开发, 2015, 34(5) : 47—52.
- 【YAN X B, XU Y L, GAO Q. research on economic spatial linkages in Wuhan urban circle [J]. Areal Research and Development, 2015, 34(5) : 47—52. 】
- [10] 周晓艳, 华敏, 秦雅雯, 等. 长江中游城市群空间联系研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25 (10) : 1492—1500.
- 【ZHOU X Y, HUA M, QIN Y W, et al. Urban agglomeration spatial contacts research in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(10) : 1492—1500. 】
- [11] 杨立, 郝晋珉, 王绍磊, 等. 基于空间相互作用的农村居民点用地空间结构优化 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(10) : 308—315.
- 【YANG L, HAO J M, WANG S L, et al. Spatial structure optimization of rural residential land based on spatial interaction [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10) : 308—315. 】
- [12] 万庆, 曾菊新. 基于空间相互作用视角的城市群产业结构优化——以武汉城市群为例 [J]. 经济地理, 2013, 33(7) : 102—108.
- 【WAN Q, ZENG J X. The optimization of industrial structure of urban agglomeration from the perspective of spatial interaction: case study of Wuhan Metropolitan area [J]. Economic Geography, 2013, 33(7) : 102—108. 】
- [13] 罗世俊, 叶舒娟, 王秉建. 泛长江三角洲城市群空间整合发展研究 [J]. 经济问题探索, 2008, 29(12) : 43—47.
- 【LUO S J, YE S J, WANG B J. Study on the spatial integration of the urban agglomeration in the Pan Yangtze River Delta [J]. Inquiry into Economic Issues, 2008, 29(12) : 43—47. 】
- [14] 薛领, 杨开忠. 基于空间相互作用模型的商业布局——以北京市海淀区为例 [J]. 地理研究, 2005, 24(2) : 265—273.

【XUE L, YANG K Z. Spatial planning of commercial allocation in Haidian District in Beijing based on spatial interactive models [J]. Geographical Research, 2005, 24(2) : 265—273. 】

[15] 吴爱芝, 李国平, 孙铁山, 等. 北京世界城市区域的空间范围划分研究 [J]. 城市发展研究, 2012, 19(11) : 64—69.

【WU A Z, LI G P, SUN T S, et al. Study on spatial dimension of global City-Region of Beijing [J]. Urban Development Studies, 2012, 19(11) : 64—69. 】

[16] 钟业喜, 陆玉麒. 基于空间联系的城市腹地范围划分——以江苏省为例 [J]. 地理科学, 2012, 32(5) : 536—543.

【ZHONG Y X, LU Y Q. Measuring method of urban hinterland based on spatial linkage: a case of Jiangsu Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(5) : 536—543. 】

[17] 赵雪雁, 江进德, 张丽, 等. 皖江城市带城市经济联系与中心城市辐射范围分析 [J]. 经济地理, 2011, 31(2) : 218—223.

【ZHAO X Y, JIANG J D, ZHANG L, et al. The economic links between the cities in Wangjiang Urban Belt and the radiation scope of the central city [J]. Economic Geography, 2011, 31(2) : 218—223. 】

[18] 宋小冬, 廖雄起. 基于 GIS 的空间相互作用模型在城镇发展研究中的应用 [J]. 城市规划汇刊, 2003, 47(3) : 46—51.

【SONG X D, LIAO X J. GIS based spatial interactive models and their application in regional urban development study [J]. Urban Planning Forum, 2003, 47(3) : 46—51. 】

[19] 孟德友, 陆玉麒, 史本林. 基于路网的江苏城市空间相互作用测度 [J]. 商丘师范学院学报, 2009, 25 (9) : 112 —118.

【MENG D Y, LU Y Q, SHI B L. The measurement of spatial interaction among cities in Jiangsu Province based on highway network [J]. Journal of Shangqiu Normal University, 2009, 25(9) : 112—118. 】

[20] 薛景丽. 基于 GIS 和 SEM 的城市空间相互作用测度方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2012.

【XUE J L. Research on measurement method of urban spatial interaction based on GIS and SEM [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. 】

[21] 陈建军, 郑广建, 刘月. 高速铁路对长江三角洲空间联系格局演化的影响 [J]. 经济地理, 2014, 34(8) : 54—60.

【CHEN J J, ZHEN G J, LIU Y. The spatial connection evaluation of Yangtze River Delta with the high-speed rail. Economic Geography, 2014, 34(8) : 54—60. 】

[22] 李红锦, 李胜会. 基于引力模型的城市群经济空间联系研究——珠三角城市群的实证研究 [J]. 华南理工大学学报(社会科学版), 2011, 13(1): 19—24.

【LI H J, LI S H. Gravity model based on spatial connection of urban agglomeration economies: an empirical study of the Pearl River Delta City group [J]. Journal of South China University of Technology(Social Science Edition), 2011, 13(1): 19—24. 】

[23] 张建营, 毛艳华. 珠三角城市群经济空间联系实证分析 [J]. 城市问题, 2012, 31(10): 2—8.

【ZHANG J Y, MAO Y H. An empirical analysis of economic space links of the pearl River Delta Urban Agglomeration [J]. Urban Problems, 2012, 31(10): 2—8. 】

[24] 陈伟劲, 马学广, 蔡莉丽, 等. 珠三角城市联系的空间格局特征研究——基于城际客运交通流的分析 [J]. 经济地理, 2013, 33(4): 48—55.

【CHEN W J, MA X G, CAI L L, et al. Characteristics of regional city connection's spatial pattern based on intercity passenger traffic flow in Pearl River Delta [J]. Economic Geography, 2013, 33(4): 48—55. 】

[25] 许露元, 李红. 城市空间经济联系变化的网络特征及机理——以珠三角及北部湾地区为例 [J]. 城市问题, 2015, 34(5): 20—26.

【XU L Y, LI H. The network characteristics and mechanism of the change of urban spatial economic relations: a case study of the Pearl River Delta and Beibu Gulf [J]. Urban problems, 2015, 34(5): 20—26. 】

[26] 刘建朝, 高素英. 基于城市联系强度与城市流的京津冀城市群空间联系研究 [J]. 地域研究与开发, 2013, 32(2): 57—61.

【LIU J Z, GAO S Y. The research of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration's spatial connection based on urban relation intensity and urban flow [J]. Areal Research and Development, 2013, 32(2): 57—61. 】

[27] 张贞冰, 陈银蓉, 王婧. 武汉城市圈空间组织演化评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(10): 1344—1350.

【ZHANG Z B, CHEN Y R, WANG J. Evaluation of the spatial evolution of the organization of Wuhan Metropolitan area [J]. Resources and Environment of Yangtze River Basin, 2014, 23(10): 1344—1350. 】

[28] 苗长虹, 王海江. 河南省城市的经济联系方向与强度——兼论中原城市群的形成与对外联系 [J]. 地理研究, 2006, 25(2): 222—232.

【MIAO C H, WANG H J. On the direction and intensity of urban economic contacts in Henan Province [J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 222—232. 】

[29] 陈彦光, 刘继生. 基于引力模型的城市空间互相关和功率谱分析——引力模型的理论证明、函数推广及应用实例 [J]. 地理研究, 2002, 21(6): 742—752.

【CHEN Y G, LIU J S. Derivation and generalization of the urban gravitational model using fractal idea with an application to the spatial cross-correlation between Beijing and Tianjin [J] . Geographical Research, 2002, 21(6) : 742—752. 】

[30] 张荆荆. 城市间相互作用对城镇用地扩张的影响 [D] . 武汉: 华中农业大学, 2014.

【ZHANG J J. Impacts of urban spatial interaction on the urban land expansion——a case study of Wuhan City Circle [D] . Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2014. 】

[31] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学 [M] . 北京: 高等教育出版社, 1997: 196—198.

【XU X Q, ZHOU Y X, NING Y M. Urban Geography [M] . Beijing: Higher education press, 1997: 196—198. 】

[32] 李光强, 曾绍琴, 邓敏, 等. 重心转移曲线在时空演化模式表达中的应用 [J] . 武汉大学学报(信息科学版) , 2013, 38(8) : 940—944.

【LI G Q, ZENG S Q, DENG M, et al. Employing a centroid transferring curve to spatio-temporal evolution patterns [J] . Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(8) : 940—944. 】