

基于逆向重力模型的城市质量测算 及其影响因子分析

金凤君¹, 刘 鹤^{1,2}, 许 旭^{1,2}

(1. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:基于逆向重力模型及标准代数算法,利用城际O-D客流矩阵和铁路最短距离矩阵,测算了28个省会城市和直辖市的城市质量。在此基础上,采用相关系数及线性回归等统计方法,研究了人口、GDP等因素对城市质量的影响。研究发现,城市质量总体上呈现由东向西递减的趋势,其等级结构呈现“纺锤体”特征。诸多影响因素中,从业人员是刻度城市质量的最佳指标,交通枢纽的城市地位对“轴—辐”网络城市质量具有重要影响。城市质量的线性拟合方面,复合指标比单一指标具有更好的解释力。

关 键 词:逆向重力模型;标准代数算法;城市质量;铁路O-D客流

1 引言

重力模型最初来源于物理学万有引力定律在空间相互作用理论研究中的应用。万有引力定律认为,任何两个物体之间都存在着吸引力(G_{ij}),而引力的大小与二者的质量(m)成正比,与二者之间距离的平方(d_{ij}^2)成反比。1858年,Carey首次将该模型引入社会经济相互作用中^[1]。经过20世纪的发展,重力模型已成为城市规划、人文与经济地理学,区域科学,交通规划学和人口统计学等众多学科的研究热点^[2-8]。空间相互作用理论认为,城市间的相互作用与城市的“质量”(nodal attractions)正相关,与城市间的距离反相关,即城市“质量”越大,与周边城市的空间作用越强,而空间作用随着距离的增加呈现衰减趋势。在此,城市“质量”是指城市自身具有的影响空间相互作用强弱的节点属性。

对于重力模型的理论及实证研究,学术界主要有两种思路。传统的研究思路是根据已知的节点质量和距离数据求解空间联系^[5-7],其中,节点质量多采用人口或者GDP数据。另一种研究思路为反

推重力模型,即根据已知的空间联系和距离数据求解节点质量及相关参数^[8-18]。在第二种研究思路中,存在两种研究视角,①将节点质量简化为已知的单一要素,如人口或GDP等,而转而研究不同时空下节点质量参数的变化^[9,18];②将节点质量视为未知的代求解的变量,而节点质量是人口、GDP等多种要素的函数,因而不存在参数校正问题^[18,10-17]。

在求解城市质量方法上,主要有迭代算法^[10]、统计回归估计算法^[11-13]、线性规划算法^[14]和标准代数算法^[8,15-16]。标准代数算法由Shen^[15]于1999年首次提出,2002年进行了改进^[16],并于2004年基于美国25个城市间的机场O-D客流矩阵和航空距离矩阵对城市质量进行了测算^[8]。国内方面,2008年刘晓明等利用该方法基于中国15个城市间的机场O-D客流矩阵和航空距离矩阵对机场旅客吞吐量进行了估算^[17]。标准代数算法不需要对重力模型进行对数变换,因此,理论上比经过对数变换后的线性回归等方法能得到更准确的结果^[17]。此外,相对于传统算法,标准代数算法非常适合于大规模O-D流矩阵分析^[8]。

收稿日期:2010-10; 修订日期:2011-01.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40635026)。

作者简介:金凤君(1961-),男,内蒙古宁城县人,研究员,博士生导师。主要研究方向为交通运输地理与区域经济学。

E-mail: jinfj@igsnrr.ac.cn

通讯作者:刘鹤, E-mail: liuh.08b@igsnrr.ac.cn

对于城市质量影响因子的识别研究,Shen于2004年提出了实现路径,但他本人并未进行实证研究^[8]。中国学者多采用人口等单一要素作为城市质量的度量,且认为这种做法是有效的^[18-19]。然而,城市质量的影响因素是复杂的^[9],将人口等单一要素视为城市质量的简单处理方法不能得到很好的拟合效果。本研究首次以城市间铁路O-D客流矩阵和铁路里程矩阵作为外生变量,使用逆向重力模型和多元线性回归等方法进行实证分析,对28个省会城市或直辖市的质量进行了测算,在此基础上,探讨了人口、GDP等要素与城市质量的关系。

2 方法与数据

2.1 逆向重力模型及标准代数算法

本研究将节点质量视为多个要素的函数,因此不存在质量参数问题,重力模型表达式为:

$$G_{ij} = kP_i(o_i, t_i, e_i, \dots)P_j(o_j, t_j, e_j, \dots)/F(d_{ij}) \quad (1)$$

式中: G_{ij} 为从 i 地与 j 地之间的空间作用大小或交通流量; k 为一个比例常数; P_i 、 P_j 分别为 i 地和 j 地的“质量”函数; o_i 、 t_i 、 e_i 、 o_j 、 t_j 、 e_j 分别为 i 地和 j 地的人口、GDP、就业结构等因素; $F(d_{ij})$ 为距离约束函数,实证研究中通常以指数形式来估测距离衰减效应的强度,其中距离的衡量可以是两地间的实际距离,也可以是出行时间或费用等。令 $r = 1/k$, 对式(1)进行变化可得重力模型的逆向形式:

$$P_i P_j = r G_{ij} F(d_{ij}) \quad i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (2)$$

式中: n 为城市个数。任意2个研究城市之间都可通过式(2)获得一个方程,总共可获得 $n(n-1)/2$ 个方程,在这些方程中, P_i 共出现 $n-1$ 次,将上述方程两边相乘,可得:

$$(P_1 P_2 \cdots P_{n-1} P_n)^{n-1} = \prod_{i=1, j=i+1}^n [k G_{ij} F(d_{ij})] \quad (i \neq j) \quad (3)$$

$$P_1 P_2 \cdots P_{n-1} P_n = \sqrt[n-1]{\prod_{i=1, j=i+1}^n [k G_{ij} F(d_{ij})]}$$

然后,将含有 P_1, P_2, \dots, P_n 的方程相乘,可得:

$$P_1^{n-2} (P_1 P_2 \cdots P_{n-1} P_n) = k^{(n-1)} \prod_{j=2}^n G_{2j} F(d_{2j})$$

$$P_2^{n-2} (P_1 P_2 \cdots P_{n-1} P_n) = k^{(n-1)} G_{12} F(d_{12}) \prod_{j=3}^n G_{2j} F(d_{2j})$$

$$\vdots$$

$$P_n^{n-2} (P_1 P_2 \cdots P_{n-1} P_n) = k^{(n-1)} \prod_{i=1}^n G_{in} F(d_{in}) \quad (4)$$

最后,将公式(4)中各项分别除以公式(2),然后开方,即可得到各城市的质量。

$$P_1 = \sqrt[n-2]{k^{(n-1)} \prod_{j=2}^n G_{1j} F(d_{1j}) / \sqrt[n-1]{\prod_{i=1, j=i+1}^n [k G_{ij} F(d_{ij})]}}$$

$$P_2 = \sqrt[n-2]{k^{(n-1)} G_{12} F(d_{12}) \prod_{j=3}^n G_{2j} F(d_{2j}) / \sqrt[n-1]{\prod_{i=1, j=i+1}^n [k G_{ij} F(d_{ij})]}}$$

$$\vdots$$

$$P_n = \sqrt[n-2]{k^{(n-1)} \prod_{i=1}^n G_{in} F(d_{in}) / \sqrt[n-1]{\prod_{i=1, j=i+1}^n [k G_{ij} F(d_{ij})]}} \quad (5)$$

公式(3)~(5)即逆向重力模型的标准代数算法,使用Matlab的矩阵运算及编程功能将其实现,测算出城市质量。在此基础上,使用相关系数等指标研究人口、GDP等要素对城市“质量”的影响。最后,基于公式(6)使用城市人口和GDP等因素对“质量” P 进行拟合。

$$P = f(o, t, e, \dots) = a + \sum b_i X_i + \epsilon \quad (6)$$

2.2 数据来源和处理

空间相互作用研究中经济联系与运输联系的内涵有所区别但又紧密联系,这方面金凤君已经作了有益的探索^[20]。一般认为,交通流量反应的是城市间的综合经济联系。城市间的交通流量主要有航空客货流、铁路客货流和公路客货流,由于航空客货流存在的大量核心城市中转流在统计数据上无法显示,而铁路货流受大宗货物(如煤炭)的干扰影响较大,均不适合用于求解城市质量;公路客货流因难以全面统计,数据可获得性差,准确性不高,亦不适用;相比之下,铁路客流数据准确性高、抗干扰能力强、可获得性好,适用于本研究。因此,本研究采用2007年全国28个省会城市和直辖市间的铁路客运流来刻度空间联系,选取城市之间最短运营铁路距离作为距离的衡量。距离阻抗系数的确定是一件困难的事情,学术界普遍认为“2”较为合适^[18],因此本文将距离衰减函数定义为距离的平方。逆向重力模型的计算过程需要铁路O-D客流矩阵为对称矩阵,而普通铁路O-D客流矩阵为非对称矩阵,及 G_{ij} 不等于 G_{ji} , 但二者偏差不大,常用处理方法是二者求和或均值^[8],本研究采取将二者求和的方式,使其转变为对称矩阵。影响城市“质量”因素很多,主要有人口、GDP、就业结构和城市化水平等,其中人口和GDP是公认主要因素^[7,9,19]。本研究从《中国统计年鉴2008》中选取2007年中国28个省会城市或直辖市的总人口、从业人员、GDP、三次产业从业人员及其比重和城市化水平,研究其对城市“质量”的影响。在此基础上,选取部分指标对城市“质量”进行线性拟合。

3 城市质量测算及影响因子分析

3.1 城市质量测算及分级

基于逆向重力模型(2),采用标准代数算法(3)~(5),使用Matlab的矩阵运算和编程功能,将对应的城际铁路O-D客流和距离数据,对28个省会城市和直辖市的城市质量进行测算(图1)。由于城际铁路客流中存在部分中转客流,难以在统计数据中得到显示,因此,受此数据缺陷的影响,城市质量的测算结果存在部分偏差。例如,天津与其他27个城市间的客流中,很大一部分是经过北京中转的,这导致利用城市间的客流数据测算城市质量时,天津的城市质量偏小,级别偏低。

根据计算结果,将28个研究城市划分为5个等级。北京、上海为第一等级,城市质量在2000以上,其中,北京城市质量为4771,居全国之首;广州、

成都、西安、武汉、郑州5个城市为第二等级,城市质量介于1000~2000之间;南京、昆明、乌鲁木齐、杭州、沈阳、济南、哈尔滨、南昌、石家庄、长沙10个城市为第三等级,城市质量介于300~1000之间;长春、天津、兰州、贵阳4个城市为第四等级,城市质量介于150~300之间;南宁、太原、合肥、福州、呼和浩特、西宁和银川7个城市为第五等级,城市质量低于150。总体来看,28个研究城市等级结构呈现“纺锤体”特征。

空间分布方面,城市质量总体上呈现由东向西递减的趋势,东部城市的质量相对较高,西部城市质量相对较低,28个研究城市中,东部10个,平均城市质量为1204;中部8个,平均质量为516;西部10个,平均质量为468。在7个二级以上城市中,东部3个,中部、西部分别2个;在7个五级城市中,东部只占1个,中部占了2个,西部占了4个。

3.2 城市质量影响因子分析

本研究采用相关系数测度各影响因子对城市质量影响程度的大小(表1)。在人口指标方面,总人口和从业人员与城市质量显著相关,且相关性很强,相比而言,从业人员对城市质量的影响较大,相关系数高达0.92,分行业来看,第一产业从业人员与城市质量不存在明显的相关性,二产和三产从业人员与城市质量显著相关,且相关性很强,尤其是三产从业人员,与城市质量相关系数达到0.93;产业结构对城市质量的影响较小,三次产业从业人员的比重与城市质量不存在明显的相关性,相关系数较小,且一产和二产比重与城市质量之间存在负相关,相比之下,三产比重与城市质量存在微弱的正相关;GDP和城市化水平与城市质量显著相关,其中,GDP相关性较强,城市化水平相关性一般。

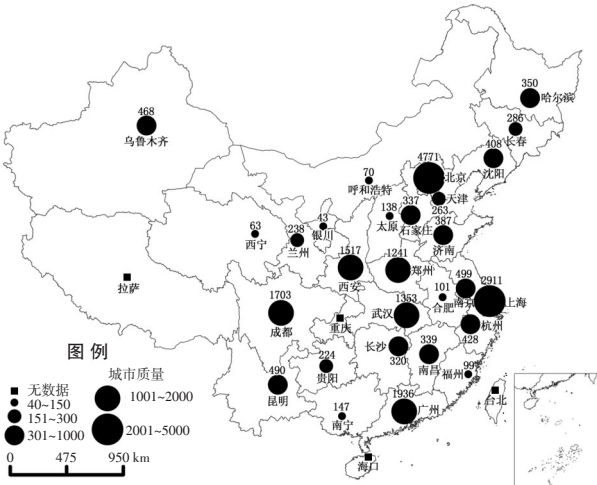


图1 28个省会城市或直辖市城市质量测算及分级结果
Fig.1 Nodal attraction estimates and classification for 28 cities using algebraic method

表1 城市质量与影响因子的相关分析结果

Tab.1 Bivariate correlation results between nodal attraction and impact factors											
	城市质量	总人口	从业人员	GDP	一产比重	二产比重	三产比重	城市化	一产人员	二产人员	三产人员
城市质量	1.00	0.68 [*]	0.92 [*]	0.81 [*]	-0.23	-0.28	0.34	0.51 [*]	0.17	0.81 [*]	0.93 [*]
总人口	0.68 [*]	1.00	0.77 [*]	0.79 [*]	-0.19	-0.03	0.07	0.21	0.32	0.83 [*]	0.69 [*]
从业人员	0.92 [*]	0.77 [*]	1.00	0.91 [*]	-0.24	-0.20	0.26	0.52 [*]	0.24	0.93 [*]	0.98 [*]
GDP	0.81 [*]	0.79 [*]	0.91 [*]	1.00	-0.32	-0.11	0.19	0.61 [*]	0.10	0.94 [*]	0.84 [*]
一产比重	-0.23	-0.19	-0.24	-0.32	1.00	-0.21	-0.01	-0.20	0.74 [*]	-0.30	-0.22
二产比重	-0.28	-0.03	-0.20	-0.11	-0.21	1.00	-0.98 [*]	0.01	-0.15	0.09	-0.34
三产比重	0.34	0.07	0.26	0.19	-0.01	-0.98 [*]	1.00	0.03	-0.01	-0.02	0.39
城市化	0.51 [*]	0.21	0.52 [*]	0.61 [*]	-0.20	0.01	0.03	1.00	-0.01	0.55 [*]	0.48
一产人员	0.17	0.32	0.24	0.10	0.74 [*]	-0.15	-0.01	-0.01	1.00	0.21	0.22
二产人员	0.81 [*]	0.83 [*]	0.93 [*]	0.94 [*]	-0.30	0.09	-0.02	0.55 [*]	0.21	1.00	0.84 [*]
三产人员	0.93 [*]	0.69 [*]	0.98 [*]	0.84 [*]	-0.22	-0.34	0.39 [*]	0.48 [*]	0.22	0.84 [*]	1.00

* 显著性水平为0.01时,统计检验的相伴概率小于等于0.01.

表2 城市质量与影响因子之间偏相关分析结果

Tab.2 Partial correlation results between nodal attraction and impact factors										
控制变量	总人口	从业人员	GDP	一产比重	二产比重	三产比重	城市化	一产人员	二产人员	三产人员
控制从业人员	-0.11		-0.13	-0.02	-0.25	0.27	0.09	-0.13	-0.28	0.29
控制总人口		0.85 ⁺	0.61 ⁺	-0.14	-0.36	0.41	0.51	-0.07	0.60 ⁺	0.86 ⁺
控制GDP	0.12	0.75 ⁺		0.05	-0.33	0.33	0.04	0.16	0.24	0.77 ⁺
控制城市化	0.68 ⁺	0.89 ⁺	0.74 ⁺	-0.15	-0.34	0.38		0.21	0.74 ⁺	0.90 ⁺
控制三产比重	0.70 ⁺	0.92 ⁺	0.81 ⁺	-0.24	0.24		0.53	0.19	0.87 ⁺	0.92 ⁺

* 显著性水平为 0.01 时, 统计检验的相伴概率小于等于 0.01.

从各影响因子之间的相关性来看,总人口、从业人员、二产人员、三产人员之间存在明显的自相关,且相关性较强;三产比重和三产人员之间存在明显的正相关,但相关性不强,城市化水平与从业人员、二产人员、三产人员之间显著相关,但相关性一般,这表明影响因子之间存在多重共线问题,在这种情况下,常规相关分析无法较为真实准确地反映自变量与城市质量之间的相关关系。基于此判断,本研究对人口、GDP等影响因子与城市质量之间进行了偏相关分析,以剔除其他相关因素的影响,结果见表2。结果显示,在剔除从业人口影响前提下,总人口和GDP与城市质量之间不存在明显的相关性,相关系数为负值,三产比重、三产人员以及城市化与城市质量存在微弱的正相关,而在剔除总人口、GDP、城市化水平、三产比重等变量的影响下,从业人员与城市质量始终显著正相关,且相关性较高,说明从业人员是“刻画”城市质量的最佳变量,而城市化水平和产业结构(主要体现为三产比重)也对城市质量产生影响。

4 城市质量线性拟合及结果分析

4.1 几种回归模型的比较

基于上文分析,综合考虑变量的代表性和独立性问题,本研究选取从业人员、GDP、三产比重和城市化水平作为自变量参与回归,分别代表人口、经济总量、产业结构和城市化水平对城市质量的影响。由于代表性和变量独立性问题,有些学者认为单一指标比复合指标更具有说服力^[18]。基于此,本研究用人口、GDP等单指标作为度量进行了试探,

表3 几种回归统计分析效果比较

Tab.3 Comparison of different linear regression models				
参与回归变量	R	R ²	调整后 R ²	标准误
本文采取的复合指标	0.930	0.864	0.841	378.530
对数处理的复合指标	0.862	0.743	0.698	0.649
总人口	0.680	0.463	0.442	782.131
从业人员	0.921	0.848	0.842	416.064
GDP总量	0.813	0.661	0.648	621.221

表4 城市质量预测值与原值的残差明细

Tab.4 Residual between nodal attraction estimates and linear regression results							
城市	实际值	预测值	残差	城市	实际值	预测值	残差
北京	4770.66	4786.34	-15.68	南昌	338.54	173.95	164.59
长春	285.89	448.77	-162.89	南京	498.91	623.90	-124.99
长沙	319.51	318.88	0.63	南宁	146.63	298.43	-151.81
成都	1703.11	864.14	838.97	上海	2911.24	2719.29	191.95
福州	99.61	211.29	-111.69	沈阳	408.01	676.36	-268.35
广州	1936.06	1644.99	291.07	石家庄	336.60	438.19	-101.59
贵阳	224.37	251.27	-26.89	太原	138.23	446.41	-308.19
哈尔滨	350.42	893.04	-542.62	天津	263.01	1313.31	-1050.30
杭州	427.72	791.21	-363.49	乌鲁木齐	467.94	368.37	99.57
合肥	101.03	138.68	-37.64	武汉	1353.11	1032.74	320.37
呼和浩特	70.21	164.92	-94.71	西安	1517.03	801.27	715.76
济南	387.20	698.07	-310.87	西宁	63.07	-49.11	112.18
昆明	490.28	469.83	20.45	银川	42.97	-67.96	110.93
兰州	238.21	218.06	20.15	郑州	1241.33	456.23	785.09

统计分析的效果并不理想,见表3。为了降低统计分析的标准误,本研究还考虑过将回归变量取对数处理,但统计分析的效果也不太理想。此外,尽管对数处理有效降低了回归分析统计标准误(仅为0.649),但实际标准误并未降低,经反推计算为521.204。

4.2 回归结果分析

采用模型(6)将城市质量和城市人口、GDP、三产比重、城市化水平进行回归分析,得到以下方程:
 $P = -1435.887 + 9.475X_1 + 16.358X_2 + 5.43X_3 - 0.059X_4$
式中: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表从业人员、生产比重、城市化水平和GDP。

回归参数方面, R^2 为 0.864, 校正后的 R^2 为 0.841, 标准误为 378.53, 回归效果基本令人满意。通过对标准误差的进一步分析可知,成都、西安、郑州和天津4个城市对标准误差的贡献较大,累积贡

献达到48.2%(表4)。其中,西安、成都和郑州城市质量的预测值远低于原值,而天津的城市质量的预测值远高于原值。通过对比以上城市的从业人口、GDP三产比重、城市化水平4个指标发现,成都、西安和郑州四指标在28个研究城市中的排名,均低于其城市质量的排名。其中,成都的三产比重比28地市平均水平低2.2个百分点,西安的GDP、城市化水平分别比28地市平均水平低730.44亿元和6.2个百分点,郑州的从业人员、GDP和城市化水平均低于全国平均水平,其中城市化水平比28地市平均水平低10个百分点。相比之下,天津市除三产比重略低于28地市平均水平外,其他3个指标都远高于28地市平均水平,也高于成都、西安、郑州3市的水平。表明除了人口、经济总量、产业结构、城市化水平的影响之外,以上4个城市的城市质量还受其他因素的影响。其中,成都和西安作为广大西部地区对外联系的重要“窗口”,而郑州作为中原地区重要的交通枢纽,对周边地区的城市质量具有明显的“吸附”作用,而天津因毗邻首都北京,在对外联系时,很多客流通过北京中转出行,部分城市质量被北京“吸附”掉了。因此,除了人口、GDP、产业结构和城市化水平之外,交通枢纽的城市功能定位是影响四城市质量的重要原因。

5 结论与展望

本研究基于逆向重力模型及标准代数算法,利用城际O-D客流矩阵和铁路最短距离矩阵,测算了28个省会城市和直辖市的城市质量。在此基础上,采用相关系数及线性回归等统计方法,研究了人口、GDP等因素对城市质量的影响,主要结论如下:

(1) 按照城市质量测算结果,将28个研究城市分为5个等级,其中,一级城市2个,二级城市5个,三级城市10个,四级城市4个,五级城市7个,城市等级结构呈现“纺锤体”特征。在空间分布方面,城市质量总体上呈现由东向西递减的趋势,东部城市的质量相对较高,西部城市质量相对较低。

(2) 城市质量的各影响因子中,人口、GDP指标与城市质量显著正相关,且相关性很强;城市化水

表5 成都、西安、郑州、天津城市质量及影响因子原值比较
Tab.5 Comparison of nodal attraction estimates and impact factors among four cities

城市	城市质量	排名	从业人员/万人	排名	GDP/亿元	排名	三产比重/%	排名	城市化水平/%	排名
成都	1703.11	4	146.38	8	3324.17	6	49.90	22	53.54	13
西安	1517.03	5	129.40	9	1763.73	17	52.72	15	46.30	19
郑州	1241.33	7	100.19	12	2486.75	11	52.52	16	42.13	22
天津	263.01	19	200.22	4	5050.40	4	50.03	21	60.51	11
28市平均水平	754.67		122.47		2494.17		52.12		52.50	

平与城市质量显著相关,但显著性水平一般;就业结构与城市质量之间不存在明显的相关性。从业人员与城市质量的相关性最强,是刻度城市质量的最佳指标。

(3) 城市质量拟合方面,复合指标比单一指标具有更好的解释力,对数处理可显著降低回归标准误差,但统计分析结果并不令人满意。

(4) 在“轴—辐”网络中,交通枢纽的城市功能定位对城市质量具有明显的影响,这种影响对“轴”城市质量是正面的,对“辐”城市质量是负面的。

受数据限制,本研究仅对2007年28个城市进行了质量测算及影响因子分析,未来进一步研究可以关注以下两点:①基于城市质量测算结果,研究不同等级城市质量影响因素的差异特征;②基于时间序列数据,研究不同时期影响城市质量的因素演变特征及机理。

参考文献

[1] Carey H C. Principles of social science. Philadelphia: Lippincott, 1858.

[2] 张文尝,金凤君,荣朝和,等. 空间运输联系: 理论研究·实证分析·预测方法. 北京: 中国铁道出版社, 1992: 56-64.

[3] 顾朝林. 中国城镇体系: 历史、现状、展望. 北京: 商务印书馆, 1992: 275-313.

[4] 杨齐. 区域客流分布模型的研究. 地理学报, 1990, 45 (3): 264-274.

[5] Chin S M, Janet H, Hwang H L. Estimating state-level truck activities in America. Journal of Transportation Statistics, 1998(1): 63-74.

[6] Deardorff A. Determinants of bilateral trade: does gravity work in a frictionless world? //Frankel J. The Regionalization of the World Economy. Chicago: University of Chicago Press, 1998: 7-28.

[7] 王欣, 吴殿廷, 王红强. 城市间经济联系的定量计算. 城市发展研究, 2006, 13(3): 55-59.

- [8] Shen G. Reverse-fitting the gravity model to inter-city airline passenger flows by an algebraic simplification. *Journal of Transport Geography*, 2004, 12(3): 219-234.
- [9] 戴特奇, 刘毅. 重力模型系数时间变化路径分析: 以中国城际铁路旅客交流为例. *地理科学进展*, 2008, 27(4): 111-116.
- [10] Evans S P, Kirby H R. A three-dimensional furness procedure for calibrating gravity models. *Transportation Research*, 1974, 8(2): 105-122.
- [11] Flowerdew R, John S. A method of fitting the gravity model based on the Poission distribution. *Journal of Regional Science*, 1982, 22(2): 191-202.
- [12] Sen A, Smith T E. *Gravity Models of Spatial Interaction Behavior*. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [13] Wilson A G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, 1967, 1(3): 253-269.
- [14] O'Kelly M E, Song W, Shen G. New estimates of gravitational attraction by linear programming. *Geographical Analysis*, 1995, 27(4): 271-285.
- [15] Shen G. Estimating nodal attractions with exogenous spatial interaction and impedance data using the gravity model. *Regional Science*, 1999, 78(2): 213-220.
- [16] Shen G. Estimating aggregated gravitational attractions by an algebraic simplification. *Regional Science*, 2002, 32(2): 41-56.
- [17] 刘晓明, 夏洪山. 基于逆向重力模型的枢纽机场旅客吞吐量估计方法. *交通运输工程学报*, 2008, 8(2): 85-89.
- [18] 刘继生, 陈彦光. 分形城市引力模型的一般形式和应用方法: 关于城市体系空间作用的引力理论探讨. *地理科学*, 2000, 20(6): 528-533.
- [19] 许学强, 周一星, 宁越敏. *城市地理学*. 北京: 高等教育出版社, 1997: 148-161.
- [20] 金凤君. 运输联系与经济联系共存发展研究. *经济地理*, 1993, 13(1): 76-80.

Nodal Attractions Estimation and Their Influencing Factors Based on Reverse Gravity Mode

JIN Fengjun¹, LIU He^{1,2}, XU Xu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on a reverse gravity model, endogenous nodal attractions of 28 cities are estimated using the algebraic method with a Chinese railway passenger database with known exogenous spatial interaction and impedance. Then nodal attributes that contribute to the nodal attractions are examined using correlation index and linear regression function. We find that the 28 cities' nodal attractions show a decreasing trend from east to west and the hierarchical structure presents a "spindle" feature. Among many factors, the employees is the best indicator of nodal attractions and whether the city is a transport hub or not has an important influence on its nodal attraction in the "axis - spoke" network. The linear fitting results of nodal attractions indicate that the composite index can achieve better fitting effect than a single indicator.

Key words: reverse gravity mode; the algebraic method; nodal attraction; railway passenger flow O-D matrix

本文引用格式:

金凤君, 刘鹤, 许旭. 基于逆向重力模型的城市质量测算及其影响因子分析. *地理科学进展*, 2011, 30(4): 485-490.