

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

戴特奇^{1,2}, 刘毅¹

(1. 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 100039)

摘 要 重力模型是空间相互作用研究中得到广泛应用的基础模型,空间相互作用随着距离的增加而减小,随着“质量”的增加而增加,对模型参数的测定和解释一直是多个学科关注的热点。但对模型参数时间变化路径方面的研究比较薄弱。本研究采用无约束重力模型分析了 1990 年代以来主要时间点的中国城际铁路旅客交流,得到了参数的时间变化路径。我们发现质量参数与距离衰减参数均为增加趋势,并进行了解释,特别就距离衰减参数单调增加路径与理论预期的差异从技术进步、经济和社会的制度框架以及区域经济阶段性特征进行了试探性解释和理论反思。

关 键 词 重力模型 距离衰减参数 质量参数 动态变化

1 引言

重力模型最初来源于物理学万有引力定律在社会经济相互作用研究中的应用,它经过巧妙的变形调整后,可以解释很多人口、交通方面的实际问题,其实用性激发了人们的学术兴趣,是城市与区域经济学、人文和经济地理学、交通规划学等众多学科都关注的研究热点^[1,2]。

人们提出各种理论来解释和支持这一模型,主要的有两种思潮:第一类是概率统计方法,另一类则采用了行为或效用分析方法^[3,4]。更多的研究侧重于对重力模型参数的测定和讨论。但重力模型的参数并非不变的常量,它们会随着时间的变化而变化。不了解重力模型参数随时间的变化规律,对其在理论分析和规划实践中的应用显然是不利的。但由于数据限制等原因,这一领域的实证研究却比较少,而国内对重力模型参数测定的定量研究本身就比较薄弱^[5],动态分析则更少。本研究将针对中国城市间铁路旅客交流,分析重力模型各个参数随时间的变化规律,并分析这种变化背后可能的原因。

2 方法与数据

2.1 重力模型及其参数

收稿日期 2008-02; 修订日期 2008-04。

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40635026),空间组织与空间效率的基础理论研究。

作者简介 戴特奇(1980-),男,博士生。主要研究城市交通和城市经济。Email: daitq@gsnrr.ac.cn

在寻求非物质类比的引力模型理论基础研究以及大量的实证研究中,空间相互作用的重力模型衍生出了基本模型、单重或双重约束模型、无约束模型等形式^[6-8],重力模型的简单形式通常写作:

$$T_{ij} = k A_i B_j P_i^{\alpha} P_j^{\beta} f(d_{ij}) \quad (1)$$

式中: T_{ij} 为从 i 地到 j 地的空间作用大小或运输流量; k 为一个比率常数; P_i 与 P_j 分别为 i 地与 j 地的“质量”; A_i 为 i 点对 j 点的吸引强度, B_j 为 j 点对 i 点的吸引强度,单重约束模型和双重约束模型的区别在于对 A_i 和 B_j 的计算方法不同; d_{ij} 表示二者之间的距离, $f(d_{ij})$ 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。本研究的目的在于探讨各个参数的变化,而不是进行相关的预测,因此本研究没有施加约束条件,采用了形式和计算较为简单的无约束重力模型:

$$T_{ij} = k \frac{P_i P_j}{d_{ij}} \quad (2)$$

变量的含义同(1)式,其中 k 、 α 、 β 是无约束重力模型的参数,称 α 和 β 为质量参数 (Scale parameter),称 $f(d_{ij})$ 为距离衰减参数 (Distance-decay parameter)。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。这一模型可以转化为对数线性形式,并记 $\ln k$ 为常数项 C ,得到模型形式如

下：

$$\ln T_{ij}=C+\ln P_i+\ln P_j+\ln d_{ij}$$

(3)

2.2 数据

影响两点间交通流量或者相互作用强度最明显的因素是人口与距离。本研究采用城市人口作为重力模型中“质量”的刻画。虽然王欣等 (2006)^[9]的研究认为重力模型中人口并不适宜作为“质量”的标度,但其研究本身也承认所采用的经济联系数据是近似的。另外,城市人口与人均 GDP 也存在多重共线性问题。实际上,一般研究均是采用人口作为质量的度量,而且是有效的^[10]。本研究用城市 GDP 总量作为度量进行了试探,统计分析的效果并不理想。因此,本文采用人口作为“质量”的标度。本研究还考虑过复合指标作为质量参数的度量,但由于代表性和变量独立性问题,单一指标实际更具有说服力,关于复合指标和单一指标更详细的讨论参见刘继生等 (2000)^[11]的研究。

另外,采用历年《中国城市统计年鉴》中市区非农业人口作为城市人口标度。这一指标并不是城市人口的最佳度量,由于市镇设置标准、行政管辖空间范围和城镇人口统计口径的频繁变化,中国的城镇人口统计一直存在较大的学术争议^[12],很难得到全面系统且满足本研究超过十年时间跨度的城镇人口指标。尽管如此,由于本研究更强调纵向比较,并不强调“质量”的绝对大小,因此最终选择了统计口径相对较为稳定的市区非农业人口指标作为重力模型中“质量”的度量。

本文的研究对象为 1991~2002 年我国约 200 个城市之间的铁路旅客交通流量,因此,自然地,选取城市之间最短运营铁路的距离作为距离的衡量。实际上,由于数据的限制,本研究仅获得了 1988 和 2000 年两个年份的铁路最短距离数据,由于铁路距离变化并不大(实际上重力模型中距离变量本身具有不变性),因此本文认为这对实证研究的可信度几乎没有影响。最终本研究采用了最接近年份的距离进行数据匹配,即对 1991 年的样本采用了 1988 年铁路距离数据,其它年份采用了 2000 年铁路距离数据。

为了增强可比性,我们选择了各个年份均有流量统计的数据作为样本全体。由于城市质量也是影

响重力模型参数的重要因素,因此本研究将样本城市分为大城市和中小城市两组。虽然 1990 年《中华人民共和国城市规划法》中明确规定大城市是指市区和近郊区非农业人口 50 万以上的城市,但在本研究中发现,如果以 50 万人口为断点进行回归分析,则会出现参数的 t 检验不够优良的情况,使得参数测定在统计上就缺乏说服力;同时,考虑到中国处于加速城市化阶段,大城市规模和数量都在迅速增加^[13],本研究以 100 万人口作为城市分类的标准,定义如下:1991 年以来市区非农业人口 100 万的为大城市,一直<100 万的为中小城市,样本中所有的大城市构成大城市群,所有中心城市构成中小城市群。本研究采用重力模型分别考查了样本全体(可以看作重力模型参数的平均水平)、大城市群系统内部和中小城市群系统内部的空间相互作用规律,其对应的样本总量分别为:19047 个、866 个、8874 个,其它一些基本性质如表 1 所示。

表 1 样本的一些基本属性

Tab.1 Some characteristics of the samples

年份	1991	1995	2000	2002
全国铁路客运量 (万人)	95080	102745	105073	105606
样本全体客运量 (万人)	31636	35770	37983	55033
大城市群客运量占样本的比重 (%)	26.33	27.18	29.57	24.28
中小城市群客运量占样本的比重 (%)	9.39	9.46	8.18	11.60

来源:国家统计局,历年《中国统计年鉴》,http://www.stats.gov.cn/

3 模型参数的变化规律

3.1 回归的统计特征

采用模型(3)将对应的城际铁路客运量和城市人口数据,分别对所有城市、大城市群和中小城市群这三个样本进行回归分析,回归拟合的评价与检验见回归参数表。

从表 2 中可见,拟合优度 (R²)、系数 (t) 和回归 (F) 的显著性都很高, DW 值均小于 2 而大于 1.2,与 2 的差值并不大,小于 2 说明残差可能存在正自相关,但差值不大说明残差自相关的程度比较轻微。与同类研究相比,回归效果相当令人满意^[14]。显然,回归得到的重力模型参数的时间变化不能归于统计误差,后面分别说明各个参数的变化规律。

表 2 回归拟合的评价与检验

Tab. 2 Parameter estimates of the regression models

分表 2.1 所有城市

Tab. 2.1 The whole sample

年份	1991	1995	2000	2002
C	87.564 (0.000)	67.422 (0.000)	63.946 (0.000)	70.858 (0.000)
d_{ij}	-116.942 (0.000)	-106.432 (0.000)	-102.577 (0.000)	-114.316 (0.000)
P_i	70.912 (0.000)	59.609 (0.000)	59.102 (0.000)	63.210 (0.000)
P_j	76.666 (0.000)	73.238 (0.000)	65.591 (0.000)	68.723 (0.000)
R^2	0.534	0.427	0.467	0.511
DW	1.217	1.322	1.279	1.246
F	7281.843 (0.000)	6021.074 (0.000)	5566.200 (0.000)	6623.782 (0.000)

分表 2.2 大城市群

Tab. 2.2 The sample of large-size cities

年份	1991	1995	2000	2002
C	7.516 (0.000)	5.892 (0.000)	4.008 (0.000)	3.640 (0.000)
d_{ij}	-24.645 (0.000)	-23.827 (0.000)	-21.817 (0.000)	-22.687 (0.000)
P_i	14.670 (0.000)	14.064 (0.000)	14.124 (0.000)	15.270 (0.000)
P_j	15.415 (0.000)	14.927 (0.000)	14.762 (0.000)	15.920 (0.000)
R^2	0.580	0.560	0.528	0.559
DW	1.238	1.348	1.483	1.420
F	397.072 (0.000)	366.331 (0.000)	321.667 (0.000)	364.204 (0.000)

分表 2.3 中小城市群

Tab. 2.3 The sample of cities in medium and small size

年份	1991	1995	2000	2002
C	67.495 (0.000)	54.721 (0.000)	57.833 (0.000)	55.901 (0.000)
d_{ij}	-77.588 (0.000)	-72.105 (0.000)	-73.670 (0.000)	-80.699 (0.000)
P_i	11.670 (0.000)	8.429 (0.000)	7.197 (0.000)	9.404 (0.000)
P_j	12.854 (0.000)	10.254 (0.000)	7.294 (0.000)	9.913 (0.000)
R^2	0.640	0.610	0.619	0.654
DW	1.356	1.471	1.451	1.374
F	2050.030 (0.000)	1756.171 (0.000)	1836.576 (0.000)	2213.705 (0.000)

注:括号内为显著性水平。

3.2 距离衰减参数

明显地,不论是所有城市、大城市群或中小城市群,其距离衰减参数变化规律是类似的:即随着时间呈增加趋势,但其时间路径又存在一定差别。总体而言,在 2000 年以前三者的发展趋势是类似的,但大城市群在 2000 年之后距离衰减参数表现出了不同的发展趋势,距离衰减参数的增加很微

弱,似乎进入了曲线发展的拐点阶段。另外,大城市群的距离衰减参数明显地要低得多,具体而言要低约 0.3~0.5,这有力地支持了质量越大距离衰减作用越小的理论预期(表 3)。

3.3 质量参数 和

将同一样本的 和 进行比较,可以发现一个

表 3 距离衰减参数
Tab.3 Distance-decay parameters

年份	Beta		
	所有城市	大城市群	中小城市群
1991	2.125	1.792	2.065
1995	2.301	1.905	2.273
2000	2.411	2.044	2.444
2002	2.577	2.046	2.655

有趣的特征是 : 无论哪一个样本组 , 虽然 β 和 γ 的绝对值总是非常近似 , 最大差值也不超过 0.1 , 但总是 β 值略小于 γ 值。另外 , 大城市群 β 和 γ 的差值要高于中小城市群 β 和 γ 的差值 , 最大情况下前者甚至是后者的约 9 倍。由于 β 是出发城市的质量参

数 , 而 γ 是到达城市的质量参数 , 这或许可以解释为引力总是比推力重要一点 , 而且城市规模越大 , 这种现象越明显。

虽然同一样本质量参数 β 和 γ 的绝对值和时间变化规律基本一致 , 但样本间的绝对值和时间变化路径都有较大的差别。不同规模的城市群比较 , 与距离衰减参数的情况有所不同 , 不同样本的距离衰减参数变化规律是大体趋同的 , 而质量参数则不然。大城市群的质量参数 , 不论 β 还是 γ , 其数值和变化规律与中小城市群都明显不同 : 数值上大城市群比中小城市群的质量参数要高 1.0 到 1.6 ; 从变化规律看 , 大城市群呈现持续增加的趋势 , 而中小城市群的增加趋势很弱 , 甚至还有回落的现象(表 4)。

表 4 质量参数
Tab.4 Scale parameters

年份	α			γ		
	所有城市	大城市群	中小城市群	所有城市	大城市群	中小城市群
1991	1.036	1.447	0.419	1.119	1.519	0.463
1995	1.108	1.600	0.402	1.361	1.697	0.490
2000	1.159	1.769	0.326	1.291	1.848	0.335
2002	1.221	1.823	0.481	1.328	1.899	0.509

3.4 参数的典型特征小结

根据前面的分析 , 我们可以总结出以下几点参数特征 :

(1) 总体特征 : 距离衰减参数和质量参数都呈现随时间增强的趋势 , 但质量参数有一定的波动 , 出发质量参数 β 总是略低于到达质量参数 γ 。大城市的距离衰减参数明显低于中小城市 (0.3~0.5) , 而质量参数则明显高于中小城市 (1.0~1.6)。

(2) 时间变化路径 : 大城市距离衰减参数随时间的增强趋势显著弱于全体样本和中小城市 , 且其变化有转折的迹象。而质量参数的变化规律相反 , 大城市表现了强烈的增大趋势 , 而中小城市的总体趋势也略有增加 , 但时间变化路径是非单调的 , 1995 年到 2002 年出现了 “V” 型变化。

4 对比与解释

4.1 对比分析

国外的研究侧重对距离衰减参数的分析 , 多数

实证研究表明 , 重力模型参数随着时间和交通模式的变化而有不同^[15,16]。一般认为 , 由于经济发展、区域专业化程度加深、出行需求增长和交通技术进步等因素 , 空间相互作用趋于增强 , 而距离的阻滞作用则趋于减弱 , 因此重力模型中的距离衰减参数应呈单调递减趋势。同样 , 由于出行成本的降低 , 质量参数应该呈单调增加趋势。我们在图 1 中还展示了一个典型的研究案例 , 多数研究结果是符合这上面的理论预期的。当然 , 国际研究成果中也有距离衰减参数非单调变化的例子 , 比如距离衰减参数对时间的函数呈反 “V” 形 , 但其研究的空间尺度为都市区 , 而不是多数研究的城际尺度^[17] (图 1)。

将 3.4 节得出的参数特征与国外研究进行对比 , 可以得出一些重要的结论 :

(1) 其中 , 质量参数的时间变化路径比较符合理论预期 : 随着时间变化 , 经济发展使得城市间的经济联系增强 , 而且大城市之间经济联系的增强更为明显。这些都反应在了质量参数变化中 : 质量参数总体呈增加趋势 , 其中大城市的质量参数的增加

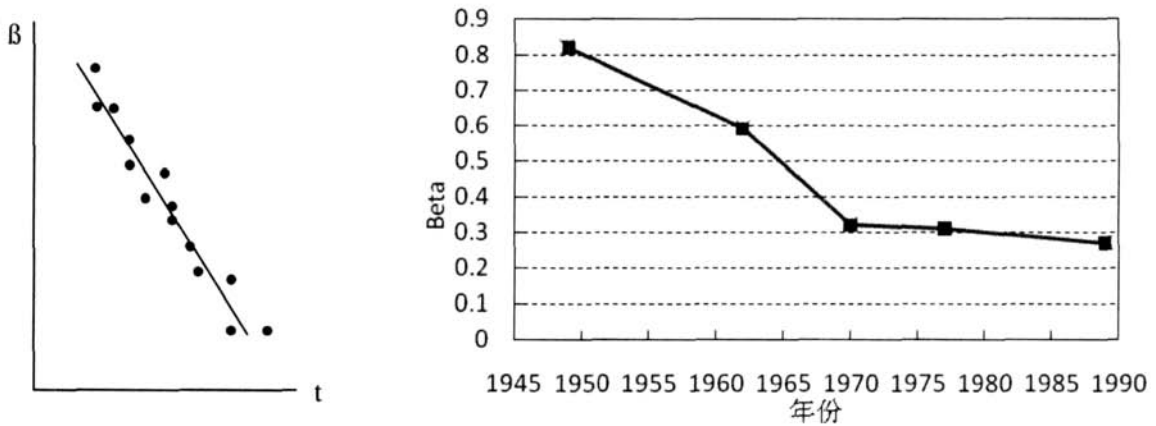


图 1 距离衰减参数的时间变化

Fig.1 Temporal variations of distance-decay parameters

注:左图为一般规律示意图,右图为 1984~1989 年芝加哥距离衰减参数的研究案例,更详细的分析见 Edward J. Taaffe, Howard L. Gauthier and Morton E. O'Kelly, *Geography of Transportation*, 1996, 223~224.

趋势明显,呈现持续单调增加,这表明随着时间的变化,同一城市规模对空间相互作用强度的影响越来越大,而且在一定阈值以上的城市规模(如 100 万以上),其对空间相互作用的增强更加明显。

②)但本研究得出的重力模型距离参数单调增加的现象与国外的研究结果有着明显的不同。一般认为,技术进步将减弱距离衰减作用。改革开放以来,中国铁路系统网络逐步完善,服务逐步优化,这种技术进步在客观上起到了克服距离摩擦力的作用^[10]。但本研究通过中国城市铁路客流空间的分析发现,距离衰减参数却持续增大了,说明尽管技术优化了交通系统的物质方面,但经济活动特征并非与之完全同步,甚至对空间相互作用的影响是相反的,增强了距离衰减效应。

4.2 对距离衰减参数进一步的解释

根据上面重力模型分析所展示的结果,尤其是距离衰减参数时间变化路径与理论预期的差异,需要对重力模型参数进行理论反思。这种反思也存在其理论框架基础,因为在不同的空间尺度和不同的经济发展阶段下,重力模型距离衰减参数随时间变化的机理并不相同。

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(1993)已经做了有益的探索。一般认为,旅客流动反应的是城市间的综合经济联系^[19]。从铁路或者航空的交通流空间看,国内世界城市(Global city)的空间控制

力确实增强了,其对应距离衰减作用明显减弱^[20,21],但这仅限于北京、上海、广州等少数几个世界城市,经济空间组织形式的整体趋势还是以城市群为主,优先与距离较近的地方发生经济联系^[22,23],距离衰减参数的增强来于这种近距离经济联系优先的区域发展模式。换言之,距离衰减参数增强这一研究结果更符合后面这种解释:虽然从全球尺度看,世界城市正在称为城市体系和经济空间组织的主导力量,国内少数几个大城市开始逐步成为世界城市并融入到全球城市体系,获得了更远范围内的影响力,这些城市对重力模型距离衰减参数起到了削弱作用;但在低一级的空间尺度上看,多数城市的空间相互作用还是以近距离为主,人员流动区域性更强,它们对重力模型距离衰减参数的作用是增强的。这一区域发展模式的背景是 1990 年代以来以区域经济为导向、地方分权为主的区域经济发展战略,区域经济活动中地方政府的主体地位实际增强,经济活动出现向地方收敛的本地化趋势,甚至强于全国一体化,以致于出现了经济市场的空间分隔^[24]。

对重力模型参数时间变化路径的另一个可能的解释是经济发展阶段不同。中国的人均旅次水平和人均人公里水平远低于发达国家水平,甚至与许多发展中国家相比也相差甚远^[25]。由于出行水平远未饱和,在收入的驱动下,首先增长的是城市群内部近距离出行^[26],这导致了距离衰减参数的增强。当然,还有一个可能的原因是由于航空运输和公里运

输的迅速发展,对铁路客流造成了挤出效应。但由于航空客运量与铁路客运量相比,仍然占很小的比重,而公路运输主要集中在短途,因此这一原因并不重要。

5 结论

本研究的结果表明,重力模型的质量和距离衰减参数在观测期内的变化并不能由技术进步这类理所当然的推断而得到。技术进步对距离衰减参数的单因子影响可能起弱化作用,但实证得到的距离衰减参数却并非单调递减,而是单调递增。本文认为这说明对空间相互作用影响更大的是在一定制度框架下的社会和经济活动,距离衰减参数单调递增背后的原因在于特定的经济发展阶段和区域政策。因此,在应用重力模型进行空间规划和政策研究的时候,需要避免仅就技术进步这样的单一因子进行分析,应该注意到经济空间格局演变的复杂性和重力模型参数的时间动态性。

参考文献

- [1] 张文尝、金凤君、荣朝和、唐秀芳. 空间运输联系——理论·实证·预测方法. 北京: 中国铁道出版社, 1992, 56~64.
- [2] 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.
- [3] Fik T J, Mulligan G F. Functional form and spatial interaction models, *Environment and Planning A*, 1998, 30: 1497~1507.
- [4] John R. Roy and Jean-Claude Thill, Spatial interaction modelling, *Regional Science*, 2004, 83(1): 339~362.
- [5] 张莉. 改革开放以来中国城市体系的演变. *城市规划*, 2001, 25(4): 7~10.
- [6] 杨齐. 区域客流分布模型的研究. *地理学报*, 1990, 45(3): 264~274.
- [7] 刘世峰, 赵洪武. 重力模型的机理分析. *数量经济技术经济研究*, 2000, 17(1): 56~58.
- [8] 彼得·尼茨坎普主编, 区域和城市经济学手册(第1卷, 区域经济学). 北京: 经济科学出版社, 2001: 329~370.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 周一星, 于海波. 以“五普”数据为基础对我国城镇化水平修补的建议. *统计研究*, 2002, 4(4): 44~47.
- [13] 仇保兴. 我国城镇化的特征、动力与规划调控. *城市发展研究*, 2003, 10(1): 4~16.
- [14] Jin Fengjun, Wang Fahui and Liu Yu. Geographic Patterns of Air Passenger Transport in China 1980~1998: Imprints of Economic Growth, Regional Inequality, and Network Development, *The Professional Geographer*, 2004, 56(4), 471~487.
- [15] Martti Luoma, Kauko Mikkonen and Mauri Palomäki, The threshold gravity model and transport geography: How transport development influences the distance-decay parameter of the gravity model, *Journal of Transport Geography*, 1993, 1(4): 240~247.
- [16] Edward J. Taaffe, Howard L. Gauthier and Morton E. O'Kelly, *Geography of Transportation* 2th, US: Prentice Hall Inc., 1996, 195~230.
- [17] Kauko Mikkonen and Martti Luoma, The parameters of the gravity model are changing - how and why. *Journal of Transport Geography*, 1999, 7(4): 277~283.
- [18] 金凤君, 王姣娥, 孙炜, 牛树海. 铁路客运提速的空间经济效果评价. *铁道学报*, 2003, 25(6): 1~7.
- [19] 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.
- [20] 戴特奇, 金凤君, 王姣娥. 空间相互作用与城市关联网络演进——以我国20世纪90年代城际铁路客流为例. *地理科学进展*, 2005, 24(2): 80~89.
- [21] 周一星, 胡智勇. 从航空运输看中国城市体系的空间网络结构. *地理研究*, 2002, 21(3): 276~286.
- [22] 薛凤旋、蔡建明. 中国三大都会经济区的演变及其发展战略. *地理研究*, 2003, 22(5): 531~540.
- [23] 朱英明. 城市群经济空间分析. 北京: 科学出版社, 2004, 77~79.
- [24] 陆大道. 中国区域发展的理论与实践, 北京: 科学出版社, 2003, 334~371.
- [25] 陈航, 张文尝, 金凤君等. 中国交通地理. 北京: 科学出版社, 2000, 193~194.
- [26] 黄海波, 何琳. 城市间旅客运输需求的研究. *铁道学报*, 1999, 21(5): 5~9.

Temporal Variations in Parameters of Gravity Model: an Analysis on China 's Inter- city Railway Passenger Flows

DAI Teqi^{1,2}, LIU Yi¹

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Gravity models are the basic tools which are widely applied in the research of spatial interaction (SI). It is well known that SI decreases as the distance increases or the mass decreases. The measurement and explanation on parameters are hot topics but the temporal variations of them are not discussed so frequently. This paper deals with how and why the parameters change with time by using the unrestrained gravity model and the data set consists of China 's railway passenger flows between about 200 cities. We find that scale parameters show an increasing trend with a little fluctuation and distance- decay parameters grow over time instead of monotonic decrease over time. And an empirical and theoretical explanation will be given to why the general assumptions of monotonic increasing scale parameters and monotonic decreasing distance- decay parameters are not obeyed.

Key words: gravity model; distance- decay parameters; scale parameters; temporal variations