

人口迁移空间互动的度量与诠释： 以“六普”“七普”省际迁移流为例

Measuring and Interpreting Spatial Interactions in Population Migration: An Example of Interprovincial Migration Flows Based on the 6th and 7th Population Censuses

陆希刚 宋祖萱 庞磊

LU Xigang, SONG Zuxuan, PANG Lei

关键词 空间互动；迁移流解构；空间结构效应；省际迁移；“六普”；“七普”

Keywords: spatial interaction; migration flow decomposition; spatial structure effect; interprovincial migration; the 6th population census; the 7th population census

提 要 迁移流是起止点场所属性与空间互动共同作用的结果，但传统重力空间互动模型难以鉴别出辐射能力、吸引能力与空间互动的效应，其中以距离表征的空间互动是模型中最难拟合的部分，妨碍了对迁移机制与空间模式的理论诠释。借鉴迁移流解构和结构重力模型方法，将“流—变量”的一步模型改为“流—效应—变量”两步模型，以我国“六普”“七普”省际迁移流为案例，分解迁移流中吸引能力、辐射能力和空间互动效应，探讨各效应对迁移流影响的时间变化趋势，在效应度量的基础上，通过多元回归诠释空间互动的影响因素，尤其是双边解释变量与空间结构效应的关系。

Abstract: Migration flows are affected by both spatial attributes and interactions between locations (origin and destination). However, most studies build their insights on one-step gravity spatial interaction models, which fail to distinguish spatial interaction effects from attributes as spatial influence and location attractiveness. In particular, the effect of spatial interaction, often approximated solely by distance and viewed as the most intractable component model, leads to model biases, hindering the theoretic interpretation of migration mechanisms and spatial patterns. Drawing on the method of migration flow decomposition and structural gravity model theory, we aim to replace the one-step "flow-variable" approach with a two-step "flow-effect-variable" framework for modelling migration flows. Based on the interprovincial migration data from China's 6th and 7th population censuses, we decompose migration flows to measure the effect of spatial influence, place attractiveness, and spatial interactions, identifying temporal trends in their effects. Building on measured effects of spatial interaction, we use multiple regression analyses to identify key influencing factors of spatial interaction, and examine how mutually dependent variables shape spatial structures.

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202502005

文章编号 1000-3363(2025)02-0035-08

作者简介

陆希刚，同济大学建筑与城市规划学院副教授、博士生导师，paulu@vip.163.com

宋祖萱，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

庞磊，同济大学建筑与城市规划学院副教授、博士生导师，通信作者，jamespl@163.com

空间互动是空间学科的核心议题之一，空间互动重力模型普遍用于不同尺度地理空间中各种流（迁移、出行、贸易、资本、知识等）的分析，流本身有时也被反过来用于表征空间互动^[1-3]，导致流与空间互动的关系较为含糊。迁移流（乃至一般意义上的流）常被视为特定整体流动性水平下辐散能力（起点属性）、吸引能力（止点属性）以及起止点空间互动共同作用的结果^[4]。重力模型采取“变量一流”一步模型的“黑箱”方式，将迁移流视为解释变量的直接函数，在本质上仍为经验模拟。尽管为追求模型拟合效果而纳入日趋庞杂的解释指标变量，仍无助于解决以下问题：①迁移流中的效应度量。解释变量仅是效应的不完全近似而非效应本身。②经验模型的理论诠释。由于经验模型将两个过程（解释变量—效应，效应—流）合并为一个过程（解释变量—流），而两个过程可能具有不同的作用机制或函数形式，导致解释变量难以直接从理论上解释迁移流，也难以鉴别变量遗漏或错误特化偏差源自何种效应。因此，理论诠释应建构“变量—效应—流”的两步模型。③尽管为克服变量遗漏、偏差导致的空间自相关问题，出现了考虑空间结构效应的空间计量模型，但仍然难以诠释空间结构效应与前述效应的对应关系。

为此，本文借鉴迁移流解构方法度量迁移流中隐含的辐散能力、吸引能力和空间互动等三种效应，并进一步讨论影响三种效应的表征指标及其诠释。限于篇幅，本文主要关注经验模型中作为最大误差来源的空间互动^[5-6]，结合我国“六普”“七普”省际迁移流数据，对空间互动进行度量与诠释。

1 研究回顾

1.1 迁移理论与空间互动模型

人口迁移等空间流表现为要素在空间中的流动。对流动原因和流动模式的探讨形成了两种各具特色又相互借鉴的研究范式：理论解释和模型建构。

迁移理论解释探讨迁移得以产生与持续的影响因素^[7]，但多在非空间或抽象空间背景下进行探讨。早期迁移理论强调区位属性非均衡性的影响，尤其是经

济机会的空间差异对劳动力迁移的诱发作用，诸如实际或预期工资、就业机会^[8-11]、家庭收入风险^[12-13]或迁入地二元劳动市场中的低端劳动力需求^[14]等。然而，经验研究频繁地出现不符合理论预期的经济变量符号^[15]，导致了基于空间均衡的空间效用解释^[16-18]。非均衡理论认为空间效用范畴远大于经济范畴，还包括公共服务、社会氛围、环境舒适、地方特色等多种因素，这些不可交易的地方固定因素可以弥补经济差异。根据均衡理论，尽管各地空间效用整体上可能是均衡的，但不同个体对于相同空间要素组合的效用判断却存在差异，由此可以解释非均衡理论难以解释的双向迁移。综上，迁移理论涉及的迁移动因解释极为宽泛且远未达成共识。究其根源，理论诠释并未从吸引能力、辐散能力等更根本的层次上解释迁移，所选解释变量仅是辐散、吸引能力的不完全近似。因此，有必要对迁移流中的辐散能力和吸引能力分别进行度量，以期更系统地理解迁移流的结构特征，从而有针对性地建构“迁移流—效应—解释变量”之间的关系诠释。此外，一些理论关注点从迁移发生的个体行为初始诱因转向迁移流自我维持与强化的结构性因素，诸如世界体系（全球化）理论^[19-20]、制度理论^[7]和社会网络理论^[21]等，见表1。

不同于迁移理论研究，迁移模型更加关注迁移的空间特征。迁移理论使隐含在起止点属性中的辐散、吸引效应得到较为充分的表达，但也凸显了空间互动的严重表征不足，使其逐渐成为模型的主要误差来源与关键挑战。首先，空间互动的解释变量不完备。空间互动模型从最初仅含起止点人口和距离的经典重力模型^[22]到纳入大量起止点社会经济

变量的拓展模型^[23]，尽管这种拓展通过逼近起止点效应提高了模型拟合度，但空间互动一直以距离函数作为主要甚至唯一解释变量的状况几乎未得到改善，成为模型的主要误差来源^[5]。究其原因，距离只是空间互动效应的一个不完全近似。空间互动或迁移成本不仅是物理距离或经济成本意义上的，还涉及心理、文化、制度等多方面，仅以距离表征必然造成变量遗漏和估计偏差，并可能导致反直觉或不合预期的结果，诸如距离谜题^[24-25]、边界谜题^[26]以及距离衰减系数的空间不一致性和非单调性^[27]等。其次，变量遗漏偏差或模型特化错误可能是空间结构效应的根源。传统空间互动重力模型假设迁移流相互独立，但相关研究^[27]发现，至少在具有共同起点或止点的迁移流之间存在相关性。对于如何解释这些空间自相关或空间相互依赖仍未达成共识，但多数研究^[28-29]认为，外生解释变量不可避免遗漏变量或错误特化很可能与空间有关，导致模型残差含有未能鉴别的空间相关解释变量，即空间结构效应。由此形成了纳入空间结构效应的空间计量模型，诸如止点竞争模型、空间过滤模型、空间残差模型、空间杜宾模型等^[30-31]。然而，这对空间互动研究框架构成了严重挑战：空间结构效应无法内化到空间互动模型的内生效应中。源自迁移流解构的内生效应能够完全解释实际迁移流的事实（参见表3列9）表明，模型在理论上没有容纳新增空间结构效应的余地，而应将其纳入原有效应中。鉴于空间结构效应源于空间相关变量的遗漏或错误特化，而表征最不充分的空间互动效应是模型最大的误差源，由此可以猜测，空间结构效应可能源于空间互动的表征不足。

表1 迁移理论与相关动因^[7]

Tab.1 Migration theory and related motivations

理论	动因解释	关键变量(预期效应, 括号内的+、-分别表示正、负效应)
新古典理论	个体收益最大化	起止点工资差异(+), 起止点就业机会差异(+)
迁移新经济	家庭收入风险最小化	起点家庭风险(市场失灵)(+), 起点相对剥夺(贫富差距)(+)
二元劳动市场	发达地区的低端劳动力需求	止点贫富差距(+)
世界体系	全球化诱致流动人口	起点外来投资(+), 止点国际化程度(+), 历史联系(+)
制度理论	迁移政策与促进机构	起止点迁移促进机构(+), 迁移促进政策(+)
社会网络	移民网络降低迁移成本	移民存量(+)

综上，在引入外生解释变量对迁移流模型化之前，需要对迁移流中的效应进行分解度量，将迁移空间互动模型由“迁移流—解释变量”的一步模型改为“迁移流—效应—解释变量”的两步模型，从而深入理解效应对迁移流的影响以及解释变量对效应的影响，为不同背景下的迁移比较和诠释提供借鉴。

1.2 迁移流解构

迁移流解构 (decomposition) 思路可追溯至 Shryock^[32] 的美国国内迁移研究，将迁移的区域偏好表达为迁移流观察值与预期值的比率，并假设预期值与起、止点的区域人口呈正比。Mueser^[33] 运用空间互动模型明确提出将迁移流分解为生成效应、吸引效应和互动效应，并认为互动效应具有较强的时间稳定性。Rogers 等^[4, 34-35] 运用乘法成分 (multiplicative component) 模型及其变体对数线性 (log-linear) 模型^[36] 系统阐述了迁移流解构方法。

Mueser 的效应度量仍采取外生解释变量近似方法，以起止点哑变量和距离等解释变量分别表征起止点效应和互动效应。然而，地理距离对空间互动表征不足，且会影响起止点哑变量的估计。尽管后来将距离拓展为纳入文化、心理等因素的广义距离，但问题的关键在于，效应始终无法摆脱外生变量近似的表征偏差及其交互影响。换言之，由于无法内生度量各种效应，基于外生解释变量度量的方法在本质上属于经验试错法，无法判断整体误差源于哪种效应的表征。

乘法成分模型及对数线性模型是基于迁移流矩阵分析的统计模型，能够通过迁移流结构分析将其分解为各种效应成分。作为统计模型，其在方法论上是纯粹的内生度量，即效应仅取决于实际迁移流。此外，其与其他空间互动模型诸如重力模型、熵最大化、信息最小化、随机效用模型的等价性也得到了理论证明^[36]。

Rogers 等^[4] 的系列研究使迁移流解构方法日益直观且易于诠释。早期研究将各种效应表达为迁移流几何均值及其比率。鉴于总体效应之外的所有效应均为相对于总体效应的比率，而总体效应对研究区域而言是恒定的，因此以迁移量

而非几何均值表征的效应并不影响分析结果，也使得迁移流解构过程更为直观 (详见 2.2 研究方法)。此外，在贸易研究领域，Anderson 等^[37] 基于经济理论推导出与迁移流分解方法基本一致的结构重力模型，为空间互动解构提供了理论依据。

总之，迁移流内含的各种效应能够作为衔接迁移流和各种解释变量的桥梁，为深入理解迁移机制提供明晰的分析框架。以下以中国“六普”“七普”省际迁移流数据为例进行探讨，重点解决以下问题：①从迁移流中解构各种效应并分析其空间模式，比较迁移流与空间互动的空间模式差异；②各效应对迁移流的影响及其时间变化趋势，检验空间互动是否具有时间稳定性；③分析空间互动的影响因素，重点探讨空间互动与空间结构效应的关系。

2 数据与方法

2.1 研究数据

本文研究数据来自“六普”“七普”中中国 31 个省级行政区 (不含港澳台) 之间的 930 条省际迁移流数据。其中省际移民定义为：普查时点常住地与五年前常住地处于不同省份的居民，现住地 (止点) 和五年前常住地 (起点) 省份比对的集成移民数量即本文研究的省际迁移流。这种五年迁移口径以两个时点的常住地比对进行定义，尽管会遗漏一些人口和迁移事件，但较之移民累积存量口径 (现住地—户籍登记比对、现住地—出生地比对) 更能体现迁移的时效性，为国际普遍采用的统计口径。

2.2 研究方法

2.2.1 迁移流解构

空间互动即迁移流中与起止点属性无关的效应，可以理解为起止点联系的难易程度或成本，其在文献中具有多种含义模糊的指称，诸如距离效应、距离衰减、隔离效应、阻抗效应、通达性、流动成本，并与空间关系或空间结构密切相关。将空间互动与基于起止点属性的辐散、吸引效应区分，旨在更深入理解影响迁移流的动因，并为这些动因寻求合适的解释变量。迁移流三种效应 (空间互动、辐散能力、吸引能力) 和解释变量的关系 (图 1) 表明，与现象层面的一步式空间互动模型不同，两步式模型在动因层面进行模型建构与诠释。

运用乘法成分模型或对数线性模型，可分别将迁移流表达为 4 种成分乘积或对数加和：

$$M_{ij} = T O_i D_j F_{ij} \quad \text{或}$$

$$\ln M_{ij} = \ln T + \ln O_i + \ln D_j + \ln F_{ij}$$

迁移流解构方法可进一步将上式表达为：

$$m_{ij} = (T) (O_i) (D_j) (F_{ij}) = (m_{..}) (m_{i.}/m_{..}) (m_{.j}/m_{..}) (F_{ij})$$

其中“.”代表对所替代下标的求和，如 $m_{i.} = \sum_j m_{ij}$ 。公式所含 4 项乘法成分 (效应) 分别为：①总效应。 $T = m_{..}$ ，即多区域对象系统的迁移总量，即区域的总迁出量 (或总迁入量)，表征了整体流动性水平。由于 $m_{..}$ 是在系统内具有唯一恒定值和唯一用绝对量表示的指标，总效应可以暂不考虑。②起点效应 $O_i = m_{i.}/m_{..}$ 与③止点效应 $D_j = m_{.j}/m_{..}$ 分别为起点区域 i ：总迁出在系统总迁移中的份额以及止点 j ：总迁入在系统总迁移中的份额。因其体现了起点产生和止点吸引移民的能

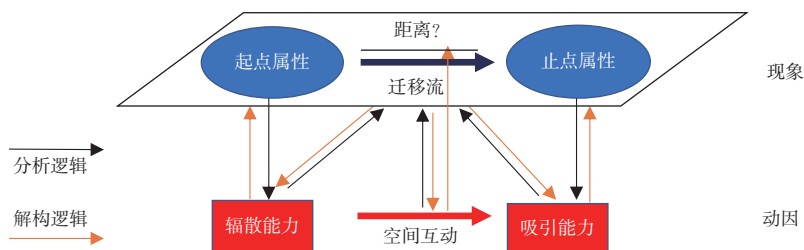


图1 迁移流结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of migration flow structure

力，因此也称为辐散能力和吸引能力。因其在迁移理论中被视为影响迁移的主要动因而被合称为主效应，又因与起止点密切相关，也被称为固定效应。由于构成辐散能力和吸引能力的起止点属性目前尚未完全达成共识，有必要首先进行辐散能力和吸引能力的度量，方可展开对其影响因素的深入探讨。④互动效应 F_{ij} 指起止点联系的难易程度或成本。在理论上，互动效应视为迁移流中无法被总效应、起点效应和止点效应所解释的部分，即：

$$F_{ij} = \frac{m_{ij}}{m_i m_j} = \frac{m_{ij}}{m_i m_j} = \frac{m_{ij}}{m_i m_j}$$

其中 m_{ij}' 可以解释为：不存在起止点空间互动（resistanceless）假设条件下的迁移流预期值，它仅取决于总迁移水平、起点辐散能力和止点吸引能力。可见， F_{ij} 度量了有空间互动的迁移流观察值（ m_{ij} ）相对于无空间互动假设下的预期值（ m_{ij}' ）的偏离程度，因此能够真正完全度量空间互动。

2.2.2 空间互动诠释

一旦获得各效应的相对度量，很自然就会考虑度量得到的效应与传统模型常用解释变量的关系，从而对各种效应进行诠释。限于篇幅，本文仅对其中最棘手的空间互动进行模型化。尽管地理第一定律强调距离的作用^[38]，距离也以其不同度量和函数形式长期表征空间互动，但前述经验研究中出现的反直觉现象表明距离仅是空间互动的不完整近似。综合相关文献，本文选取5个双边解释变量对空间互动度量进行诠释并考虑其与空间结构效应的整合。见表2。

距离（DS）：距离既是空间互动问题的主要根源，也是无法回避的主要解释变量。距离具有多种度量和函数表达，鉴于省际迁移以铁路作为最常用的出行方式，本文以省会城市间铁路通行时间度量^①。

边界（BL）：邻接性是空间互动以及空间自相关最为关注的影响因素之一。多数研究通常采用是否邻接的哑变量度量，但考虑到我国省际迁移中相当部分实质为跨越省界的短途迁移，共享边界长度信息度更大，也可以解释这种跨界短途省际迁移，因此在GIS中采用共享

表2 空间互动度量的回归变量

Tab.2 Regression variables for measuring spatial interactions

解释变量	指标	度量	单位	最大值	最小值	均值	中位数	变异系数	预期
距离	D_s	省会铁路出行时长	min	4034.000	30.000	1033.624	631.000	0.879	负效应
边界长度	B_L	共享边界长度	km	2285.000	0.000	94.785	0.000	3.098	正效应
语言距离	L_0	哑变量加权计算	—	0.599	0.003	0.496	0.537	0.237	负效应
移民网络	M_N	“六普”移民存量占比	%	80.857	0.004	2.052	0.482	2.946	正效应
多边阻抗	M_R	双边变量 v 在起点迁出流和止点迁入流中的（人口份额）加权和（ MR_i^v 与 MR_j^v ）							与双边反
相对度量	R	各双边解释变量相对于起点多边阻抗、止点多边阻抗的乘积（ $V/(MR_i^v MR_j^v)$ ）							与双边同

边界长度进行邻接性度量。

语言距离（LD）：语言、饮食习惯等文化相似性对迁移的影响逐渐引起重视^[39]。本文以语言作为判别依据，采取哑变量加权度量方法，即起止点语言相同赋值为1，否则为0。但哑变量方法无法解决语言类型的层级差异，如汉语各方言既非完全相同也非完全不同；同时也难以处理我国多语言分布的省份。为简化计算，本文依据语言构成（分区面积）份额^②，依据语言、汉语方言和官话层级赋以1、0.75和0.5的权重，计算皮尔森相关系数 r_{ij} ，并以 $LD_{ij}=1/2|1-r_{ij}|$ 度量语言距离。

移民网络（MN）：移民社会网络对促进和维持迁移的重要性被很多研究文献确认^[7,40]。本文以 M_{ij}^{t-1}/P_i^{t-1} 即上个普查时户口地在 i 、居住地在 j 的移民存量 M_{ij}^{t-1} 相对于迁出地 i 常住人口 P_i^{t-1} 的比率作为移民网络度量指标，且假设迁出地在迁入地的移民比例越高，则越容易诱发相同路径的移民。采取上次普查数据是考虑社会网络影响的时间滞后性。此外，作为解释变量中唯一的非对称指标，对于解释后文揭示的非对称空间互动具有重要意义。需要声明的是，尽管从直觉上看，迁出地的迁出移民越多，则后续的移民潜力越低，似与迁移网络的预期正效应矛盾。但两个理由能够解释这种度量的可行性：“六普”时期的滞后变量与“七普”时期迁移风险人群无关；迁出过多可能会降低后续迁移数量仅影响为辐散能力，而非本文关注的空间互动。

空间结构效应（SE）：增加额外空间结构效应解释变量的空间计量互动模式旨在为动因探讨“兜底”，即消除未预见效应。然而，变量遗漏主要发生在解释

变量选择环节，源自迁移流分解得到的效应为完全信息，不存在遗漏问题。因此，从理论上，空间结构效应纳入解构得到的效应^③，如Baier等^[41]认为应属空间计量模型中表征最不充分的空间互动。Anderson等^[37]的结构重力模型认为贸易成本（空间互动）不仅取决于起止点双边空间互动，也依赖于起止点与区位其他贸易伙伴间的多边空间互动加权均值即多边阻抗（multilateral resistance, MR ），即真正影响空间互动的并非是双边互动绝对值（ F_{ij} ）而是其相对于起止点多边阻抗乘积的相对值（ $F_{ij}/MR_i MR_j$ ）。然而，多边阻抗的求解又需以双边阻抗的解为基础，因此无法直接由一般估计方法得到。与多边阻抗类似的概念为偏远性（remoteness）^{[41]④}和固定效应^[34]等。前者虽然简单但表征性不强^[37]，后者需要通过模型估计得到，具有计算复杂^⑤、诠释困难等不足。所幸，Baier等^[41]提出了基于对数线性模型的（对数） MR 外生近似，并证明其几乎等价于理论推导的内生 MR ：

$$\begin{aligned} \ln(MR^d) &= \sum_i \sum_j p_i p_j \ln(d_{ij}) \\ \ln(MR_i^d) &= \sum_j p_j \ln(d_{ij}) - 1/2 MR^d \\ \ln(MR_j^d) &= \sum_i p_i \ln(d_{ij}) - 1/2 MR^d \end{aligned}$$

其中， d 为用于空间效应等的各种解释变量， p_i 为作为权重的人口份额。 MR 、 MR_i 和 MR_j 分别为整体、起点和止点多边阻抗^⑥。此处的公式也表明：与距离、边界等各种空间互动解释变量不同，多边阻抗并非空间阻抗的不同维度，而是不同维度解释变量在空间结构中的作用方式。

综上，空间互动的诠释建立了如下模型，并将其用于“七普”省际迁移流数据中的空间互动估计：

$$\ln(SI_{ij}) =$$

$$\alpha + \sum_{k=1}^n \beta_k \ln(k_{ij}) + \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} \ln(MR_i^k) + \sum_{k=1}^n \gamma_{jk} \ln(MR_j^k) + \varepsilon_{ij}$$

其中, SI_{ij} 为迁移流 m_{ij} 中的空间互动, $k=1, \dots, n$ 为双边解释变量, MR_i^k 和 MR_j^k 分别为起点和止点关于 k 变量的多边阻抗, ε_{ij} 为残差项。 α 为常量, β 和 γ 为估计参数。

另一种更为简约的估计模型可以将双边解释变量及其起止点多边阻抗值结合为一个指标并进行估计, 尽管有利于分析各变量的综合解释力, 但却无法区分双边变量和多边阻抗的各自影响:

$$\ln(SI_{ij}) = \alpha + \sum_{k=1}^n \beta'_k \ln\left(\frac{k_{ij}}{MR_i^k MR_j^k}\right) + \varepsilon_{ij}$$

其符号含义与上式的唯一区别是双边变量参数 β 变成了相对度量的变量参数 β' 。

3 发现与讨论

3.1 中国省际迁移流中的空间互动格局

省际迁移流本身也常被用于分析迁移空间结构^[42-44]。时间趋势上经历了迅速增长后稍有回落的过程, 从“五普”时期(1995—2000年)的3228万人增至“六普”时期(2005—2010年)的5500万人达到峰值, 而后“七普”(2015—2020年)回落到5083万人, 这与国家国土空间均衡政策、出口导向战略受挫、乡村人口蓄水池枯竭等多种原因有关。空间上形成从中西部地区迁往东部沿海及边疆地区的格局(图2), 这既与我国改革开放后的经济发展格局一致, 同时也受到我国城乡梯度格局的影响^[45]。空间格局变化上由极化转向更为均衡, 主要表现在: 迁移流的变异系数下降, 从

“五普”时期的4.15下降到“六普”和“七普”时期的3.32和2.11; 尽管迁移流最小值变化不大, 但最大值从“六普”的293万人到“七普”时的163万人, 下降了44%; 迁移效应绝对值普遍下降, 尤以原高迁入、高迁出省份最为明显, 如重庆由高迁出转为接近均衡。

迁移流解构的吸引能力和辐散能力结果也显示了相似的空间格局以及从极化到均衡的时间趋势: 长江流域四川、湖北和安徽吸引力上升, 辐散能力更趋于均衡, 吸引力和辐散力的差异幅度均出现收缩, 见图2。

然而, 迁移空间互动度量结果却展示了完全不同于迁移流的空间格局。尽管强迁移流一直位于从中西部传统高迁出区到沿海高迁入区[图3(a)、(c)], 但高强度的空间互动却存在于流动性较低的

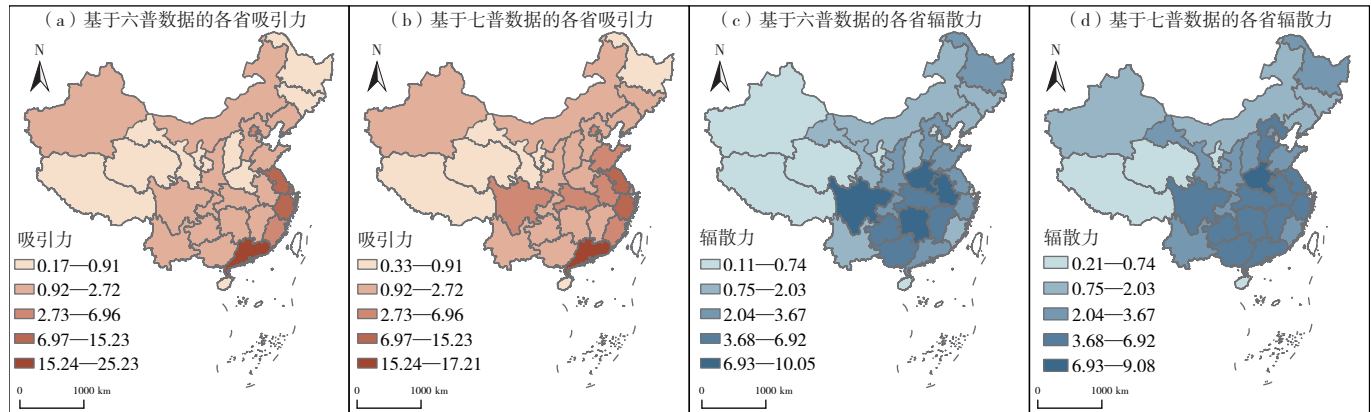


图2 基于“六普”“七普”的各省吸引能力和辐散能力

Fig.2 Attraction and spatial influence of provinces based on the 6th and the 7th Population Censuses

注: 审图号为GS(2025)1399号

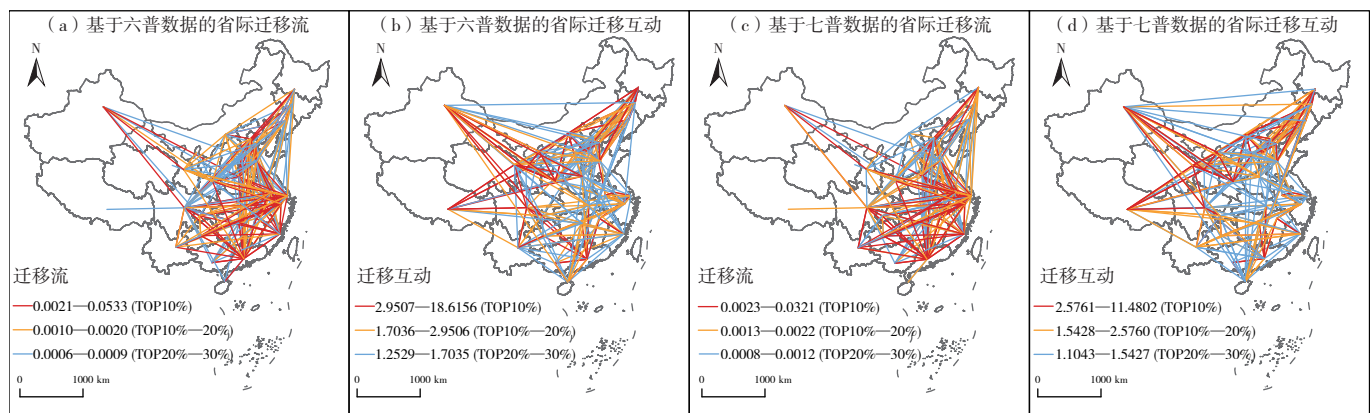


图3 基于“六普”“七普”的前30%迁移流及其空间互动

Fig.3 The top 30% migration flow and its spatial interaction based on the 6th and the 7th Population Censuses

注: 审图号为GS(2025)1399号

边疆地区，诸如西北、东北、华南和西南等外围地区 [图 3(b)、(d)]。这种不同的空间格局表明，迁移流作为起止点效应、空间互动综合作用的结果，其格局也反映了 3 种共同作用的结果，掩盖了其中隐含的空间互动格局（以及吸引力、辐射力格局）。

3.2 空间互动对迁移的影响

尽管从迁移流矩阵能够解构出迁移流中的各种效应，但仍需回答的一个问题是：迁移流差异多大程度上可以归因于止点效应、起点效应和互动效应？为此可以运用解构的效应作为解释度量反过来对迁移流进行拟合以鉴别各种效应。鉴于整体效应是一个固定值，以迁移流份额作为因变量可以避免计数数据模型的约束，因此，所用对数线性模型是以 $\ln(m_{..})$ 为偏移项的模型：

$$\ln(100m_{ij}/m_{..}) = \ln(100m_{ij}) - \ln(m_{..}) = \alpha + \beta_i \ln(O_i) + \beta_j \ln(D_j) + \gamma \ln(F_{ij})$$

由于各种效应由 m_{ij} 解构而来，因此完全纳入 3 个变量的饱和模型会出现完美拟合 ($R^2=1.00$ ，表 3)。为判断各自效应的贡献，采取逐步减少变量的方法拟合。分别采取不同效应的组合得到模型结果见表 3，其中所有模型中的所有变量均在 0.000 的水平上显著。标准回归系数表明，止点影响最强，其次为起点，空间互动最小，表明我国的迁移依然是空间差异驱动的，尤其以止点吸引为主。调整 R^2 也表明了同样的趋势，模型解释力最强的为 $O_i D_j$ 组合 (0.657)，其次为 D_j 、 F_{ij} 组合 (0.611)， $O_i F_{ij}$ 最弱 (0.563)。由此可见，尽管空间互动解释力最低，但在空间互动经验模型中，相比具有大量解释变量因而表征充分的起止点效应，表征严重不足的空间互动反而成为经验互动模型中误差的最大来源，探讨如何表征空间互动十分必要。

迁移空间结构文献^[4, 33, 36]均认为空间结构具有时间稳定性，并希望将历史互动效应用于未知迁移流推导。但从“六普”“七普”比较结果看，两时段空间互动的相关性高达 0.9526，尽管高于起点效应的相关系数 (0.8967)，但低于止点效应的相关系数 (0.9700)，表明空间效应相对于起止点效应的时间稳定性假设难以成立。作为对比，两阶段迁移流的

相关系数也高达 0.9408，高于起点效应但低于互动效应和止点效应的相关性，表明其间止点效应和互动效应的影响增加而起点效应的影响下降，这也与基于传统模型的发现一致，即空间互动、止点效应的相关解释变量系数增长^[42]。

3.3 空间互动的模拟与诠释

使用 4 个对数线性模型对空间互动进行估计 (表 4)：模型 I 为仅含 4 个双边解释变量的基线模型；模型 II 在基线模型基础上增加距离起、止点多边阻抗 (MR_i^{ds} 和 MR_j^{ds}) 以检验纳入多边阻抗的

表 3 基于“七普”的省际迁移流不饱和模型回归结果 (回归系数和调整 R^2)

Tab.3 Regression results of interprovincial migration flow unsaturated model based on the 7th Population Census (regression coefficient and adjusted R^2)

时期	模型	O_i	D_j	F_{ij}	$O_i D_j$	$O_i F_{ij}$	$D_j F_{ij}$	$O_i D_j F_{ij}$
2015—2020 年	常量	-3.971	-3.946	-3.092	-4.670	-3.880	-3.770	-4.605
	起点效应	0.508	——	——	0.522	0.613	——	0.634
	止点效应	——	0.620	——	0.632	——	0.642	0.667
	互动效应	——	——	0.449	——	0.563	0.477	0.597
	调整 R^2	0.257	0.384	0.200	0.657	0.563	0.611	1.000
2005—2010 年	常量	-5.293	-4.557	-8.186	-1.489	-4.132	-4.171	0.000
	起点效应	0.538	——	——	0.544	0.682	——	0.707
	止点效应	——	0.608	——	0.613	——	0.648	0.673
	互动效应	——	——	0.348	——	0.532	0.411	0.604
	调整 R^2	0.289	0.369	0.120	0.664	0.551	0.536	1.000

表 4 基于“七普”的省际迁移流的空间互动估计

Tab.4 Spatial interaction estimation of interprovincial migration flows based on the 7th Population Census

		模型 I		模型 II		模型 III		模型 IV	
		系数	Sig.	系数	Sig.	系数	Sig.	系数	Sig.
常数	C	-0.332	0.073	-3.525	0.00	0.395	0.309	-1.203	0.000
距离	$\ln(DS)$	-0.020	0.529	-0.527	0.000	-0.153	0.000	——	——
边界长度	$\ln(BL)$	0.279	0.000	0.160	0.000	0.042	0.055	——	——
语言距离	$\ln(LD)$	-0.173	0.000	-0.032	0.276	0.052	0.011	——	——
移民网络	$\ln(MN)$	0.347	0.000	0.368	0.000	1.284	0.000	——	——
起点距离阻抗 D	$\ln(MR_i^{ds})$	——	——	0.429	0.000	0.124	0.000	——	——
止点距离阻抗 D	$\ln(MR_j^{ds})$	——	——	0.396	0.000	-0.072	0.043	——	——
起点边界阻抗 B	$\ln(MR_i^{bs})$	——	——	——	——	-0.143	0.000	——	——
止点边界阻抗 B	$\ln(MR_j^{bs})$	——	——	——	——	-0.091	0.000	——	——
起点语言阻抗 L	$\ln(MR_i^{ls})$	——	——	——	——	0.018	0.271	——	——
止点语言阻抗 L	$\ln(MR_j^{ls})$	——	——	——	——	-0.030	0.071	——	——
起点网络阻抗 M	$\ln(MR_i^{ms})$	——	——	——	——	-0.409	0.000	——	——
止点网络阻抗 M	$\ln(MR_j^{ms})$	——	——	——	——	-0.977	0.000	——	——
相对距离	$\ln(RDS)$	——	——	——	——	——	——	-0.115	0.000
相对边界长度	$\ln(RBL)$	——	——	——	——	——	——	0.044	0.000
相对语言距离	$\ln(RLD)$	——	——	——	——	——	——	0.055	0.009
相对移民网络	$\ln(RMN)$	——	——	——	——	——	——	0.795	0.000
R^2		0.397		0.511		0.778		0.753	

注：系数除常数外均为标准化系数；边界长度采用 $\ln(x+1)$ 以避免零值问题

效果；模型Ⅲ在基线模型上增加全部4个双边解释变量的所有多边阻抗；模型Ⅳ将4个双边变量及其相应起止点多边阻抗结合为4个相对双边变量。

在模型Ⅰ中，变量符号均符合预期，即距离、语言距离为负效应外，边界长度和移民网络均呈现正效应，但模型拟合度不高（调整 $R^2=0.397$ ），表明变量拓展之后的模型对空间互动的解释程度依然有限。令人意外的是，双边距离变量不显著且标准化系数最低，而移民网络和边界长度具有较高的标准系数（0.347和0.279），语言距离标准系数中等。移民网络较高的标准系数可能因为部分承载了距离效应，而边界效应的较高系数表明可能存在较高比例的跨界短途迁移。

模型Ⅱ结果表明，纳入距离多边阻抗后模型拟合度明显提升（ $R^2=0.511$ ）。单因素解释力较弱的双边距离（ $R^2=0.155$ ）及其起止点多边阻抗（ $R^2=0.01$ ）、止点多边阻抗（ $R^2=0.003$ ）结合后，不仅使双边距离变得显著，三者的标准系数也大幅上升，分别为-0.527、0.429和0.396。其余3个双边变量中，移民网络系数略有上升，但边界长度和语言距离下降较多，语言距离变量变得不显著。这种变化表明，空间互动在本质上并非仅限于双边的绝对度量，而是双边变量相对于整个系统的绝对度量。

为此，模型Ⅲ纳入了全部双边要素的相应起止点多边阻抗，12个解释变量组成的模型Ⅲ拟合度提高显著（ $R^2=0.778$ ）。在均纳入结构效应的情况下，移民网络解释力再次迅速增长，距离的效应下降，语言距离和边界长度系数下降明显，其中一些变量变得不显著，如语言距离变量、边界长度和止点距离多边阻抗，止点距离阻抗和起点语言距离阻抗出现不合预期的符号，尽管系数绝对值很小。

模型Ⅳ表明，尽管解释变量由12个减少为4个相对指标，但模型解释力依然较高（0.753）。4个变量的符号均符合预期，其中仅相对语言距离显著性较低（0.009）。从4个相对变量的标准化系数看，移民网络的解释力最强，其次为距离，语言距离和边界长度的解释力较低。相较于模型Ⅰ，不仅模型解释力大幅提高，同时也证实了移民网络对维持迁移

的重要性，弱化了距离、边界和语言距离的初始诱因，表明迁移空间互动从初始诱发转向自我维持。

4 总结与展望

迁移理论与迁移模型之间存在较大的脱节。迁移理论关注从起止点属性方面寻求解释，对迁移流的空间特征诸如距离和空间结构关注较少，而迁移流模型带有较强的经验研究特征，关注模型的拟合度与关键动因的鉴别解释，而忽略了解释变量与迁移流作用机制的结构化理论建构。通过借鉴迁移流解构方法与结构化重力模型，将迁移流解构用于中国的“六普”“七普”省际迁移流数据，并对其中较为棘手的空间互动进行了度量与诠释，研究主要贡献包括方法论和本体论两个方面。

在方法论层面，借鉴结构重力模型和迁移流解构，提出将传统空间互动模型的“流—变量”的一步模型改为“流—效应—变量”的两步模型，有利于明晰迁移流的效应构成及其度量，从而可以有针对性地分别探讨影响效应的解释变量，也能够为调整人口迁移决策提供研究方向。空间结构诠释上，通过我国“七普”省际迁移流数据的多种模型估计比较，探讨了双边变量与结构效应的关系，为将与空间结构效应相关的空间自相关纳入空间模型结构化体系提供了研究借鉴，表明空间结构效应的本质是双边绝对变量与双边相对变量的中介。

在本体论层面：首先，厘清了迁移流和空间互动的区别，有利于从更深层次发掘迁移的空间特征。研究结果表明，迁移流与空间互动的空间格局具有很大差异，前者结合了起点辐散能力和止点吸引能力的影响，后者则体现了空间互动强度本身的影响。其次，通过“六普”“七普”比较，检验了吸引能力、辐散能力和空间互动的相对重要性及其时间稳定性，表明相对于吸引能力，空间互动的空间稳定性并不明显。最后，通过基于相对双边变量的空间互动回归表明，距离、文化距离、边界长度等空间互动诱发动因的作用不明显，移民社会网络的作用十分显著，证明了对迁移空间互动的探讨应从诱发动因转向维持动因。

作为初步探讨，仍存在很多值得进一步研究的方向。首先，空间互动与空间结构效应或空间自相关研究的关系仍需探讨。尽管本文从理性判断空间结构效应主要应归于空间互动，但仍需进一步验证。其次，与空间互动效应具有对称性的传统观点不同，迁移流空间互动远非对称的，探讨这种非对称性及其解释变量也是一个值得研究的议题。再次，本文仅探讨了空间互动的诠释，而起点辐散能力、止点吸引能力的影响因素探讨同样至关重要，也更为区域地方发展的决策者和规划者所关注。最后，迁移流空间互动模型及其效应解构和诠释方法可以适用于多种情景的时间与空间尺度，受数据限制，本文仅以省际空间迁移为对象进行分析，若将其用于不同的空间尺度和时间背景，预计可以产生更为有趣和有用的发现，包括但不限于时间趋势和空间尺度分异规律。

感谢丁金宏教授的建议。

注释

- ① 数据源于OPENDATA中国铁路通行数据（<https://www.cnopendata.com/data/m/recent/railway-passing-time.html>）。
- ② 理想的构成指标为使用人口份额，但数据难以获取。本文根据《中国语言地图》中的类型分区计算面积份额。
- ③ 乘法成分模型也具有易于合并表达的特征，例如 $Y=ODEFS=OD(FS)=(OS)DF=O(DS)F$ 。
- ④ 起点偏远性的表达式为： $RM_j=\sum_{i \neq j} P_i d_{ji}$ ，即以止点（j）人口份额为权重的距离 d_{ji} 加权值。
- ⑤ 固定效应对各起止点使用哑变量表达，通过模型估计得到，需要明确吸引能力、辐散能力和空间互动近似变量。
- ⑥ 很明显，整体多边阻抗为 MR^d 对各起止点都是恒定的，仅影响截距而不影响系数估计，因此回归中没有纳入。

参考文献

- [1] 马璇,张振广.基于人口流动的长三角区域空间演化特征及态势研究[J].城市规划学刊,2020(5):47-54.
- [2] 邵云通,吴晓.“等级—网络”双维度下长三角城市关联性的演变模式:基于人口流动

- 大数据的分析[J]. 城市规划学刊, 2023(6): 59-67.
- [3] 晏龙旭. 流空间结构性影响的理论分析[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 32-39.
- [4] ROGERS A, WILLEKENS F, LITTLE J, et al. Describing migration spatial structure[J]. *Papers in Regional Science*, 2002, 81(1): 29-48.
- [5] SHEN J F. Error analysis of regional migration modeling[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2016, 106(6): 1253-1267.
- [6] 赵梓渝, 魏冶, 杨冉, 等. 中国人口省际流动重力模型的参数标定与误差估算[J]. 地理学报, 2019, 74(2): 203-221.
- [7] MASSEY D S, ARANGO J, HUGO G, et al. Theories of international migration: a review and appraisal[J]. *Population and Development Review*, 1993, 19(3): 431-466.
- [8] RANIS G, FEI J C. A theory of economic development[J]. *American Economic Review*, 1961, 51(4): 533-565.
- [9] LEWIS A. Economic development with unlimited supplies of labour[J]. *The Manchester School of Economic and Social Studies*, 1954, 22(2): 139-191.
- [10] HARRIS J R, TODARO M P. Migration, unemployment & development: a two-sector analysis[J]. *American Economic Review*, 1970, 60(1): 126-142.
- [11] SJAASTAD L A. The costs and returns of human migration[J]. *Journal of Political Economy*, 1962, 70(S5): 80-93.
- [12] STARK O. The migration of labor[M]. Cambridge: Basil Blackwell, 1991.
- [13] STARK O, BLOOM D E. The new economics of labor migration[J]. *American Economic Review*, 1985, 75(2): 173-178.
- [14] PIORE M, PIORE J. Birds of passage: migrant labor in industrial societies[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [15] GRAVES P E. Migration and climate[J]. *Journal of Regional Science*, 1980, 23: 541-546.
- [16] HUNT G L. Equilibrium and disequilibrium in migration modelling[J]. *Regional Studies*, 1993, 27(4): 341-349.
- [17] GRAVES P E, LINNEMAN P D. Household migration: theoretical and empirical results[J]. *Journal of Urban Economics*, 1979, 6(3): 383-404.
- [18] 范力达. 人口迁移的均衡模型与非均衡模型评述[J]. 中国人口科学, 1994(5): 1-7.
- [19] SASSEN S. The mobility of labor and capital: a study in international investment and labor flow[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [20] WALERSTEIN I. The modern world system: capitalist agriculture and the origins of the European world economy in the sixteenth century[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [21] MASSEY D S, ESPANA F G. The social process of international migration[J]. *Science*, 1987, 237(4816): 733-738.
- [22] ZIPF G K. The P1P2/D hypothesis: on intercity movement of persons[J]. *American Sociological Review*, 1946, 11: 677-686.
- [23] LOWERY L F. Development of an attitude measuring instrument for science education[J]. *School Science and Mathematics*, 1966(5): 494-501.
- [24] BUCH C M, KLEINERT M, TOUBAL F. The distance puzzle: on the interpretation of the distance coefficient in gravity equations[J]. *Economics Letters*, 2004, 83(3): 293-298.
- [25] BOSQUET C, BOULHOL H. What is really puzzling about the "distance puzzle" [J]. *Review World Economics*, 2015, 151(1): 1-21.
- [26] MCCALLUM J. National borders matter: Canada-U. S. regional trade patterns[J]. *American Economic Review*, 1995, 85(3): 615-623.
- [27] CURRY L. A spatial analysis of gravity flows[J]. *Regional Studies*, 1972, 6(2): 131-147.
- [28] FOTHERINGHAM A S. Spatial structure and distance decay parameters[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1981, 71(3): 425-436.
- [29] OSHAN T M. The spatial structure debate in spatial interaction modeling: 50 years on [J]. *Progress in Human Geography*, 2021, 45(5): 925-950.
- [30] PATUELLI R, ARBIA G. Spatial econometric interaction modelling[M]. New York: Springer, 2016.
- [31] ANSELIN L. Thirty years of spatial econometrics[J]. *Papers in Regional Science*, 2010, 89(1): 3-26.
- [32] SHRYOCK H S. Population mobility within the United States[M]. Chicago: Community and Family Study Center, University of Chicago, 1964.
- [33] MUESER P. The spatial structure of migration: an analysis of flows between states in the USA over three decades[J]. *Regional Studies*, 1989, 23(3): 185-200.
- [34] ROGERS A. Describing spatial structures of migration[M]//ROGERS A, LITTLE J, RAYMER J. The indirect estimation of migration. New York: Springer Science + Business Media B.V., 2010: 29-45.
- [35] ROGERS A. The spatial patterns and structures of migration[M]//ROGERS A. Applied multiregional demography through problems. New York: Springer Nature Switzerland AG, 2020: 99-133.
- [36] WILLEKENS F. Log-linear modeling of spatial interaction[J]. *Papers of The Regional Science Association*, 1983, 52: 187-205.
- [37] ANDERSON J E, VAN WINCOOP E. Gravity with gravitas: a solution to the border puzzle[J]. *American Economic Review*, 2003, 93(1): 170-192.
- [38] TOBLER W R. A classification of map projections[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1962, 52(2): 167-175.
- [39] ADSERÀ A, PYTLIKOVÁ M. The role of language in shaping international migration[J]. *Economic Journal*, 2015, 125(586): F49-F81.
- [40] MUNSHI K. Networks in the modern economy: Mexican migrants in the US labor market[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2003, 118(2): 549-599.
- [41] BAIER S L, BERGSTRAND J H. Bonus vetus OLS: a simple method for approximating international trade-cost effects using the gravity equation[J]. *Journal of International Economics*, 2009, 77(1): 77-85.
- [42] 劳昕, 古恒宇, 卢琳, 等. 两次普查间省际人口迁移格局及影响因素变化[J]. 人口与发展, 2023, 29(6): 15-30.
- [43] 王桂新. 中国省际人口迁移变化特征: 基于第七次全国人口普查数据的分析[J]. 中国人口科学, 2022(3): 2-16.
- [44] 严善平. 当代中国地区间人口迁移的基本格局及变化趋势[J]. 人口与经济, 2023, 260(5): 112-125.
- [45] 陆希刚, 张立. 区域差异和城乡梯度双重视角下的中国流动人口迁移空间模式[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 66-73.

修回: 2025-01