

基于人口流动修正引力模型的滇中城市群城市联系强度研究

李胜锋^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南师范大学, 西部资源环境地理信息技术教育部工程技术研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月29日; 发布日期: 2026年8月20日

摘要

城市群内部城市联系强度是衡量区域一体化程度的核心指标。本文以滇中城市群49个县级行政区为对象, 构建经济、社会、乡村三维综合发展质量评价体系, 运用熵权-TOPSIS法测算综合发展质量; 基于ArcMap网络分析提取最短公路与铁路距离, 以反计价权加权平均得到综合距离; 引入人口流动系数修正传统引力模型, 系统度量城市联系强度。结果表明: (1) 综合发展质量呈显著的“核心-边缘”(core-periphery)分异格局, 昆明市辖区远高于其他县区; (2) 引入人口流动系数后, 呈贡区引力排名上升, 宣威市等人口流出城市下降, 有效修正传统偏差; (3) 联系强度呈“一核极强、多核偏弱、边缘破碎”格局, 强联系集中于昆明市辖区及周边, 大部分单元联系微弱。研究揭示昆明对周边城市的要素吸引力远大于其对周边城市的产业带动效应, 区域空间结构呈现“中心极化、外围依附”的特征, 交通基础设施不足是关键短板, 为滇中城市群及类似区域协同发展提供决策参考。

关键词

引力模型, 滇中城市群, 城市联系强度, 人口流动系数, 熵权-TOPSIS法

Study on Urban Connection Intensity of the Central Yunnan Urban Agglomeration Based on Population-Flow-Modified Gravity Model

Shengfeng Li^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: June 29, 2026; accepted: July 29, 2026; published: August 20, 2026

Abstract

Urban connection intensity within an urban agglomeration is a core indicator for measuring the degree of regional integration. This study takes 49 county-level administrative units in the Central Yunnan Urban Agglomeration as research objects, constructs a three-dimensional comprehensive development quality evaluation system covering economic, social, and rural dimensions, and employs the Entropy Weight-TOPSIS method to measure comprehensive development quality. The shortest road and railway distances between county pairs are extracted via ArcMap network analysis and integrated into a comprehensive distance using a weighted average with weights inversely proportional to per-unit transport costs. A population mobility coefficient is further introduced to modify the traditional gravity model, enabling a systematic measurement of urban connection intensity. The results show that: (1) comprehensive development quality exhibits a significant “core-periphery” spatial pattern, with Kunming’s municipal districts far outperforming other counties; (2) after incorporating the population mobility coefficient, Chenggong District’s gravity ranking rises while outflow cities such as Xuanwei decline, effectively correcting traditional model bias; and (3) the connection intensity presents a pattern of “extremely strong core, relatively weak multiple cores, and fragmented periphery”, with strong connections concentrated in and around Kunming’s municipal districts, while most inter-county linkages remain weak. The study reveals that Kunming’s attraction of factors from surrounding areas far exceeds its industrial driving effect on them, and the regional spatial structure is characterized by “central polarization and peripheral dependence”. Insufficient transport infrastructure is identified as a critical bottleneck. These findings provide data-driven policy references for coordinated development of the Central Yunnan Urban Agglomeration and similar regions.

Keywords

Gravity Model, Central Yunnan Urban Agglomeration, Urban Connection Intensity, Population Mobility Coefficient, Entropy Weight-TOPSIS Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市群是区域城镇化高级阶段的空间组织形式，其内部城市间联系强弱直接影响资源配置效率和整体竞争力[1][2]。城市联系强度反映城市间经济联系、要素流动和空间互动程度，科学测度有助于识别区域发展核心节点和薄弱环节，为优化空间结构、促进一体化提供依据。

引力模型(Gravity Model)因理论基础清晰、计算简便而被广泛应用，源于牛顿万有引力定律，由 Zipf 引入城市地理学[3]，基本思想为城市间联系与规模成正比、与距离成反比。该模型已广泛用于经济、交通、信息流等研究[4]。但传统引力模型存在局限：城市“质量”常以人口或 GDP 单一指标表示，难以全面反映综合发展水平[5]；距离多采用欧氏距离，忽略交通成本和可达性差异[6]；较少考虑人口流动等动态要素，测度结果与现实存在偏差[7]。

学者们从多方面改进：采用多指标综合评价法(熵权法、TOPSIS 等)测度城市质量[8]；以时间距离、交通成本距离等替代空间距离[9]；引入人口流、交通流等动态数据，提升模型解释力[10][11]。

滇中城市群位于云南中部，是国家城镇化战略的重要组成部分，承担引领全省高质量发展、建设面

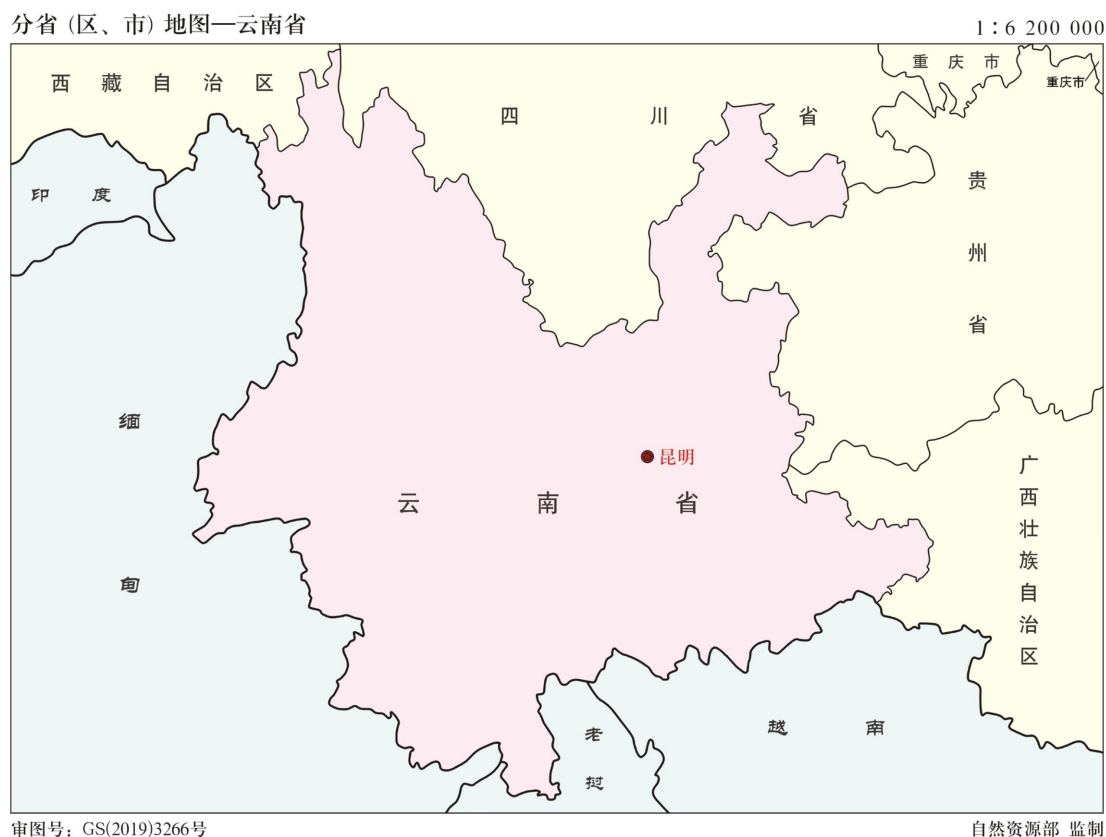
向南亚东南亚开放枢纽的战略任务[12]。现有研究多聚焦京津冀、长三角等发达地区[13]，对滇中城市群关注不足，且多以地级市为单元，较少从县域尺度分析。此外，较少同时考虑综合质量、交通成本及人口流动的综合影响。

本文以滇中城市群 49 个县级行政区为对象，改进传统引力模型：构建多维度综合质量评价体系，采用熵权-TOPSIS 测算；基于公路铁路网络测算综合距离；引入人口流动系数修正模型。系统分析县域尺度城市联系强度及空间格局，揭示区域发展不均衡问题，为滇中城市群一体化提供科学依据。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究区域概况

滇中城市群位于云南省(图 1)，范围包括昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州全境及红河哈尼族彝族自治州北部的蒙自市、个旧市、建水县、开远市、弥勒市、泸西县、石屏县七个县市，共 49 个县级行政区。国土面积约 11.14 万平方公里，占全省的 28.3%；常住人口约 2127 万人，占全省的 44.1%；地区生产总值约 1.02 万亿元，占全省的 61.6%。滇中城市群是云南省交通设施较密集、开发强度较高、发展水平较高的区域，也是带动全省经济社会发展的核心城市。滇中地区地形以山地、高原为主，地表起伏较大，城市间空间可达性不能简单以欧氏距离衡量，需充分考虑实际交通网络与通行成本。



注：该图来源于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 号的标准地图。

Figure 1. Location map of the study area

图 1. 研究区位置图

2.2. 指标体系构建与数据来源

2.2.1. 城市发展质量指标体系

为全面反映各县级行政区的综合发展水平，本研究构建了包含城市经济发展质量、城市社会发展质量、乡村发展质量 3 个一级指标、共 14 项二级指标的综合发展质量评价指标体系(表 1)。该指标体系兼顾了城市与乡村两个维度，旨在赋予城市发展质量以新的时代内涵——不仅关注传统的经济产出规模，还关注社会福祉与乡村发展等内涵式发展要素。

Table 1. Quality indicator system for urban development in the Central Yunnan Urban Agglomeration
表 1. 滇中城市群城市发展质量指标体系

目标	一级指标	二级指标	单位
综合发展质量	城市经济发展质量	人均 GDP	元
		一般公共预算收入	万元
		一般公共预算支出	万元
		第二产业生产总值	万元
		第三产业生产总值	万元
		职工平均工资	元
	城市社会发展质量	职工人数	人
		住户存款年末余额	万元
		社会消费品零售总额	万元
		第一产业生产总值	万元
	乡村发展质量	乡村人口	人
		乡村从业人员	人
		农村常住居民人均可支配收入	元

2.2.2. 数据来源

发展质量指标来源于《云南统计年鉴——2020》；流动人口数据来自各县级行政区 2020 年《国民经济和社会发展统计公报》，由常住人口减去户籍人口得到；公路与铁路网络数据来源于云南省交通运输厅及《云南统计年鉴——2020》，城市间公路与铁路距离通过 ArcMap 网络分析提取；交通计价数据来源于《云南统计年鉴——2020》及云南省交通运输厅相关文件。

2.3. 研究方法

2.3.1. 熵权-TOPSIS 法

熵权法基于信息熵原理确定权重，信息熵值越小表明指标离散程度越大、对综合评价的影响越大；TOPSIS 法通过计算各评价对象与最优解和最劣解的距离评估其相对优劣。计算步骤如下：

(1) 熵权法计算步骤

首先，构建原始数据矩阵。设有 m 个城市、 n 项评价指标， X_{ab} 表示第 a 个城市第 b 项指标的原始值。

其次，计算第 b 项指标下第 a 个城市的概率：

$$P_{ab} = \frac{X_{ab}}{\sum_{a=1}^m X_{ab}} \quad (1)$$

然后, 计算第 b 项指标的信息熵:

$$E_b = -\frac{1}{\ln m} \sum_{a=1}^m P_{ab} \ln(P_{ab}) \quad (2)$$

其中, E_b 表示第 b 项指标的熵值, m 为城市数量。当 $P_{ab}=0$ 时, 定义 $P_{ab} \ln(P_{ab})=0$ 。

最后, 计算第 b 项指标的熵权:

$$w_b = \frac{1-E_b}{\sum_{b=1}^n (1-E_b)} \quad (3)$$

其中, w_b 为第 b 项指标的权重, n 为指标数量, 且 $\sum_{b=1}^n w_b = 1$ 。

(2) TOPSIS 法计算步骤

由于本研究选取的指标均为正向指标(指标值越大越好), 故省去了数据同趋势化的步骤。计算步骤如下:

首先, 构建标准化矩阵。采用向量归一化法对原始数据进行标准化处理:

$$Z_{ab} = \frac{X_{ab}}{\sqrt{\sum_{a=1}^m (X_{ab})^2}} \quad (4)$$

其中, Z_{ab} 为标准化后的指标值。

其次, 确定正理想解和负理想解:

$$Z_b^+ = \max_{1 \leq a \leq m} Z_{ab}, \quad Z_b^- = \min_{1 \leq a \leq m} Z_{ab} \quad (5)$$

再次, 计算各评价对象与正、负理想解的加权欧氏距离:

$$D_a^+ = \sqrt{\sum_{b=1}^n w_b (Z_b^+ - Z_{ab})^2} \quad (6)$$

$$D_a^- = \sqrt{\sum_{b=1}^n w_b (Z_b^- - Z_{ab})^2} \quad (7)$$

其中, D_a^+ 越小说明越接近最优水平, D_a^- 越大说明越远离最劣水平。

最后, 计算各城市的综合得分指数:

$$Q_a = \frac{D_a^-}{D_a^+ + D_a^-} \quad (8)$$

其中, $Q_a \in [0,1]$, 值越大表示城市综合发展质量越高。

2.3.2. 引力模型及其修正

引力模型是研究城市间空间相互作用的经典方法, 其基本形式来源于牛顿万有引力定律。传统引力模型可表示为:

$$F_{ij} = \frac{Q_i * Q_j}{D_{ij}^2} \quad (9)$$

其中, F_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的引力值(联系强度), Q_i 、 Q_j 分别为城市 i 、 j 的“质量”(通常以人口规模或 GDP 衡量), D_{ij} 为两城市间的距离。

针对传统引力模型的不足, 本研究从以下两个方面进行修正:

第一, 引入人口流动系数。人口流动是反映城市吸引力和活力的重要指标。流动人口可以带来新的

经济、文化和社会活动，加速城市的发展和创新。本研究以常住人口减去户籍人口得到的流动人口数据为基础，采用 MIN-MAX 法进行标准化处理，得到各城市的人口流动系数 K_a ：

$$K_a = \frac{N_a - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \quad (10)$$

其中， K_a 为城市 a 的人口流动系数， N_a 为城市 a 的流动人口(常住人口 - 户籍人口)， $N_{\min}$ 和 $N_{\max}$ 分别为所有城市中流动人口的最小值和最大值。标准化后 $K_a \in [0,1]$ ，值越大表示该城市对人口的吸引力越强。

将人口流动系数与熵权-TOPSIS 法得到的综合得分指数相乘，得到各城市的引力得分指数：

$$G_a = K_a * Q_a \quad (11)$$

第二，采用综合距离替代欧氏距离。考虑到滇中地区多为陡坡山地、地表起伏较大，欧氏距离并不能代表城市之间的实际空间距离。本研究以公路距离和铁路距离的加权平均值作为城市间综合距离，权重由两种交通方式的平均每公里计价的反比确定——假设交通方式的每公里耗费越低，越有利于城市之间的联系。

修正后的引力模型为：

$$F_{ij} = (K_i + K_j) \frac{Q_i * Q_j}{D_{ij}^2} \quad (12)$$

或等价地：

$$F_{ij} = \frac{G_i * Q_j + Q_i * G_j}{D_{ij}^2} \quad (13)$$

其中， F_{ij} 为城市 i 、 j 之间的城市引力(联系强度)， K_i 、 K_j 分别为城市 i 、 j 的人口流动系数， Q_i 、 Q_j 分别为城市 i 、 j 的综合发展质量， G_i 、 G_j 分别为城市 i 、 j 的引力得分指数， D_{ij} 为城市 i 、 j 之间的综合距离。

2.3.3. 城市综合距离的测算

在 ArcMap 中分别基于公路和铁路网络构建网络数据集，计算 49 个县级行政区两两之间的最短公路距离和最短铁路距离。

公路计价分为高速公路和其他道路。首先统计私人汽车、载客汽车、载货汽车三类车辆的数量及平均每公里耗油费用，以车辆数量为权重加权平均得到综合油耗；高速公路以路费与油耗之和计价，其他道路仅以油耗计价。分别统计高速公路和其他道路总里程，以里程为权重加权平均得到公路平均每公里计价。

铁路计价分为高铁、载客火车和载货火车三类。高铁以二等座、一等座、商务座每公里计价按座位数加权平均；载客火车以硬座、硬卧、软卧每公里计价按座位数加权平均；载货火车以每吨每公里运费计价。三者取平均得到铁路平均每公里计价。

将最短公路距离和最短铁路距离以反平均每公里计价权进行加权平均，得到综合距离：

$$D_{ij} = \frac{d_{ij}^{\text{road}} \times \frac{1}{c_{\text{road}}} + d_{ij}^{\text{rail}} \times \frac{1}{c_{\text{rail}}}}{\frac{1}{c_{\text{road}}} + \frac{1}{c_{\text{rail}}}} \quad (14)$$

其中， d_{ij}^{road} 和 d_{ij}^{rail} 分别为城市 i 、 j 之间的最短公路距离和最短铁路距离， c_{road} 和 c_{rail} 分别为公路和铁路的

平均每公里计价。对于无铁路连接的区县对，直接以公路最短距离作为综合距离。

2.3.4. 数据分析与可视化

在引力值计算过程中，首先将各城市的综合发展质量(Q)、人口流动系数(K)及引力得分指数(G)代入修正引力模型，逐一求解所有城市对之间的引力值。随后，将各城市的综合得分和引力得分与其空间区位进行关联，采用分级色彩渲染的方式展示其空间分异特征，以识别高值集聚区和低值区。最后，将城市间的综合距离量化为空间连接线段，并依据计算所得的引力值大小进行分级符号化，从而直观呈现城市群内部联系强度的空间格局与层级结构。

2.4. 技术路线

本研究的流程如图2所示，主要包括数据获取与处理、模型构建、结果分析三个环节。

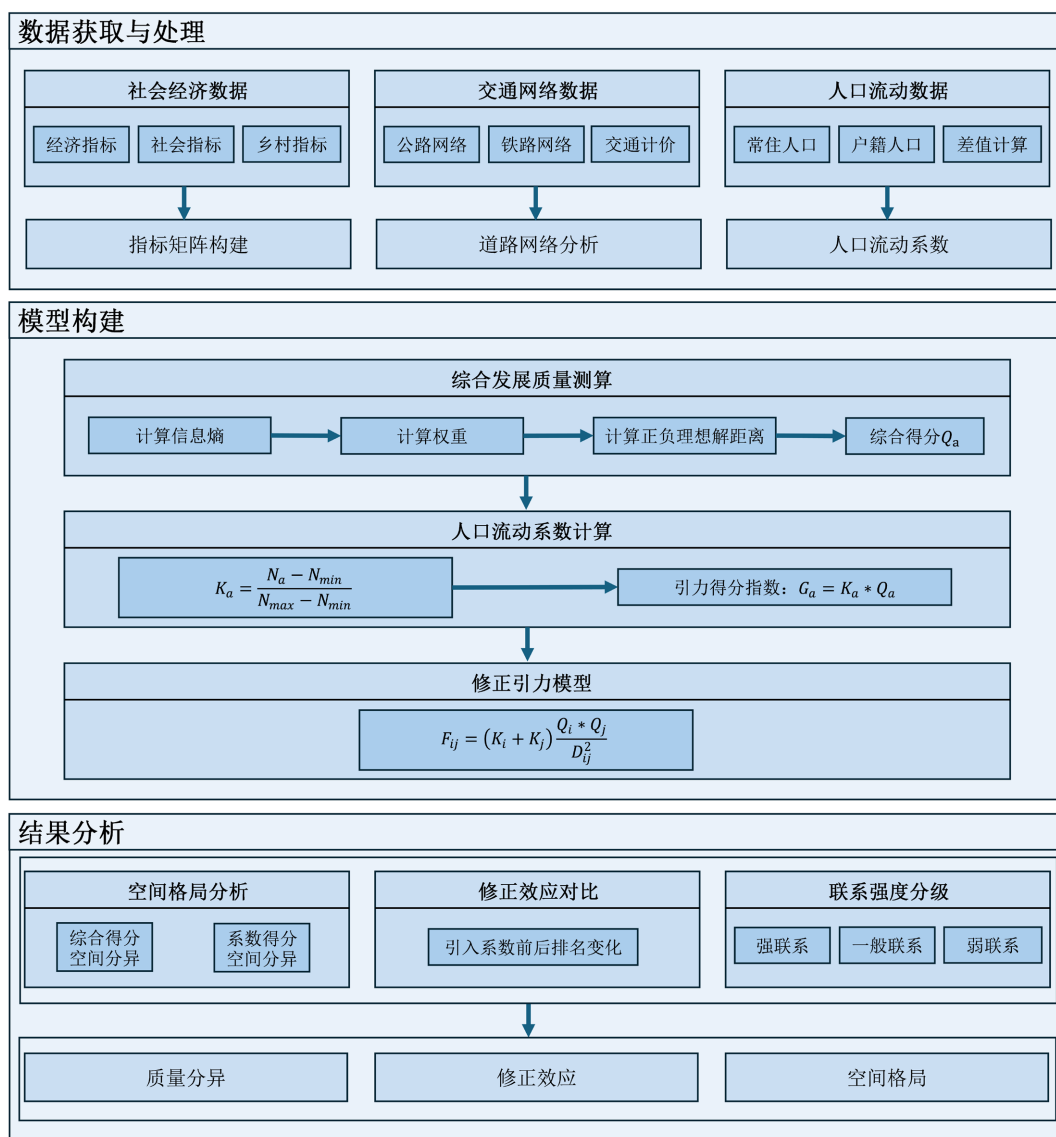


Figure 2. Research flowchart
图2. 研究流程图

3. 结果与分析

3.1. 城市综合发展质量评价结果

基于熵权-TOPSIS 法测算滇中城市群 49 个县级行政区的综合发展质量指数,结果见图 3。总体来看,各县级行政区综合发展质量差异明显,呈现显著的空间分异特征。

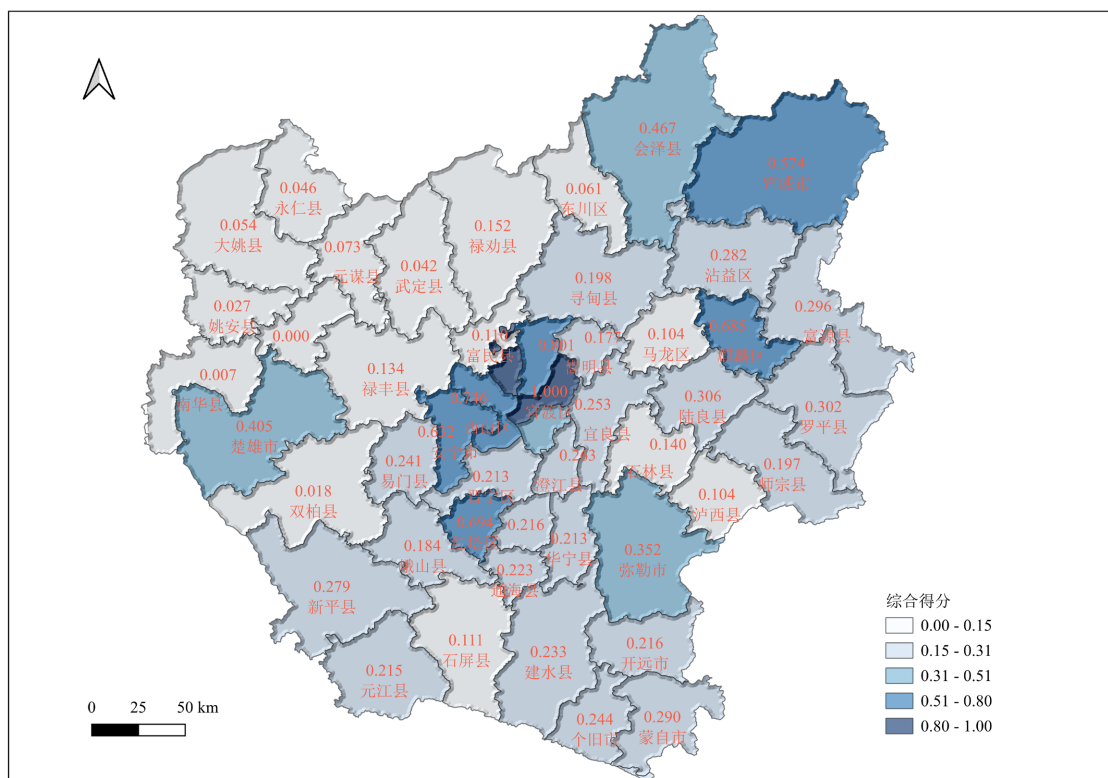


Figure 3. Scores of overall development quality for cities in the Central Yunnan Urban Agglomeration
图 3. 滇中城市群各城市综合发展质量得分

昆明市辖区整体处于领先梯队。官渡区综合得分归一化值达 1.000，高居首位；五华区(0.914)、盘龙区(0.801)、西山区(0.746)紧随其后，形成高值核心集聚区。呈贡区(0.508)虽位列第九，但依托行政中心和大学城建设，发展潜力突出。上述区域在经济总量、公共服务、人口集聚等方面优势明显，构成滇中城市群的发展极核。

第二梯队由红塔区(0.694, 第 5)、麒麟区(0.685, 第 6)和安宁市(0.632, 第 7)构成, 烟草、工业及卫星城特色鲜明。楚雄市(0.405, 第 11)、弥勒市(0.352, 第 12)等区域性中心城市得分居中, 但与头部差距显著。

多数外围县区综合得分偏低，如牟定县(0)、南华县(0.007)、双柏县(0.018)等排名末位，反映发展资源高度集中于昆明核心区。整体格局呈现以昆明主城为核心、向外围梯度递减的“核心-边缘”特征，格局分异鲜明。

3.2. 人口流动系数分析

人口流动系数(K 值)反映了各城市对人口的吸引力。图 4 展示了各城市的引力得分指数($G=K \times O$)。

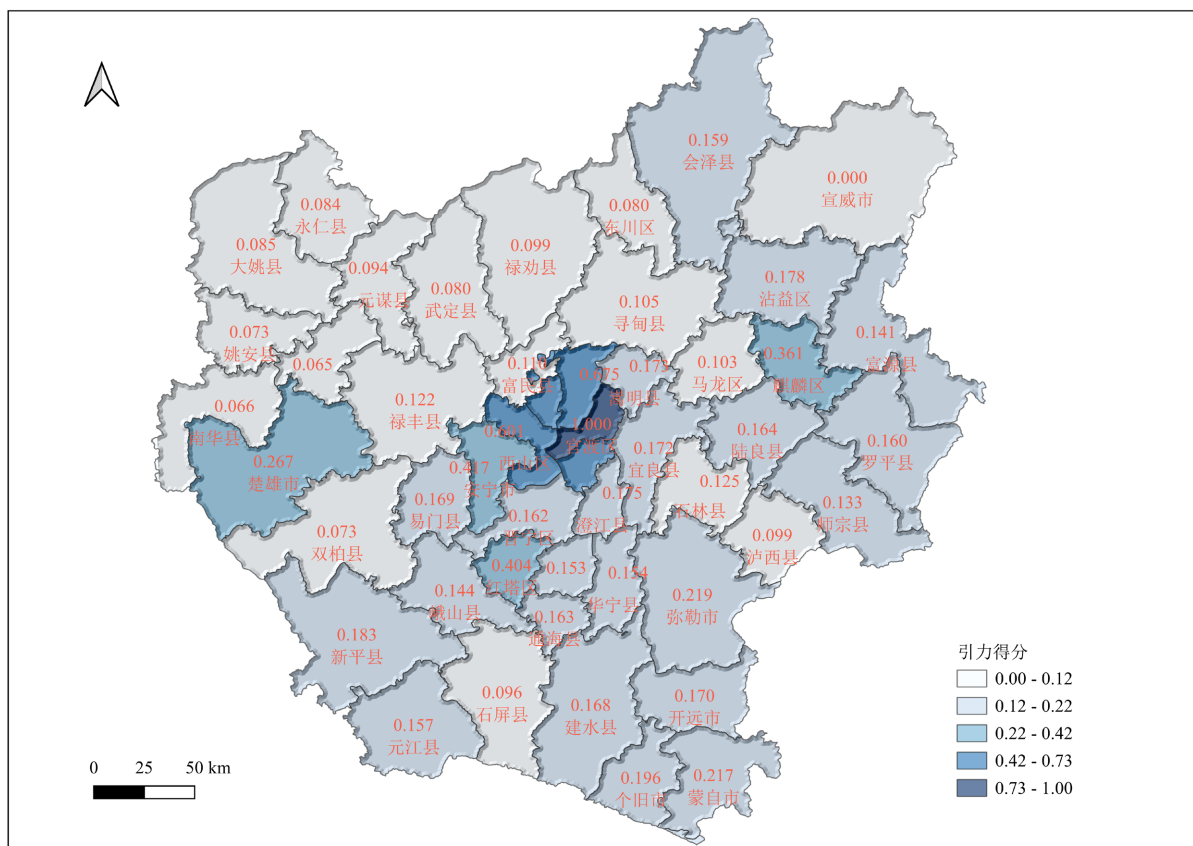


Figure 4. Gravity scores of cities in the Central Yunnan Urban Agglomeration

图 4. 滇中城市群各城市引力得分

官渡区、五华区、盘龙区分别以 1.000、0.734、0.675 的系数得分位居前三，表明昆明主城区人口吸引力最强。呈贡区(0.626，第 4)和西山区(0.601，第 5)同样表现突出，与行政中心迁移、大学城建设及现代服务业集聚高度吻合。安宁市(0.417，第 6)作为工业卫星城，人口吸引力持续增强。

然而，多数外围县区系数得分极低。宣威市(0)排名末位，人口净流出最为严重，其传统农业和资源型产业难以提供充足就业岗位，大量劳动力外流。牟定县(0.065)、南华县(0.066)等也处于低位。麒麟区(0.360，第 8)和红塔区(0.404，第 7)虽综合质量较高，但人口吸引力排名明显低于其综合排名(麒麟区综合第 6，系数第 8；红塔区综合第 5，系数第 7)，暗示人口存在外流压力。上述特征表明，昆明核心区对周边人口具有显著的净吸引优势，而次级中心城市的人口保留能力明显不足。从要素流动的净方向看，人口、资本等高流动性要素持续向昆明主城区集中，区域“一核独大”的失衡格局在人口流动维度进一步凸显。

3.3. 引入人口流动系数前后的对比分析

将人口流动系数引入引力模型后，城市引力排名发生显著调整。为直观反映修正效应，以综合得分排名(代表引入系数前的质量排序)与人口流动系数排名(代表吸引力修正后的排序)的差值衡量变化方向与幅度。表 2 列出了排名波动较大的典型城市。

宣威市变化最为剧烈(下降 41 位)，其综合质量虽位居第 8，但人口吸引力垫底，大量人口外流严重削弱了其实际辐射能力，引入系数后排名骤降至末位，表明传统模型高估了该类城市的联系强度。嵩明县排名跃升 17 位(从第 33 升至第 16)，得益于其区位优势 and 人口净流入，形成“人口集聚→市场扩大→

投资增加”的正向循环，修正后更真实地反映了其区域活力。富源、会泽、罗平、陆良等资源型或农业县，因就业岗位有限导致人口外流，排名普遍下降。个旧、开远等老工业城市因产业转型吸引部分回流人口，排名有所上升。

Table 2. Changes in gravity ranking of some cities
表 2. 部分城市引力排名变化

城市	引入系数前排名	引入系数后排名	排名变化
宣威市	8	49	-41
嵩明县	33	16	17
富源县	15	30	-15
会泽县	10	25	-15
罗平县	14	24	-10
个旧市	21	12	9
开远市	26	18	8
陆良县	13	21	-8

总体而言，引入人口流动系数后，净流入城市(如嵩明、个旧、开远)引力排名提升，净流出城市(如宣威、会泽、富源)排名显著下降，有效纠正了传统引力模型因依赖静态经济指标而产生的偏差，使测度结果更贴近城市实际发展态势与区域联系潜力。

3.4. 城市联系强度总体分析

将各城市的综合得分指数(Q)、人口流动系数(K)和综合距离(D)代入修正引力模型，计算得到 49 个县级行政区两两之间的引力值。图 5 展示了滇中城市群各城市之间的联系强度，图 5(a)展示了联系强度的总体格局。

滇中城市群联系强度呈现以下特征：

- (1) 梯度分异极为显著。以昆明为核心的“核心 - 边缘”格局鲜明，高强度联系区域与弱联系区域对比悬殊。
- (2) 昆明市辖区构成联系核心枢纽。引力值最高的城市对几乎全部由昆明市辖区及其与周边县市的组合构成。五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡区、安宁市之间形成了联系最紧密的“核心圈层”，经济要素流动频繁，交通基础设施完善，是滇中城市群一体化的先导区域。
- (3) 分布极不均衡。前 10%的城市对贡献了总联系强度的大部分份额，排名后 50%的城市对几乎可忽略不计。边缘县区难以分享核心城市的发展红利，核心城市的产业升级和功能疏解缺乏有效承接地。

3.5. 城市联系强度的分级分析

将城市对引力值划分为五个等级：

- (1) 强联系，图 5(b)。集中于昆明市辖区内部及与安宁市之间。这些城市对综合发展质量高、空间距离短、交通完善、人口流动频繁，构成区域一体化程度最高的核心圈层。
- (2) 较强联系，图 5(c)。主要由昆明市辖区与曲靖麒麟区、玉溪红塔区、楚雄市、蒙自市等次级中心城市，以及与嵩明县、富民县、宜良县等周边县之间构成。但昆明与次级中心城市间的引力值远低于市辖区内部，辐射强度有限。

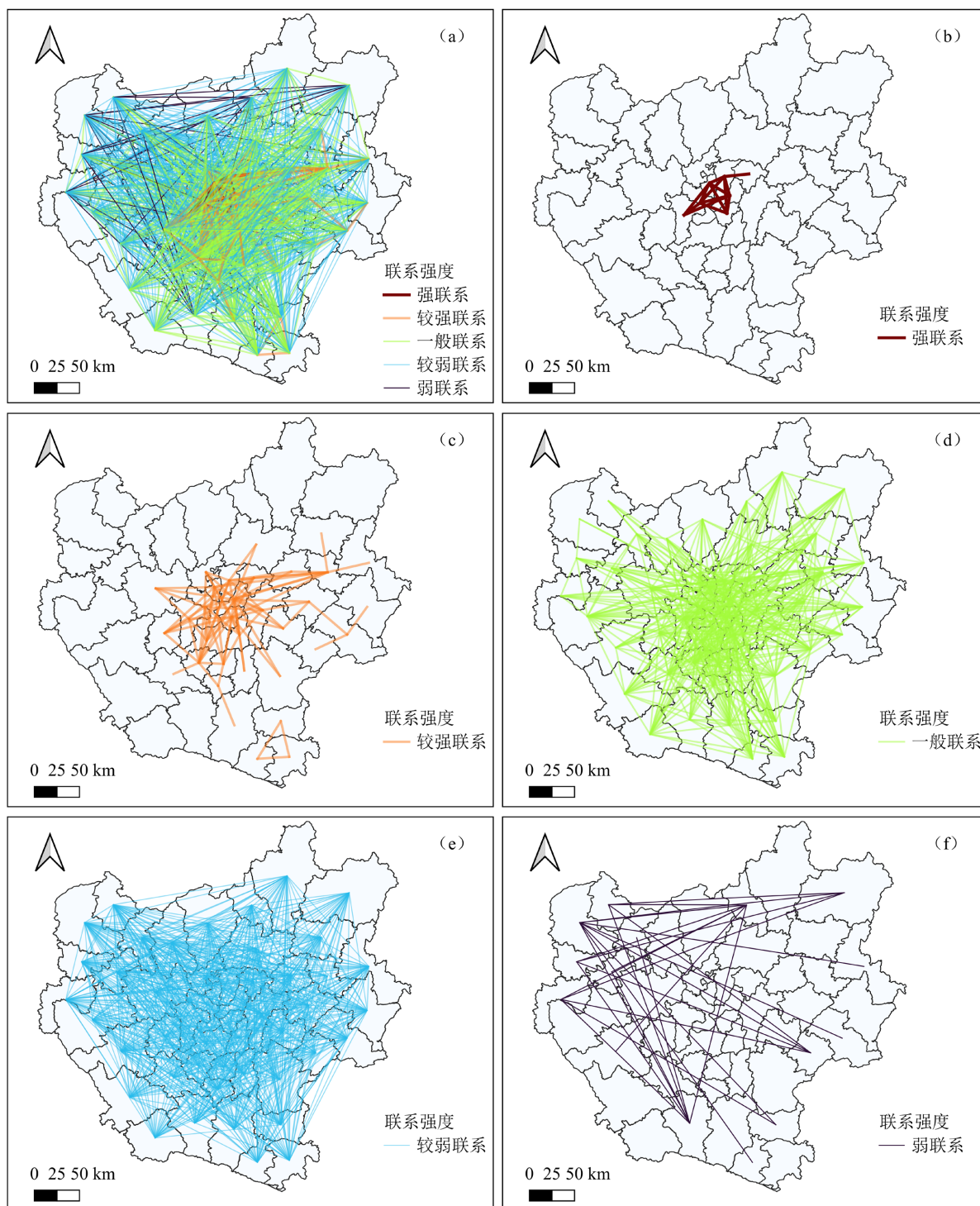


Figure 5. Visualization of the urban connection intensity in the Central Yunnan Urban Agglomeration

图 5. 滇中城市群城市联系强度可视化

(3) 一般联系, 图 5(d)。主要由昆明市辖区与距离较远的县级行政区之间以及次级中心城市之间构成。次级中心城市之间引力值整体偏低, 彼此缺乏深度的经济协作和功能分工。

(4) 较弱联系与弱联系, 图 5(e)、图 5(f)。涵盖滇中城市群中绝大多数城市对, 特别是涉及偏远县级

行政区的城市对。以武定县、禄劝县、元谋县等北部县区为典型——地处山区、交通不便，自身发展质量不高，人口外流严重，在引力模型中表现不佳。

综合而言，滇中城市群联系强度呈现“一核极强、多核偏弱、边缘破碎”的空间格局。昆明市辖区内部形成高度一体化的核心圈层，昆明与次级中心城市之间存在一定但有限的联系，大部分县级行政区之间联系强度普遍较弱。这一格局验证了修正引力模型的科学性和合理性，同时揭示了区域发展不均衡和交通基础设施不足的核心问题。未来应加强交通互联互通，激发县级单元内生活力，推动从“单中心极化”向“网络化协同”转型。

4. 讨论

4.1. 人口流动因素对城市联系强度测度的修正效应

传统引力模型通常以人口规模或经济总量作为城市“质量”指标[3][8]，能够较好反映城市发展水平，但难以刻画人口流动等动态要素对城市联系的影响。随着人口流动成为区域发展过程中最活跃的要素之一，越来越多研究开始关注人口流动对城市空间结构和区域联系的塑造作用[6][11]。

本研究引入人口流动系数对传统引力模型进行修正，结果表明部分城市的引力排名发生明显变化。其中，嵩明县因人口持续净流入而排名显著提升，而宣威市、富源县、会泽县等人口净流出地区排名下降。这说明人口流动不仅反映城市发展结果，也能够反映城市对资源要素的吸引能力。与仅使用经济规模或人口规模相比，引入人口流动因素后，城市联系强度测度结果能够更加真实地反映城市发展活力和区域吸引力。

近年来，基于人口大数据的城市联系研究逐渐成为重要方向。刘文超等[11]利用人口大数据分析发现，人口流动网络能够有效揭示城市间实际联系特征。本文的研究结果进一步说明，在县域尺度城市联系研究中，将人口流动因素纳入引力模型具有一定合理性，有助于提升模型对现实空间联系的解释能力。

4.2. 滇中城市群城市联系空间格局及其形成机制

研究结果表明，滇中城市群城市联系强度呈现明显的“核心-边缘”(core-periphery)格局，高强度联系集中于昆明市辖区及周边，外围县域联系薄弱。这一特征验证了弗里德曼“核心-边缘”理论[14]的基本预期——发展初期核心区通过极化效应持续积累优势，边缘区处于弱联系状态。然而，本文发现也对经典理论提出修正：弗里德曼预设核心区发展到一定阶段后将通过扩散效应带动边缘区增长，但滇中城市群即便昆明已进入较高发展阶段，其对边缘县域的扩散效应仍十分有限。究其原因，经典理论诞生于工业化时代，扩散机制主要依赖制造业的产业链梯度转移；而昆明核心区的主导产业已转向现代服务业和数字经济，产业链短、空间集聚需求强，难以沿交通轴线向外梯度转移，这揭示了后工业化时代核心-边缘关系的新形态。

从卡斯特尔“流空间”理论[15]视角看，滇中城市群联系网络仍以“地点空间”逻辑为主导——联系高度依赖地理邻近性和行政层级，尚未形成基于功能分化的流空间网络。次级中心城市的“质量”和“流量”均不足以在流空间中形成独立的节点价值，其网络角色更多是“核心区要素的延伸”而非“功能互补的伙伴”，这揭示了流空间理论在欠发达区域的适用边界：功能专业化是流空间成型的前提条件。

联系格局的形成受三重因素驱动：昆明凭借行政资源和高端服务业集聚形成绝对优势；交通网络呈辐射状布局，缺乏次级城市间的横向通道；次级中心城市产业特色趋同(如楚雄、红塔区均侧重生物医药和烟草)，相互配套需求弱，难以形成互补性分工。三者叠加，导致“核心极化、多核不显、边缘破碎”的空间格局。

4.3. 研究结果与既有研究的比较分析

已有研究广泛采用引力模型测度城市群空间联系,并取得了较为丰富的成果[2][7][10]。刘建朝等[2]在京津冀城市群研究中发现,区域联系强度呈现明显的等级分异特征;刘建华和李伟[7]在中原城市群创新联系研究中指出,核心城市对区域创新网络具有显著带动作用;陈祥兵和王保杰[10]研究表明,中原城市群物流联系同样表现出中心集聚特征。

与上述研究相比,本文所得结论具有一定共性,即核心城市往往在城市联系网络中占据主导地位,区域联系强度普遍呈现非均衡分布特征。但与京津冀、长三角等成熟城市群相比,滇中城市群城市联系强度整体偏弱,联系网络层级较少,网络化发展程度相对有限。

同时,本研究采用县域尺度作为分析单元,相较于传统地级市尺度研究能够更加细致地揭示城市群内部空间差异。例如,呈贡区、安宁市等昆明都市圈核心节点在县域尺度下表现出较强的联系优势,而部分外围县域则表现出明显边缘化特征。这表明县域尺度研究能够更准确地反映城市群内部空间组织结构及其发展差异。

4.4. 研究局限与展望

尽管本文对传统引力模型进行了修正,但仍存在一定局限性。首先,研究采用单一年份数据进行分析,未能揭示滇中城市群城市联系的动态演变过程。未来可利用多期面板数据开展时序分析,进一步探讨城市联系格局的演变特征。其次,人口流动系数采用常住人口与户籍人口差额进行表征,能够反映人口集聚趋势,但无法刻画人口流动方向和流动频率。随着人口大数据和移动信令数据的广泛应用,未来可利用更精细的数据刻画城市间真实的人口流动联系[11]。

最后,引力模型本质上仍属于基于属性数据推导空间联系的方法[5]。未来可结合人口流、交通流等实际流动数据以及社会网络分析方法,从多维视角揭示滇中城市群城市联系网络结构及其形成机制,为区域协调发展研究提供更加丰富的理论和方法支撑。

5. 结论

本文以滇中城市群 49 个县级行政区为对象,构建三维发展质量评价体系,运用熵权-TOPSIS 法测算综合质量,基于网络分析提取公路与铁路最短距离并以反计价权加权得到综合距离,引入人口流动系数修正引力模型,系统测度城市联系强度。结果表明:综合发展质量呈显著“核心-边缘”分异,昆明市辖区远高于其他县区,与行政资源集中和公共服务能级落差密切相关;引入人口流动系数后,呈贡区因人口净流入引力排名上升,宣威市、会泽县等净流出城市排名下降,表明昆明对周边要素吸引力大于产业带动力,次级中心城市产业链条偏短、配套能力有限,难以形成有效替代;联系强度呈“一核极强、多核偏弱、边缘破碎”格局,强联系集中于昆明市辖区及周边,边缘县域受制于初级产业结构、高物流成本和公共服务落差,陷入“低水平-要素外流-更低水平”的收缩循环。滇中城市群尚处于“单中心极化”向“网络化协同”演进的早期阶段,交通基础设施不足和产业分工体系不健全是关键短板,本研究为滇中城市群及西南类似区域的协同发展提供了数据支撑与决策参考。

参考文献

- [1] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130-1144.
- [2] 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.
- [3] Zipf, G.K. (1946) The P 1 P 2 D Hypothesis: On the Intercity Movement of Persons. *American Sociological Review*, 11, 677-686. <https://doi.org/10.2307/2087063>

-
- [4] Taaffe, E.J. (1996) *Geography of Transportation*. Prentice Hall.
 - [5] Liu, X. and Derudder, B. (2013) Analyzing Urban Networks through the Lens of Corporate Networks: A Critical Review. *Cities*, **31**, 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.07.009>
 - [6] 段成荣, 杨舸. 中国流动人口状况[C]//联合国亚太经社会, 国家人口计生委, 中国人民大学人口与发展研究中心. 中国社会服务政策与家庭福利国际研讨会论文集. 2008: 119-137.
 - [7] 刘建华, 李伟. 基于修正引力模型的中原城市群创新空间联系研究[J]. *地域研究与开发*, 2019, 38(5): 63-68+90.
 - [8] 王江波, 胡晓晗, 苟爱萍. 基于引力模型的城市空间研究综述[J]. *四川建筑*, 2016, 36(1): 25-28.
 - [9] 张凡, 杨传开, 宁越敏, 等. 基于航空客流的中国城市对外联系网络结构与演化[J]. *世界地理研究*, 2016, 25(3): 1-11.
 - [10] 陈祥兵, 王保杰. 基于引力模型的中原城市群物流网络结构研究[J]. *时代经贸*, 2025, 22(5): 27-31.
 - [11] 刘文超, 杨琦, 郭文华, 等. 基于人口大数据的中国城市联系网络特征及演变规律研究[J]. *自然资源信息化*, 2026(2): 97-104.
 - [12] 钟丹. 基于城市引力模型的滇中城市群城市发展空间格局研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
 - [13] 马海涛, 徐植飏, 胡夏青. 国内外城市群创新网络研究进展综述[J]. *人文地理*, 2024, 39(6): 51-58.
 - [14] Friedmann, J. (1966) *Regional Development Policy: A Case Study of Venezuela*. M.I.T. Press.
 - [15] Castells, M. (1996) *The Rise of the Network Society (The Information Age: Economy, Society and Culture, Vol. 1)*. Blackwell Publishers.