

铁路功效运输联系空间差异化及区域整合效应

李涛^{1,2}, 彭天浩¹, 王姣娥^{2,3}, 黄洁²

(1. 陕西师范大学西北国土资源研究中心, 西安 710119; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 由于速度、票价、合理运距等技术经济特征的差异, 高速铁路和普通铁路可以反映不同功效层级的空间运输联系, 并对国土空间结构重塑产生影响。本文基于铁路列车时刻表数据, 采用客流联系强度模型, 研究了基于高铁与普铁服务的差异化空间级联系统秩序, 比较了两者的功效空间的区域整合效应。研究结论为: 相较普铁而言, 高铁的空间布局与全国经济社会发展梯度格局更一致, 距离衰减效应更显著, 在 600 km 范围内最具优势; 高铁与普铁优势城市分别集中在长江以南和以北, 考虑旅客运输需求后显示普铁服务更为均衡。进一步分析发现, 在技术经济优势、高铁与普铁竞争以及网络布局影响下, 高铁功效空间区域整合呈现出显著的两极分化态势, 以邻近区域集聚形态为主, 普铁则形成了宏观尺度的南北向和东西向跨区域廊道集聚形态, 二者对功效空间区域整合亦分别呈现出多中心等级化与多板块均衡化组织模式。

关键词: 铁路; 技术经济特征; 空间级联系统; 功效空间; 区域整合

DOI: 10.11821/dlxb202304011

1 引言

铁路建设改变要素流动的时空关系及其配置效率, 并进而影响经济社会发展与引导国土空间重塑。近年来, 中国铁路网络快速发展, 在路网规模及质量、技术标准与客货运量等方面均步入世界前列。2021年3月国务院下发《关于进一步做好铁路规划建设工作的意见》, 要求严格控制既有高铁的平行线路建设, 铁路设计时速与客流密度密切挂钩, 注重高速铁路(简称“高铁”)与普通速度铁路(简称“普铁”)协调发展。随着中国铁路网络布局的不断完善, 铁路新建速度开始放缓, 中国高铁骨架网络已基本形成。2020年全国铁路和高铁投产新线较2019年分别同比下降41.89%和47.02%。按照国铁集团计划, 2022年铁路新开通里程继续下降, 预计投产新线3300 km, 其中普速铁路约1900 km^①。由于速度、票价、合理运距等技术经济特征和网络布局等差异, 高铁和普铁承载了差异化的空间运输联系, 本质上反映了社会经济联系的层级性及塑造的区域空间结构等级特征。在中国高铁基本成网、强调高铁与普铁平衡发展背景下, 适时开展高铁和普铁功效空间级联系统差异化及其区域整合效应研究具有重要意义。

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-10-27

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(20&ZD099); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(42225106); 中央高校基本科研业务费项目(GK202103124) [Foundation: Major Program of National Social Science Foundation of China, No.20&ZD099; National Science Fund for Distinguished Young Scholars, No.42225106; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, SNNU, No.GK202103124]

作者简介: 李涛(1985-), 男, 山西长治人, 博士, 教授, 主要从事交通运输地理研究。E-mail: taoli-2008@163.com

通讯作者: 王姣娥(1981-), 女, 湖南涟源人, 博士, 研究员, 主要从事交通地理与区域发展研究。

E-mail: wangje@igsnnr.ac.cn

① 数据来源: <https://finance.sina.cn/tech/2022-01-04/detail-ikyamrmz3124282.d.html?fromtech=1>。

交通建设与运输组织重塑区域空间结构一直是经济地理学的经典命题^[1-2]。聚焦于铁路, 相关研究包括: ① 基于可达性的铁路空间效应评估。从效率与公平角度评估了跨国、国家和区域尺度上铁路修建所带来的时空压缩效应与可达性格局变化, 并以此揭示铁路塑造空间结构的规律^[3-6]。② 铁路发展对区域发展的影响。以出行时间、可达性等时空压缩效应指标为解释变量, 探讨铁路发展对区域经济的影响, 并通过经济增长在空间上的极化与扩散揭示铁路整合与重塑区域空间格局特征^[7-8]。③ 基于铁路交通流的城市网络结构。“流空间”背景下, 相较于可达性静态指标, 反映经济社会功能联系的交通流更能准确揭示区域空间结构特征^[9-10]。国内外学者基于中心流动理论与网络分析方法开始对铁路交通流支撑下城市网络结构^[11-14]、铁路与其他交通方式支撑下的城市网络结构异同^[15-17]、铁路网络与经济社会空间组织的耦合^[4, 18]等议题展开研究, 并呈方兴未艾之势。上述研究从多维视角深化了铁路网络演化及其对区域空间结构重塑效应的规律性认识, 但整体仍侧重于基于可达性的静态分析, 缺少基于“流空间”视角下区域整合效应的分析。高铁与普铁以其各自的技术经济优势承担了差异化运输需求, 反映了差异化区域空间结构特征^[19-20]。然而, 现有研究多基于高铁和航空的比较视角展开, 缺乏高铁与普铁的直接比较并将其延伸到对经济社会空间组织整合效应的研究, 可能导致已有结果的片面性。

鉴于此, 在高铁网络架构基本形成, 追求高铁与普铁平衡与协调发展背景下, 本文以地级行政区为基本单元, 开展高铁与普铁空间运输联系比较并评估其对经济社会空间组织的整合效应, 为优化铁路网布局、通过铁路网嵌入国家空间治理进而促进区域协调发展提供决策参考。

2 理论基础与研究方法

2.1 交通运输与区域空间结构耦合理论

理解基于铁路的功效运输联系及其区域整合效应差异化逻辑, 需从交通运输与区域空间结构耦合理论方面进行把握。交通运输与区域空间结构耦合主要指交通运输系统与入地关系地域系统的交互作用过程及其要素集散空间形态。从基础设施与空间福利视角出发, 金凤君认为功效空间是一种福利空间, 其实质是满足人类安全、健康和发展需求的地域空间^[21]。科学有序的功效空间组织是实现人类社会可持续发展的关键。交通运输通过可达性与运输联系(交通流)作用于要素空间集散进而影响功效空间结构(图1), 如交通经济带^[2]、交通走廊^[22]等。一方面, 交通技术进步、高速交通运营所产生的时空压缩效应, 通过促进要素流动、拓展空间相互作用范围与深度, 进而引起要素集散和可达性格局变化, 从而引导各尺度功效空间产生重塑^[23-24]。新经济地理学认为, 要素集散所引起的极化效应与扩散效应都存在, 主要与区域发展阶段以及经济结构相关^[25]。另一方面, 交通运输联系作为功效空间社会经济功能联系的直接体现, 通过各类交通流表征的

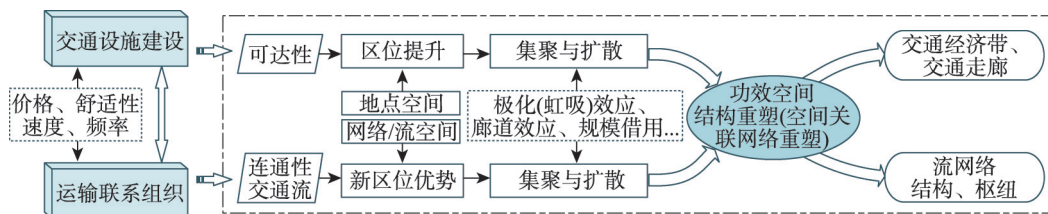


图1 理论框架

Fig. 1 Theoretical framework

要素流动直接作用于功效空间组织与结构的变化^[9]。特别是在“地点空间”向“流空间”转型背景下，高速交通运营所产生的连通性变化将重塑区位优势，引起基于交通流的空间关联网路重构，直接反映了各类资源、人口及产业等要素的重新分配格局与区域空间结构特征。对交通运输与功效空间结构的探讨，即是对城市在交通网络中位势与城际关联空间结构的关注^[19]。

不同交通方式基于各自技术经济优势承担了差异化空间交通流。与公路和航空运输相比，铁路更偏向于揭示宏观区域和城市群尺度的空间结构^[26-27]，铁路网拓展空间的实质即是对市场实现整合^[24]。依据《铁路技术管理规程》，普铁指 200 km/h 以下的客货共线铁路和仅运行普铁旅客列车的铁路，而高铁指速度 200 km/h 以上的客运专线和速度 160~200 km/h 仅开行动车组列车的铁路。高铁在设备配置、行车组织、信号显示以及基建等方面的要求远高于普铁，具有高建设成本、高票价以及发车频率高、客运密度高、舒适度高等技术经济与服务特征（表 1）。由于经济社会发展地域差异，不同地域空间和群体使用铁路所带来的单位时间价值也存在差异。因此，基于差异性的运输需求，高铁和普铁对功效空间结构的影响也具有差异性。与公路相比，铁路在中长途客运市场中具有优势；但与普铁比较，高铁则相对集中于中短途客运市场^[20, 26]，其中，高铁（G 字头）优先满足廊道内核心城市之间联系，并给沿线城市带来显著的时空压缩与廊道效应，重构新区位，通过极化（虹吸、过滤）效应促进了人口、资源、产业等要素向核心城市的集聚，产生明显的效率导向或非均衡效应^[27]。而在中心城市集聚不经济的背景下，高铁亦通过扩散效应作用于外围城市，进而提升了发展均衡性^[18]。另一方面，“流空间”背景下，高铁（D、C 字头）承担城市群中小城市出行服务需求^[9]，其“速度快、频率高、站点多”的运营服务特征与城市群内部高频城际出行需求结合，产生网络邻近效应与“规模借用”效应，带来功效空间结构多中心化与城市区域一体化发展^[28-29]。因此，高铁对功效空间组织的影响以“廊道+区域（城市群）”呈现，以极化效率导向为主还是均衡导向为主则主要与所在区域发展阶段、地理尺度等因素相关^[25]。与此对应，普铁在高铁的竞争下主要集中于中长途市场，更多地承担中长途距离和欠发达地区的城际运输联系^[20, 26]，站点设置差异小且停站较多，主要对跨区域廊道（通道）区域空间结构产生影响。

表 1 高铁与普铁技术经济指标与服务特征比较

Tab. 1 Comparison of techno-economic indicators and service characteristics between high-speed rail and conventional rail

类型	技术标准	建设成本	速度(km/h)	基准票价(元/人 km)	单位时间价值(元/h)
高铁	动车、高铁	350 km/h:	新建: ≥ 250;	350 km/h: 0.42~0.48	低收入群体: 9.09
		9400 万~1.83 亿元/km	既有线改造: ≥	250 km/h: 0.29~0.31	中低收入群体: 18.09
		250 km/h:	200; 200 以下动		中等收入群体: 27.18
		7000 万~1.69 亿元/km	车组		中高收入群体: 36.27
普铁	国铁 I-IV 级	约为高铁的 30%~70%	≤ 200	0.11	高收入群体: 90.63
类型	列车频次	客运量(亿人)及其占比(%)	周转量(亿人 km)及其占比(%)	客运密度(万人 km/km)	覆盖范围
高铁	17.36	15.57 (70.7)	4844.9 (58.6)	2038.6	连接主要城市群，基本连接省会城市和其他 50 万人口以上大中城市
普铁	7.51	6.46 (29.3)	3421.3 (41.4)	642.6	连接 20 万人口以上城市，基本覆盖县级以上行政区

注：根据参考文献[30-31]整理；客货运量数据为 2020 年。

2.2 数据来源

研究数据包括铁路和社会经济统计数据两大类。铁路数据来源于中国铁路客户服务中心 (<https://www.12306.cn/index/>), 采集时间为2019年12月, 暂未含港澳台地区。具体包括各趟列车起讫站点、起讫时间、票价等信息。定义高铁为包含G/D/C字头的线路, 其余为普铁。在此基础上, 考虑到本文主要关注空间级联系统中的城际运输联系, 按照Space P模式构建高铁和普铁运营组织网络, 即以车站所在城市为节点, 任意两个城市之间只要有直达列车通过并停靠即构成一条边。本文对拥有多个站点的城市进行数据合并, 最终获得289个普铁站点城市、213个高铁站点城市和199个高铁—普铁城市, 分别占中国地级及以上行政单元总数的85.77%、63.2%和59.05%。高铁和普铁网络分别有6006组和12204组城际联系对, 4094组城市对同时存在于两类网络中(表2)。人口与GDP数据来源于《中国城市统计年鉴》(2020年)。

表2 2019年中国高铁与普铁网络规模统计

Tab. 2 Statistics on the size of high-speed rail and conventional rail networks in China in 2019

类型	城市数(个)	边数(对)	日发车数(趟/d)	总联系强度	平均联系强度	最大值	最小值	CV
高铁	213	6006	6171	73512	6.57	256	0.64	2.06
普铁	289	12204	2312	64341	2.77	61	0.64	1.66

2.3 研究方法

2.3.1 客流联系强度模型 由于铁路部门对同一列车或不同列车在沿途站点分配车票数量的差异, 仅采用频次数据揭示运输联系差异化特征具有一定的片面性。因此本文以每趟列车沿途经过的城市类型作为权重对基于时刻表获得的原始频次数据进行转换得到客流联系强度, 公式如下^[19]:

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^n (o_k \times f_{k,ij}) \quad (1)$$

$$T_{ij} = t_{ij} + t_{ji} \quad (2)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad (3)$$

式中: t_{ij} 为城市*i*到*j*的联系强度; T_{ij} 为城市*i*和*j*的铁路客运联系强度; T_i 为城市*i*的铁路客运服务能力; $f_{k,ij}$ 是第*k*趟列车的计数系数, 每趟列车设为1; o_k 为经停系数, 若*i*和*j*分别为该趟列车的始发和到达城市, 或均为省会城市, 则 o_k 值为1; 若*i*和*j*中仅有一个为起点、终点或省会, 则 o_k 值为0.8; 剩余情况 o_k 值为0.64 (即0.8²)。需要指出的是, 由于铁路售票会根据实际客流进行智能分配, 涉及因素包括长途优先、管内外差异等, 在全国尺度上很难统一考虑, 因而本文的客流联系强度模型重点考虑了经停城市类型差异这一关键因素。

2.3.2 服务能力区位熵 为揭示城市铁路服务资源与人口分布之间的集聚与匹配程度, 参考区位熵概念, 选用列车服务能力区位熵(TI_i)予以表征, 公式如下^[33]:

$$TI_i = \frac{T_i/T}{P_i/P} \quad (4)$$

式中: T_i 含义同上; T 为所有城市铁路客运服务能力总和; P_i 和 P 分别为城市*i*的常住人口和全国总人口。 $TI_i > 1$, 表示城市*i*的铁路服务占全国比重高于其人口比重, 为铁路服务突出型; $TI_i < 1$, 则为铁路服务滞后型; $TI_i = 1$, 则为铁路服务均衡型。

2.3.3 城市位势指数 为解释网络中各城市相对优势水平的高低, 采用节点中心性系数(DIT_i)指标表征城市在网络中的位势, 计算公式为^[17]:

$$DIT_i = \frac{T_i}{\sum_{j=1}^n T_j/J}$$

(5)

式中： T_i 含义同上； n 为网络中城市总数； DIT_i 值越大，表明城市*i*的相对优势越大，若该值大于1，则表明城市*i*的位势高于平均水平。

2.3.4 重叠率指数 为比较高铁与普铁在重叠城市对中的优势度，选取重叠率指数（ OR_{ij} ），公式如下^[20]：

$$OR_{ij} = \frac{t_{ij}^{HST}}{t_{ij}^{HST} + t_{ij}^{CT}}$$

(6)

式中： t_{ij}^{HST} 为高铁客流联系强度； t_{ij}^{CT} 为普铁客流联系强度；当 $0 < OR_{ij} < 0.5$ 时，为普铁主导；当 $OR_{ij} = 0.5$ 时，为均衡型；当 $0.5 < OR_{ij} < 1$ 时，为高铁主导型。

2.3.5 社团划分模型 本文基于客运联系强度构建了高铁和普铁有向运营加权网络，因此选取Rosvall等提出的基于流数据的infomap算法进行社团划分^[34]，该方法已经在交通网络^[35]、城际出行网络社团结构^[36]识别中得到了很好应用。具体公式不再赘述。

3 高铁与普铁的功效空间级联系统结构

3.1 空间布局与服务能力

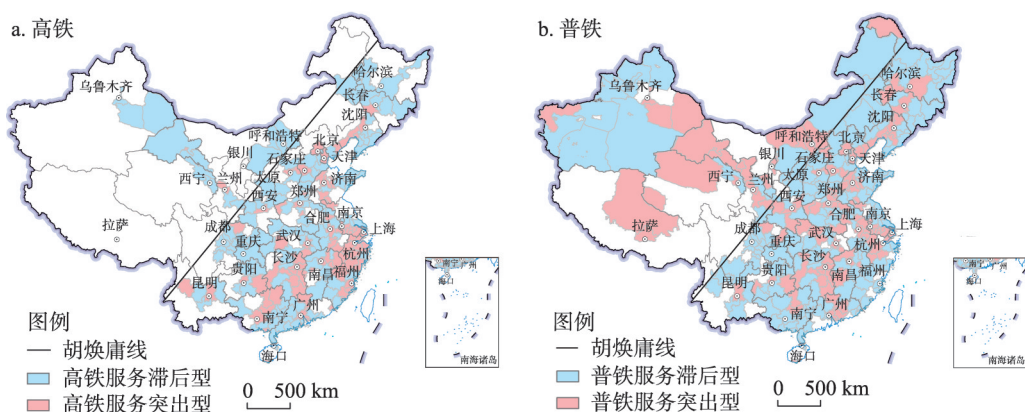
3.1.1 高铁布局与经济社会发展格局耦合性更好,普铁服务更具均衡性 高铁与普铁网络布局特征具有显著地域差异。高铁网络覆盖城市数量由中东部向西逐渐递减，普铁网络则由中部向东西部地区递减（表3）。在高铁网络中，东中西地带城市数量占总量的比重分别为37.09%、38.03%和24.88%，东中部所占比重基本一致；普铁网络中，中部所占比重为39.10%，东西部地区所占比重一致，为30.45%。从服务能力来看，东中西部差距更为明显，且高铁资源的集聚程度更高，超过一半的高铁服务能力（51.97%）集聚在东部，普铁则以中东部地区占比最高，占比分别为41.20%和39.08%。可见，高铁网络布局与全国区域经济社会发展梯度格局的耦合性更好，分别反映了高铁的效率与普铁的普惠导向。

服务能力区位熵反映了各城市铁路服务的集聚程度或铁路资源配置公平性。铁路服务能力与人口规模匹配计算结果如图2所示。两类网络的共同点在于：突出型城市多为省会城市、直辖市，并在重要铁路干线沿途形成优势城市密集地区，如长三角、武广线、西南黔贵地区，普铁的京哈沿线、陇海兰新沿线等。不同之处在于：高铁服务资源高度集聚在“胡焕庸线”以东地区，东侧有83个城市为高铁服务突出型，以西仅有兰州和嘉峪关两地，呈现出显著的效率导向；与高铁不同，考虑人口布局即旅客运输需求因

表 3 2019 年中国高铁与普铁网络空间分布
Tab. 3 Spatial distribution of high-speed rail and conventional rail networks in China in 2019

地区	高铁网络				普铁网络			
	城市数量(个)	占比(%)	客运服务能力	占比(%)	城市数量(个)	占比(%)	客运服务能力	占比(%)
东部	79	37.09	76405	51.97	88	30.45	50291	39.08
中部	81	38.03	48981	33.31	113	39.10	53015	41.20
西部	53	24.88	21638	14.72	88	30.45	25377	19.72
全国	213	100.00	147024	100.00	289	100.00	128683	100.00

注：东中西三大地带的划分参考文献[16]。



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号标准地图制作,底图边界无修改,下文同。

图2 2019年“胡焕庸线”两侧高铁与普铁服务能力区位熵空间分布

Fig. 2 Spatial pattern of T_i for high-speed rail and conventional rail on both sides of the Hu Line in 2019

素后,普铁服务能力配置均衡性大幅提高,在“胡焕庸线”东西两侧具有分布,东西两侧分别有96个和24个突出型城市,分别占东西城市总数的38.55%和60%。

3.1.2 高铁客运的距离衰减速率更快,600 km内具有显著运输优势 借助距离分布规律揭示基于高铁与普铁的功效益空间级联系系统距离衰减效应(图3)。相较于普铁营造的普惠导向,高铁营造的效率导向在距离上更为集中。高铁和普铁的平均运输距离分别为733 km和938 km;在600 km范围内,高铁联系强度比重高于普铁,累计率达到74.45%,600 km以上则以普铁最高,且随着距离增加二者差距逐渐拉大。高铁的距离衰减速率更为显著,80%的高铁联系强度集中在800 km范围内,在200 km范围内快速增加并达到峰值(27.84%),此后快速下降;普铁80%的联系强度集中在1200 km以内,在400 km范围内快速增加至峰值(20.66%)后稳步降低。结合图3b可知,在现有高铁与普铁的竞争下,二者大致存在3个作用区间,600 km以内高铁具有绝对优势,700~1100 km之间是现有运输网络布局下高铁和普铁互补服务的距离,1100 km以上则是普铁绝对优势距离。

3.2 城市空间层级

3.2.1 等级结构:金字塔型与扁平化纺锤型 高铁城市和普铁城市平均直接关联城市数量分别为105个和160个,这与普铁网络覆盖范围广具有直接关系。就城市位势分布来看,高铁和普铁城市位势等级结构分别呈“金字塔”型和“纺锤”型分布结构(图4)。高铁网络前四等级城市位势高于平均水平,以占高铁城市总数30.99%的城市占据约70.16%的高铁资源;普铁网络不存在第一等级城市,第二到第四等级共计109个城市,以占普铁城市总数37.72%的城市占据约78.24%的普铁资源。具体来看,高铁网络共有上海和南京2个一级城市,均位于长三角地区;6个二级城市,除杭州外,包括广州、长沙、郑州、武汉和北京等京广高铁沿线核心城市;三级城市19个,包括合肥、苏州、常州、无锡等长三角城市以及沈阳、济南、石家庄、南昌、福州、成都、贵阳、西安、重庆和天津等省会和直辖市,集中分布在“四纵四横”客运通道沿线。四级城市39个,除长春、南宁、昆明和兰州等省会外,其余城市均为客运通道和区域城际铁路上的中小城市,如衡阳、怀化、郴州等。普铁二级城市共计9个,均为传统普铁通道枢纽,包括北京、上海、郑州、武汉、南京、沈阳、石家庄、天津、西安。三级城市28个,包括广州、长沙、济南、哈尔滨等省会,以及蚌埠、保定、衡阳、株洲等枢纽。四级城市72个,以中部最多。高铁和普铁网络中分别有147个和180个五级城市,占各自城市总数的69.01%和62.28%。

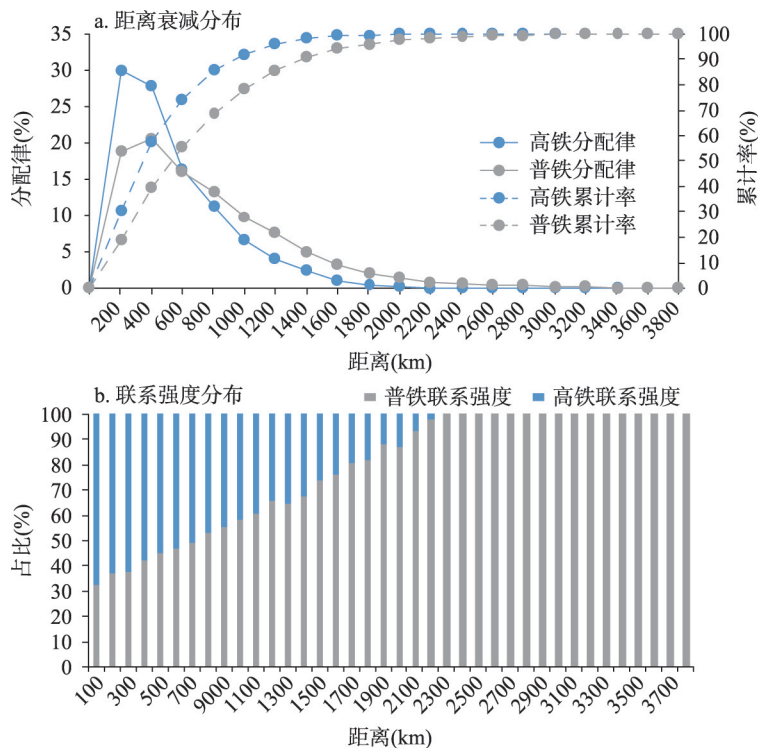


图3 高铁与普铁运输联系强度的距离分布规律

Fig. 3 Distance distribution of link strength in high-speed rail and conventional rail networks

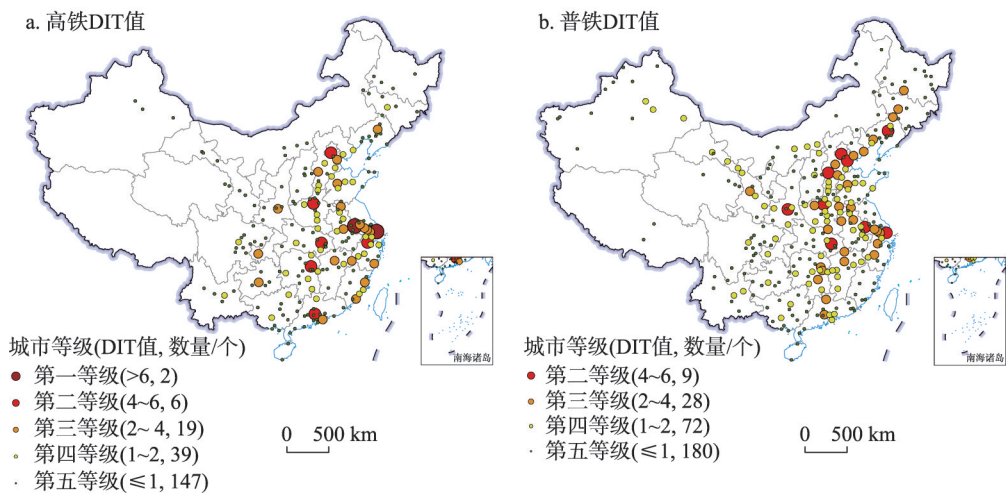


图4 基于高铁与普铁运输网络的城市等级结构比较

Fig. 4 Comparison on the city hierarchical structure of high-speed rail and conventional rail networks

3.2.2 优势城市:长江以南与长江以北 为比较同一城市在高铁和普铁网络中的位势差异,以城市位势系数差值为纵坐标,人均GDP、市辖区人口规模为横坐标形成散点图,并基于三西格马定律(Three-sigma Rule)^[32],设定城市位势系数差值平均值 ± 1 个标准差作为上限和下限,高于上限值的为普铁优势城市,低于下限值则为高铁优势城市(图5a)。高铁优势城市共21个,既有上海(119)、广州(41)、南京(98)、杭州(51)、厦

门(117)等省会和副省级城市,也有潮州(16)、抚州(37)、荆州(74)等外围城市。普铁优势城市共33个,主要为京哈、京九、京广、宝成以及兰新等客货混跑铁路沿线枢纽城市,包括天津(138)、石家庄(127)、长春(188)、哈尔滨(45)、沈阳(125)、兰州(82)、蚌埠(6)、宝鸡(8)、衡阳(56)等。进一步,以人均GDP均值(市辖区人口规模均值)+1个标准差作为临界值,揭示高铁、普铁与经济社会耦合关系(图5a)。普铁优势城市集中于人均GDP和市辖区人口规模临界值左侧,进一步表明普铁网络普惠导向更为显著,除天津、沈阳、哈尔滨、长春等传统普铁枢纽城市外,其余29个普铁优势城市人口和经济水平均低于临界值。高铁优势城市在临界值两侧均有分布,这与本文高铁包括动车组和城际列车直接相关。在空间布局上,高铁优势城市集中分布于东南沿海、中南和华南地区,普铁优势城市集中分布于中部、东北及西北内陆客货运输通道沿线(图5b)。高铁优势城市集中于长江以南也表明全国经济中心向东向南转移的趋势^[33]。

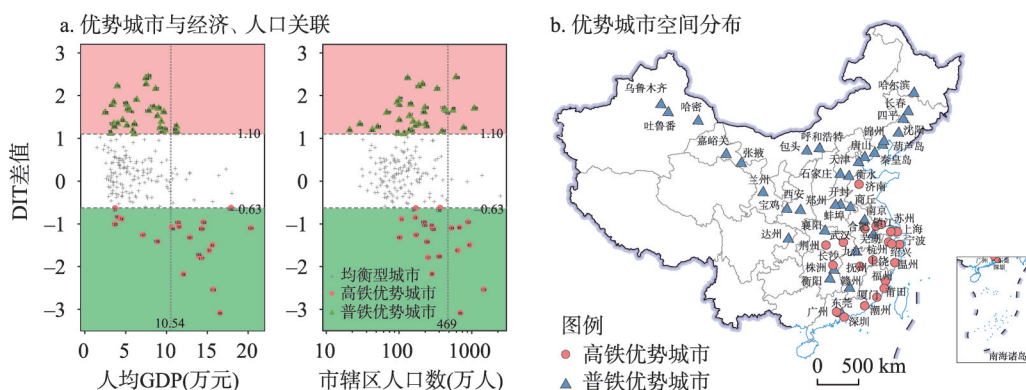


图5 铁路城市位势差值与社会经济发展关系

Fig. 5 Relationship between the difference of rail-city centrality and socio-economic development

3.3 运输联系空间层级

3.3.1 整体网络:“轴—辐”模式与廊道结构 高铁与普铁运输联系呈现出差异化组织模式(图6)。高铁网络在遵循“链式运输”廊道效应的同时,也体现出跨区域尺度的“轴—辐”组织模式,尤以东部沿海城市群最为明显;在保障基本出行机会和公共服务均等化驱动下,基于普铁的功效益空间呈现出大尺度廊道格局,更多揭示的是覆盖全国尺度的功效益空间级联系统结构特征,这与前述普铁直接关联城市数多于高铁是一致的。具体来看,高铁网络集中在“胡焕庸线”以东,覆盖全国3/4的城市,特别是第一、二等级联系均集中分布于中东部地区,在空间上形成了与“四纵四横”客运专线基本一致的格局。普铁网络覆盖全国4/5以上的城市,涉及城际联系对数量约比高铁多一半(50.79%)。经过长期的铁路建设,普铁网络围绕京广—京哈、陇海—兰新、京九、沪昆等铁路干线,基本形成了具有“普适”特征的全国大区域联系框架。

3.3.2 重叠网络^②:“钻石形”区域内出行与中长距离的跨区域出行 重叠网络沿“四纵四横”客运通道展开,涉及199个城市和7539条城际联系,平均运输距离为728 km(图7)。高铁在3164条(41.97%)客运联系中具有优势,平均距离为586 km,主要承担以京津冀、长三角、珠三角、成渝地区为顶点的“钻石形”区域内部城市群及其间的出行联系,特别是前两个等级的高铁优势线路集中在“钻石形”范围内的城市群内以及四大城市群之间,主要服务于京津冀、长三角、珠三角等城市群内部高频跨城出行以及城市群

^② 重叠网络由高铁和普铁同时运营的城市对组成。

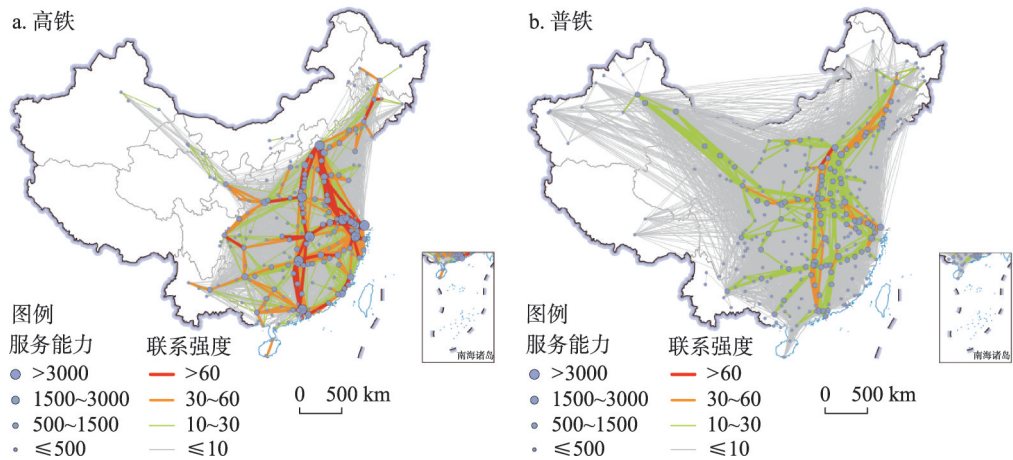


图 6 2019 年基于高铁与普铁的功效空间级联系统

Fig. 6 Spatial cascading system of high-speed rail and conventional rail networks in 2019

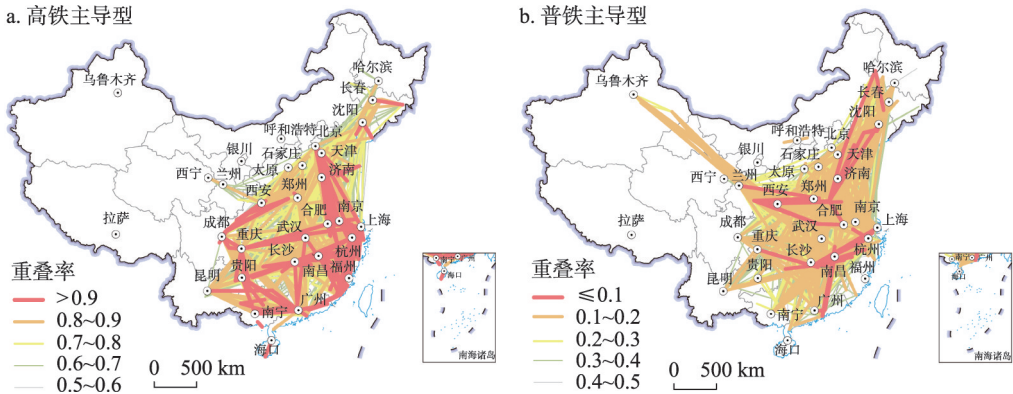


图 7 2019 年中国高铁与普铁叠合网络空间布局

Fig. 7 Spatial pattern of totally overlapped network by high-speed rail and conventional rail in 2019

间联系。普铁网络密度较低的东南客运密集走廊也是高铁优势线路集中地区。普铁在 2680 条 (35.55%) 客运联系中具有优势, 平均运距为 789 km, 在空间上主要集中在传统客运主通道, 包括两类, 一类是距离长, 高铁比较优势不突出的线路, 集中在西北兰新沿线。究其原因, 与两类方式的技术运营特征直接相关, 高铁夜间检修停运使得普铁的平均运距超过高铁。经济性考虑和普铁卧铺过夜增加出行舒适度等因素的存在, 使得普铁在远距离出行中具有一定的竞争优势。另一类是人流密度大的城市对, 沿线高铁与既有铁路通道 (京哈、京九、武广以及浙赣等) 并行, 高客运需求使得普铁仍具有相对优势。此外, 高铁和普铁在经济发达地区共存表明了由于二者差异化技术经济特征, 普铁仍具有较大的需求。

4 功效空间组织的区域整合效应 : 高铁与普铁

铁路运营通过提升可达性和要素流通效率引导区域整合。基于社团内部联系紧密、社团间联系较弱的基本属性, 本文通过对高铁和普铁网络进行社团划分以揭示全国和区域层面高铁与普铁对功效空间组织的区域整合作用。

高铁和普铁基于各自的网络干线布局分别形成了14个和12个社团, 呈现出差异化的地理空间依赖性和空间形态(图8)。相较于普铁, 高铁距离衰减效应更为显著, 因而其社团划分结果呈现出显著的邻近区域集聚特征, 特别是在长江以南地区, 形成以广州为核心, 覆盖广东北部和西部、湖南大部、广西、贵州和云南的华南社团; 以杭州、福州、南昌为核心, 覆盖浙江、福建和江西的东南社团; 以重庆为核心, 覆盖成渝以及湖北西南部的西南社团。长江以北区域形成了4个显著的跨区域廊道社团, 包括京沪高铁沿线组成的京沪社团、京广高铁(石家庄—武汉段)组成的石武社团; 以京哈高铁沿线组成的东北社团以及西兰、兰新高铁沿线组成的西北社团等。在高铁的竞争下, 普铁客运市场集中在中长途, 所形成的社团均呈现出沿主要铁路干线的大尺度南北向和东西向跨区域廊道集聚特征, 如社团6主要由京九铁路沿线城市组成、社团1主要由京广线以及部分东西向沿江铁路(武汉—重庆段)、广昆铁路(广州—南宁段)沿线城市组成、还包括浙赣—湘黔沿线城市组成的社团3以及西北兰新通道沿线城市组成的社团5等。上述社团划分结果从整体上反映了高铁与普铁的区域整合的基本格局特征, 接下来本文进一步从全国和区域层面揭示基于运营组织的两类网络的区域整合模式。

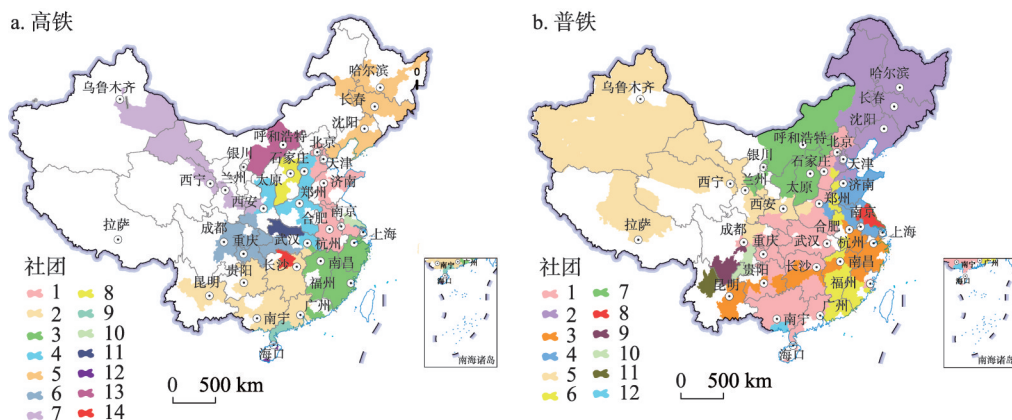


图8 中国高铁与普铁网络社团划分格局

Fig. 8 Spatial pattern of communities by high-speed rail and conventional rail networks in China

4.1 全国尺度

为揭示全国层面高铁与普铁区域整合模式, 本文将各社团作为节点, 将不同社团所属城市之间的联系统合为社团间联系, 并据此生成拓扑网络结构图(图9)。高铁功效空间区域整合呈现出显著的两极分化态势, 形成了以京沪(社团1)、华南(社团2)、东南(社团3)以及石武(社团4)等强高铁服务能力社团为核心的多中心等级化组织模式, 四大核心社团间亦具有高强度的高铁联系。成渝(社团6)、东北(社团5)和西北(社团7)三大区域性社团高铁服务能力并不突出, 远低于四大核心组团, 与剩余分散社团共同成形成第二梯队。同时, 第二梯队也主要与四大核心社团进行联系。需要指出的是, 成渝社团并未出现在高铁功效空间体系的核心社团系列, 且与四大核心社团联系不强, 这在一定程度上表明了基于服务能力的高铁功效空间组织与“钻石型”国土空间以及“四极六轴”国家立体综合交通网布局并不完全一致, 仍需重点完善^[37]。与高铁相比, 普铁功效空间区域整合呈现出了多板块均衡化组织模式, 除一些零散社团外, 主要板块按铁路服务能力从高到底依次为京广(社团1)、京沪南段(社团4)、沪昆(社团3)、京九(社团6)、东北(社团2)和西北(社团5), 社团服务能力以及社团间的联系强度都较为均衡, 这明晰了前述全国层面上基于普铁的功效空间组织的普惠导向。

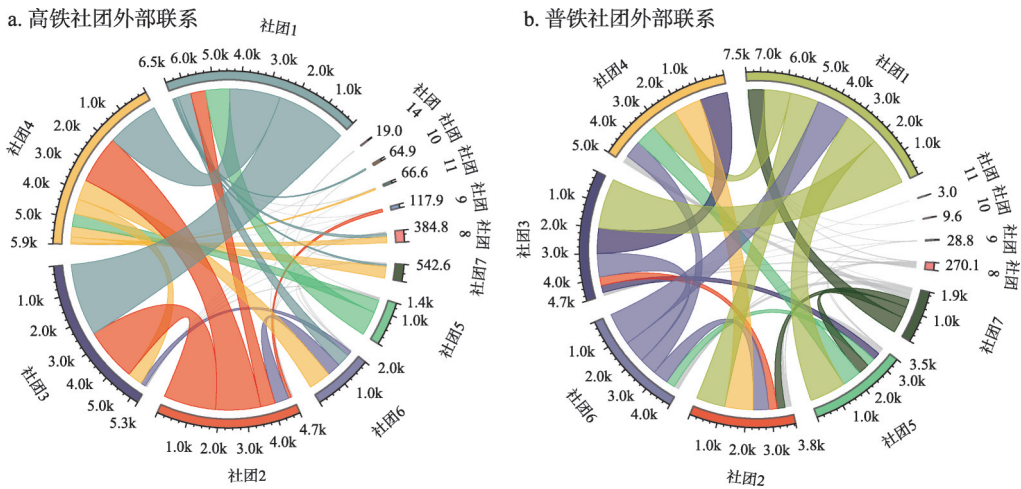


图9 基于高铁与普铁的功效空间级联系统网络拓扑结构

Fig. 9 Network topology of spatial cascading system by high-speed rail and conventional rail

中国西高东低、复杂多样的自然地理结构、自然资源分布的空间不均衡性、及此基础上形成的社会经济布局等从供需层面决定了中国铁路客货运输的基本格局。相较于普铁, 高铁集中在中东部城镇密集地区, 距离衰减效应显著, 再加上票价较高, 更多地成为以追求时间价值、舒适性与准时性为主要考量的群体出行选择^[26]。在空间上重点连通人口密度高、经济发达的城市群地区、省会城市和其他大中城市。与航空与公路相比, 高铁在 200~700 km 运输距离范围内具有优势^[27]。因此, 全国层面上, 基于高铁的运输联系主要揭示效率为导向的功效空间组织模式。与此对应的是, 普铁由于低票价、覆盖范围广, 成为以追求经济性为主要考虑群体的出行工具选择, 其空间范围呈现“普适性”特征。同时, 普铁可以夜间行驶、出售卧铺票等因素使得其在远距离出行方面具有可能性。与高铁相比, 基于普铁的客运联系更多反映的是以多板块均衡化导向的功效空间组织模式。

4.2 区域尺度

根据社团划分结果, 本文分别选取高铁网络的京沪社团和普铁网络的京广社团以揭示区域层面上两类网络的区域整合模式。上述两社团运营服务能力最强、铁路网络布局较为成熟, 是两类网络中发育较为成熟的社团。京沪社团主要基于京沪高铁、济青高铁以及社团内京津冀、山东半岛以及长三角区域城际铁路形成, 整体发育程度较高。京沪高铁、济青高铁将三大区域沿途北京、天津、济南、徐州、南京、上海等核心城市贯穿, 促进了沿途城市之间的交流与融合, 中心城市之间交流融合的不断增长也带来了沿线中小城市的发展, 从而为形成高铁“走廊型”区域整合奠定基础。另一方面, 高铁网络的进一步扩张与“公交化”方式运营的城际铁路承担了区域内部中小城市以及中小城市与核心城市之间的跨城出行, 进一步促进了城市群内部融合, 形成“区域化”整合模式。因此, 高铁的这种轴—辐运营模式支撑了三大区域的跨区融合发展, 形成了高铁“廊道+区域(城市群)”整合模式(图 10a、10b)。就普铁京广社团来说, 该社团主要以京广普铁为主通道构成了贯穿南北的跨区域社团。在高铁的竞争下, 普铁更加集中于中长途市场, 站点设置差异小且停站较多, 形成了大尺度跨区域廊道整合模式(图 10c、10d)。同时, 由于东西向沿江铁路(武汉—重庆段)、广昆铁路(广州—南宁段)、包海铁路(南宁—海口段)的存在形成的普铁网络化, 局部地区延伸出东西向“廊道”。

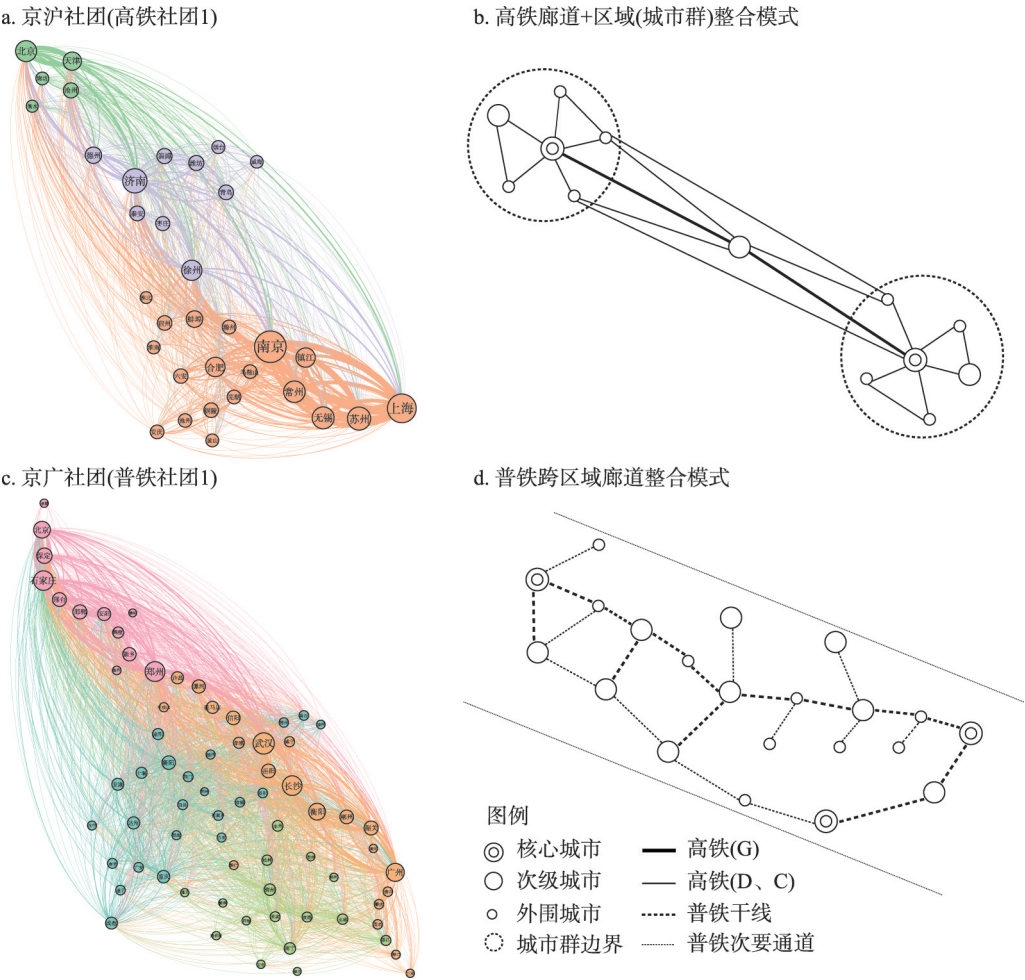


图 10 基于高铁与普铁的区域整合模式示意图

Fig. 10 Regional integration model based on high speed rail and conventional rail

5 结论与讨论

在高铁网络架构基本形成，追求与普铁平衡发展背景下，本文比较分析了基于高铁与普铁的功效空间级联系统结构，揭示了二者对经济社会空间组织的整合效应，主要结论为：

高铁与普铁形成了差异化空间运输联系结构，刻画了差异化空间级联系统特征。相较于普铁，高铁布局与全国经济社会发展梯度格局更一致，但普铁服务均衡性更强。高铁客流联系距离衰减效应更明显，在 600 km 范围内最具优势；高铁和普铁城市位势分别呈“金字塔”型和“纺锤”型分布结构，且两者的优势城市呈显著的南北分异。高铁和普铁网络社团等级结构呈现出差异化的地理空间依赖性和形态，高铁社团形成了 14 个以邻近区域集聚为主要形态的功能性社团，普铁形成了 12 个沿主要铁路干线的大尺度南北向和东西向跨区域廊道集聚形态的功能性社团。

高铁和普铁的区域整合模式表现不一。在全国层面上，高铁功效空间区域整合呈现出显著的两极分化态势，形成了以京沪、石武、华南以及东南等强高铁服务能力社团为

核心的多中心等级化组织模式。基于服务能力的高铁功效空间组织与“钻石型”国土空间以及“四极六轴”国家立体综合交通网布局并不完全一致,仍需重点完善。普铁功效空间区域整合呈现出了多板块均衡化组织模式。在区域层面上,高铁的轴—辐运营模式支撑高铁形成了“廊道+区域(城市群)”整合模式。普铁在高铁的竞争下主要集中于中长途市场,形成了大尺度跨区域廊道整合模式。需要指出的是,普铁在经济发达地区仍然有巨大的市场空间,依然需要重视普铁发展,满足经济发达地区差异化群体出行需求。

相较于以往单一铁路或高铁的研究,本文所得到的铁路运输联系格局与空间尺度存在一定的共性。本文创新之处在于关注铁路运输内部的不同运输方式—高铁与普铁在支撑空间级联系统中的耦合性与差异性,揭示了高铁与普铁对功效空间结构重塑的差异化特征与组织模式,丰富与深化了现有多元交通流特别是铁路交通流的研究。在后续研究中,可结合长时间数据探讨高铁与普铁功效空间结构体系的演化模式。此外,铁路时刻表数据仅能反映供给侧的现状,还需要结合需求侧客流数据做进一步的探讨。

参考文献(References)

- [1] Boarnet M G. Spillovers and the locational effects of public infrastructure. *Journal of Regional Science*, 1998, 38(3): 381-400.
- [2] Han Zenglin, Yang Yinkai, Zhang Wenchang, et al. The basic theory and life-circle pattern of traffic economic belt's development and evolvement. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(4): 295-300. [韩增林, 杨荫凯, 张文尝, 等. 交通经济带的基础理论及其生命周期模式研究. *地理科学*, 2000, 20(4): 295-300.]
- [3] Freiria S, Sousa N, Calvo-Poyo F. Spatial analysis of the impact of transport accessibility on regional performance: A study for Europe. *Journal of Transport Geography*, 2022, 102: 103371. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103371.
- [4] Jin Fengjun, Wang Jiaoe. Railway network expansion and spatial accessibility analysis in China: 1906-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 293-302. [金凤君, 王姣娥. 20世纪中国铁路网扩展及其空间通达性. *地理学报*, 2004, 59(2): 293-302.]
- [5] Shaw S L, Fang Z X, Lu S W, et al. Impacts of high speed rail on railroad network accessibility in China. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 112-122.
- [6] Jiang Haibing, Xu Jiangang, Qi Yi. The influence of Beijing-Shanghai high-speed railways on land accessibility of regional center cities. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(10): 1287-1298. [蒋海兵, 徐建刚, 祁毅. 京沪高铁对区域中心城市陆路可达性影响. *地理学报*, 2010, 65(10): 1287-1298.]
- [7] Jin Wenwan, Zhu Shengjun, Wang Chong. Technological relatedness, regional accessibility and firm productivity. *Geographical Research*, 2022, 41(2): 509-526. [金文纨, 朱晟君, 王翀. 技术关联、交通可达性与企业生产率: 基于公路和铁路的研究. *地理研究*, 2022, 41(2): 509-526.]
- [8] Chen Z H, Haynes K E. Impact of high-speed rail on regional economic disparity in China. *Journal of Transport Geography*, 2017, 65: 80-91.
- [9] Xu J, Zhang M, Zhang X L, et al. How does city-cluster high-speed rail facilitate regional integration? Evidence from the Shanghai-Nanjing corridor. *Cities*, 2019, 85: 83-97.
- [10] Wang Jiaoe, Jiao Jingjuan, Huang Jie, et al. Theory and methodology of transportation development and location measures. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 666-676. [王姣娥, 焦敬娟, 黄洁, 等. 交通发展区位测度的理论与方法. *地理学报*, 2018, 73(4): 666-676.]
- [11] Jiao Jingjuan, Wang Jiaoe, Jin Fengjun, et al. Impact of high-speed rail on inter-city network based on the passenger train network in China, 2003-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 265-280. [焦敬娟, 王姣娥, 金凤君, 等. 高速铁路对城市网络结构的影响研究: 基于铁路客运班列分析. *地理学报*, 2016, 71(2): 265-280.]
- [12] Dai Teqi, Jin Fengjun, Wang Jiaoe. Spatial interaction and network structure evolvement of cities in term of China's railway passenger flow in 1990s. *Progress in Geography*, 2005, 24(2): 80-89. [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.]
- [13] Wu Wei, Tang Zhaopei, Liang Shuangbo, et al. Spatio-temporal evolution of land transportation connection in the Yangtze River Delta urban agglomeration under the background of area expansion. *Human Geography*, 2022, 37(3): 163-171, 182. [吴威, 唐昭沛, 梁双波, 等. 空间扩容背景下长三角城市群陆路交通联系时空演化. *人文地理*, 2022,

- 37(3): 163-171, 182.]
- [14] Zhong Yexi, Guo Weidong. High-speed rail network spatial structure and organization model in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 79-88. [钟业喜, 郭卫东. 中国高铁网络结构特征及其组织模式. *地理科学*, 2020, 40(1): 79-88.]
- [15] Ma Xueguang, Jia Yan. Network pattern and spatial characteristics of railway passenger flow in China. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2020(6): 75-87. [马学广, 贾岩. 中国铁路客运流的网络格局与空间特征研究. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2020(6): 75-87.]
- [16] Liu Chengliang, Xu Jiaqi, Guo Qingbin. Spatial pattern of urban centrality on railway hub in China's mainland. *Economic Geography*, 2019, 39(3): 57-66. [刘承良, 许佳琪, 郭庆宾. 基于铁路网的中国主要城市中心性的空间格局. *经济地理*, 2019, 39(3): 57-66.]
- [17] Wang Jiaoe, Jing Yue. Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519. [王姣娥, 景悦. 中国城市网络等级结构特征及组织模式: 基于铁路和航空流的比较. *地理学报*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [18] Jin Fengjun, Jiao Jingjuan, Qi Yuanjing. Evolution and geographic effects of high-speed rail in East Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 576-590. [金凤君, 焦敬娟, 齐元静. 东亚高速铁路网络的发展演化与地理效应评价. *地理学报*, 2016, 71(4): 576-590.]
- [19] Liu W C, Guo J Y, Wu W, et al. The evolution of regional spatial structure influenced by passenger rail service: A case study of the Yangtze River Delta. *Growth and Change*, 2022, 53(2): 651-679.
- [20] Huang Y, Zong H M. The intercity railway connections in China: A comparative analysis of high-speed train and conventional train services. *Transport Policy*, 2022, 120: 89-103.
- [21] Jin Fengjun. *Organization Mechanism of Efficacy Space and Spatial Welfare: Spatial Organization and Efficiency*. Beijing: Science Press, 2013: 73-75. [金凤君. 功效空间组织机理与空间福利研究: 经济社会空间组织与效率. 北京: 科学出版社, 2013: 73-75.]
- [22] Cao Xiaoshu, Yan Xiaopei. A review of corridor and transport corridor. *City Planning Review*, 2003, 27(1): 50-56. [曹小曙, 阎小培. 20世纪走廊及交通走廊研究进展. *城市规划*, 2003, 27(1): 50-56.]
- [23] Cheng J M, Chen Z H. Impact of high-speed rail on the operational capacity of conventional rail in China. *Transport Policy*, 2021, 110: 354-367.
- [24] Zheng S, Kahn M E. China's bullet trains facilitate market integration and mitigate the cost of megacity growth. *PNAS*, 2013, 110(14): E1248-E1253.
- [25] Krugman P. Scale economies, product differentiation, and the pattern of trade. *The American Economic Review*, 1980, 70(5): 950-959.
- [26] Li H J, Zhu C F, Zhang Y Z. Research on travel mode share and operation strategy in Baoji-Lanzhou transportation corridor. *Journal of Information and Computational Science*, 2015, 12(4): 1469-1478.
- [27] Wang Jiaoe, Du Delin, Jin Fengjun. Comparison of spatial structure and linkage systems and geographic constraints: A perspective of multiple traffic flows. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2482-2494. [王姣娥, 杜德林, 金凤君. 多元交通视角下的空间级联系统比较与地理空间约束. *地理学报*, 2019, 74(12): 2482-2494.]
- [28] Cheng J M, Chen Z H. Socioeconomic impact assessments of high-Speed rail: A meta-Analysis. *Transport Reviews*, 2022, 42(4): 467-502.
- [29] Hesse M. On borrowed size, flawed urbanisation and emerging enclave spaces: The exceptional urbanism of Luxembourg. *European Urban and Regional Studies*, 2016, 23(4): 612-627.
- [30] Wu J H, Nash C, Wang D. Is high speed rail an appropriate solution to China's rail capacity problems? *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 100-111.
- [31] Wang K, Xia W Y, Zhang A M. Should China further expand its high-speed rail network? Consider the low-cost carrier factor. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 100: 105-120.
- [32] Yang H R, Dijst M, Witte P, et al. Comparing passenger flow and time schedule data to analyse high-speed railways and urban networks in China. *Urban Studies*, 2019, 56(6): 1267-1287.
- [33] Niu F Q, Wang F. Economic spatial structure in China: Evidence from railway transport network. *Land*, 2022, 11(1): 61. DOI: 10.3390/land11010061.
- [34] Rosvall M, Bergstrom C T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure. *PNAS*, 2008, 105(4): 1118-1123.
- [35] Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks

- based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 224-241. [陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式. *地理学报*, 2017, 72(2): 224-241.]
- [36] Li Tao, Wang Jiaoe, Gao Xingchuan. Comparison of inter-city travel network during weekdays and holiday in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 833-848. [李涛, 王姣娥, 高兴川. 中国居民工作日与节假日的城际出行网络异同性研究. *地理学报*, 2020, 75(4): 833-848.]
- [37] Zhao Pengjun, Lyu Di, Hu Haoyu, et al. Population-development oriented comprehensive modern transport system in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2699-2715. [赵鹏军, 吕迪, 胡昊宇, 等. 适应人口发展的现代化综合交通运输体系研究. *地理学报*, 2020, 75(12): 2699-2715.]

Spatial differentiation and effect on regional integration of inter-city connections in China

LI Tao^{1,2}, PENG Tianhao¹, WANG Jiaoe^{2,3}, HUANG Jie²

(1. Northwest Land and Resource Research Center, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;
2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There are differences between high-speed rail and conventional rail in technical and economic characteristics such as speed, ticket price and reasonable transport distance. Therefore, they can reflect spatial traffic links at different scales, which have important impact on the reshaping of territorial space. Using train timetable data, this paper analyzes the differential spatial cascading system order of high-speed rail and conventional rail service, and compares the regional integration effect of these two rail modes on the spatial cascading system. The results show that, compared with conventional rail, the spatial layout of high-speed rail is more consistent with the gradient pattern of national economic and social development. The distance decay effect of traffic flows by high-speed rail is more obvious, with an advantage over conventional rail for journeys within 600 km. The advantaged cities of high-speed rail and conventional rail are spatially concentrated to the south and north of the Yangtze River respectively. The conventional rail service presents a more balanced distribution considering the demand of passenger transport. Further analysis shows that, under the influence of technical and economic advantages, competition between high-speed rail and conventional rail, and the network spatial layout, the regional integration effect of high-speed rail on efficiency space shows a significant polarization, with the neighboring regional agglomeration as the main form, while conventional rail has formed cross-regional corridor agglomeration along the north-south direction and east-west direction at the macro level. The regional integration model of high-speed rail and conventional rail also presents the characteristics of multi-center grading and multi-plate equalization respectively.

Keywords: rail; techno-economic characteristics; spatial cascading system; efficiency space; regional integration