

基于陆路综合交通系统的中国城市网络通达性模拟及其对区域发展格局的影响

陈卓^{1,2}, 梁宜³, 金凤君^{1,2,4*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:在中国经济社会发展和交通建设出现新转向的背景下, 论文基于现状和相关规划完成后的陆路综合交通网络, 解析了中国城市网络通达性的演化趋势及其对国土空间结构演进的影响, 重点回应了“全国123出行交通圈”建设和国土开发均衡性2个问题。结果显示, 已有规划的完成能够大幅提高中国城市网络的通达性水平, 在最短旅行时间上基本可以支撑“全国123出行交通圈”的建设; 通过促进轴—辐组织模式和空间级联秩序发育, 已有规划能够引导国土开发结构朝多中心、网络化方向演进, 为区域间的协调和均衡发展提供交通基础; 未来应从支撑与引导、整合与衔接、效率与公平等方面持续优化交通服务的供给结构, 提升综合交通运输体系服务人民生活和社会生产的能力。

关键词:城市网络; 通达性; 区域发展格局; 空间分析; 中国

交通基础设施体系是塑造人类地表的重要力量, 能够通过引起空间可达性和区域间相互关系的变化, 营造差异突出的经济活动空间区位和发展环境, 引导国民经济发展和空间结构演进^[1]。改革开放以来, 中国交通基础设施建设取得了重大成就, 城市网络通达性和中心城市的空间辐射能力不断优化, 极大地改善了国土的通达性与整体性, 推动了城市与产业空间系统的持续演化^[2]。根据《中长期铁路网规划》和《国家公路网络规划(2013—2030年)》, 2030年中国将建成国家高速公路11.8万km(不含地方高速公路)、高速铁路4.5万km左右, 城市网络通达性也将随之持续发生变化。上述2大规划出台后, 中国的经济社会发展和交通建设在近年来出现了新的转向。2017年, 党的十九大报告指出当前中国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的

美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。区域之间、城乡之间发展的不平衡是新的历史方位下中国不平衡发展问题的主要表现之一^[3]。2019年, 中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》, 明确提出围绕区域中心城市和全国主要城市形成“全国123出行交通圈”(都市区1小时通勤、城市群2小时通达、全国主要城市3小时覆盖)是2035年基本建成交通强国要实现的主要目标之一。在此背景下, 有必要重新审视《中长期铁路网规划》和《国家公路网络规划(2013—2030年)》营造的通达性格局, 能否支撑“全国123出行交通圈”的建设? 将促进国土空间组织模式朝什么方向演进, 能够在哪些方面为解决不平衡发展问题提供支撑?

系统评估交通建设所引致的时空收敛效应是中国交通地理学的经典研究主题, 相关研究最早可

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2020-11-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771134); 中国科学院战略性先导科技专项A类(XDA19040403)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771134; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA19040403.]

第一作者简介: 陈卓(1991—), 男, 河南安阳人, 博士后, 主要从事交通地理与区域发展研究。E-mail: chenz.16b@igsnrr.ac.cn

*通信作者简介: 金凤君(1961—), 男, 内蒙古赤峰人, 博导, 教授, 主要从事区域经济学与经济地理学研究。

E-mail: jinfj@igsnrr.ac.cn

引用格式: 陈卓, 梁宜, 金凤君. 基于陆路综合交通系统的中国城市网络通达性模拟及其对区域发展格局的影响[J]. 地理科学进展, 2021, 40(2): 183-193. [Chen Zhuo, Liang Yi, Jin Fengjun. Simulation of city network accessibility and its influence on regional development pattern in China based on integrated land transport system. Progress in Geography, 2021, 40(2): 183-193.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.02.001

回溯至1936年胡焕庸分别以北平和南京为中心绘制的全国等时线图^[4]。20世纪末在GIS技术广泛应用的推动下,围绕空间可达性形成了多样化的评价指标和方法体系,不同尺度上交通建设的时空收敛效应得到广泛关注^[5-10]。在国家尺度上,早期研究重点关注干线公路网络和铁路网络扩张的过程机制与空间效应^[11-13],以及历史视角下长时序的道路网演化及其效应评估^[14];随着中国高速公路和高速铁路网络建设的加快,对高速交通网络引致的空间效应进行系统评估成为研究热点^[15-18],形成了相对完善的研究体系。但在研究对象上,已有研究更加侧重于针对历史和现状的部门交通网络开展相关评估,归纳交通空间系统演化的基本规律,对未来综合交通网络完善后的城市网络通达性及其对区域发展格局的影响关注较少,尤其是当前国家层面上综合交通运输体系建设正处于转型期的关键阶段,全面建设交通强国不仅涉及交通系统内部要素的协调、提升和优化,也涉及交通—城市、交通—产业空间系统的协同优化。

鉴于此,本文基于现状和相关规划完成后的陆路综合交通网络,以中国337个地级及以上行政单元为研究对象,从交通服务水平、节点通达性格局、中心城市交通圈和城市联系潜力格局等方面解析中国城市网络通达性的演化趋势及其对国土空间结构演进的影响,重点回应“全国123出行交通圈”建设和国土开发均衡性2个问题,以期服务于未来中国的交通建设与区域协调发展。

1 研究方法 with 数据

1.1 研究方法

就某一节点或地区而言,通达性涉及2个基本方面:一是是否被接入交通网络,反映交通服务的可获得性;二是在综合交通网络中的区位条件,反映节点获取资源和控制市场的能力,通常基于以旅行时间为表征的相对距离关系和以要素流动为表征的网络关联关系进行评估。围绕上述2个方面,首先,统计各地级及以上行政单元接入综合交通网络的基本情况;其次,利用通达指数、加权旅行时间和日常可达性等指标评估城市节点间的相对距离关系;第三,利用引力模型构建要素流动潜力网络,并提取骨干网络,分析城市节点关联的空间模式。

1.1.1 通达性评价指标

(1) 通达指数(C_i)。指从交通网络的某一节点

出发,到达其他所有节点的平均最短旅行时间,反映了该节点与网络中其他节点联系的便捷程度。

$$C_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} \quad (1)$$

式中: n 为区域内节点数量, T_{ij} 为节点 i 至节点 j 的最短旅行时间。

(2) 加权旅行时间(A_i)。节点获取资源和控制市场的能力不仅取决于其与网络中其他节点的通达水平,也取决于资源和市场的分布格局。加权平均旅行时间以表征城市规模和职能的相关指标为权重,符合非匀质区域的现实基础,较通达指数更加能够反映城镇节点获取资源和控制市场的能力。

$$A_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n M_j T_{ij}}{\sum_{j=1, j \neq i}^n M_j} \quad (2)$$

式中: M_j 为表征节点 j 规模的指标,采用人口(POP)与GDP的几何平均值代替, $M_j = \sqrt{\text{GDP}_j \times \text{POP}_j}$ 。

(3) 日常可达性(Q_i)。指从交通网络的某一节点出发,在一日往返的范围内能够达到的空间范围及其覆盖的人口和经济活动总量。根据《交通强国建设纲要》,2035年中国将基本建成“123出行交通圈”,重点基于中心城市的1 h、2 h和3 h交通圈开展日常可达性评价。其中,中心城市取省会城市、直辖市和大连、青岛、宁波、厦门、深圳5个副省级城市。

$$Q_i = \sum_{T_{ij} < \alpha}^n q_j \quad (3)$$

式中: q_j 为节点 j 的人口或GDP总量; α 取值为1 h、2 h和3 h。

1.1.2 要素流动网络构建与骨干网络提取方法

(1) 网络构建方法。采用经典的引力模型模拟城市节点间的要素流动潜力(度值 P_{ij})。

$$P_{ij} = \frac{M_i M_j}{T_{ij}^\beta} \quad (4)$$

式中: β 为距离衰减系数,参照对引力模型的一般处理方法,取值为2。

(2) 骨干网络提取方法。最小支撑树(亦称最小生成树)指网络中边权重最小的支撑树。根据最小支撑树定理,若把一个网络 N 的点集 V 剖分成不相交的2个非空集合 S 与 \bar{S} ,则连接 S 与 \bar{S} 的最小边必包含于网络 N 的最小支撑树内^[19]。因此,在无向网络中,当以节点间流量的倒数为边权时,第一,最小支撑树覆盖所有节点的首位联系;第二,城市并非空间中孤立存在的个体,具备不同职能分工与规模

等级的城市通过多种形式的联系彼此依存,形成具有不同社会经济功能的地域实体,但无论城市节点间如何组合,不同功能区域间的最大联系必包含于最小支撑树内^[20]。根据上述定理,利用避圈法提取要素流动网络的最小支撑树。

步骤1:从网络 N 中任选一点 v_i ,令 $S=\{v_i\}$, $\bar{S}=V\setminus\{v_i\}$;

步骤2:从连结 S 和 \bar{S} 的边中选取最小边 (v_i,v_j) ,令 $S=S\cup\{v_j\}$, $\bar{S}=\bar{S}\setminus\{v_j\}$;

步骤3:若 $\bar{S}=\emptyset$,则停止,已选出的诸边即网络 N 的最小支撑树。

1.2 数据来源

以中国337个地级及以上城市为节点(不包括港澳台地区),构建现状与未来综合交通网络,利用ArcGIS中的网络分析工具,获取不同节点间的最短旅行时间矩阵,模拟中国的城市网络通达性。研究数据主要包括两部分,一是城市人口和GDP数据,以2018年为基准年,来源于《2019年中国城市统计年鉴》;由于评价重点在于综合交通网络建设对城市网络通达性的影响,因此现状与未来相关指标的计算均采用基准年的人口和GDP数据^[18]。二是各级公路与铁路网络数据,现状数据来源于中国科学院人地系统主题数据库(<http://www.cas.cn/ky/kycc/kxsjk/dqkx/>)和国家测绘局国家基础地理信息中心1:400万地图数据库(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>);未来数据在现状网络的基础上,叠加《中长期铁路网规划》和《国家公路网络规划(2013—2030年)》的规划线路(含展望线)。

各级公路的行车速度根据《中华人民共和国公路工程技术标准》设定,高速公路、国道、省道和县道分别为120、80、60和30 km/h。铁路运行速度的设定,普通铁路为90 km/h,G字头和C字头列车线路为250 km/h,D字头列车线路为160 km/h。由于未来铁路网络站点的数量和位置尚未确定,假设铁路经过的地级及以上城市均设有站点并享有运输服务。

2 中国城市网络通达性模拟

2.1 空间服务水平

高速公路和高速铁路将成为具有普适性特征的设施体系。从接入设施网络的地级行政区数量来看,当前共有323个地级行政区接入全国高速公

路网络,能够服务全国99.20%的人口和99.72%的GDP(表1);未来除三沙市外,所有地级行政区均将接入全国高速公路网络,服务人口和GDP的水平基本达到100%。

在高速铁路的空间服务水平上,2019年193个地级行政单元被接入高速铁路网络,主要呈带状沿国土开发的主要轴线分布(图1);规划网络建成后,共有296个地级行政单元被接入高速铁路网络,基本覆盖胡焕庸线以东的人口集聚区,服务人口和GDP的比重分别从2019年的70.33%、75.14%提高到93.59%和90.74%。即从服务人口和产业活动的视角来看,未来中国高速铁路将成为具有普适特征的设施体系。

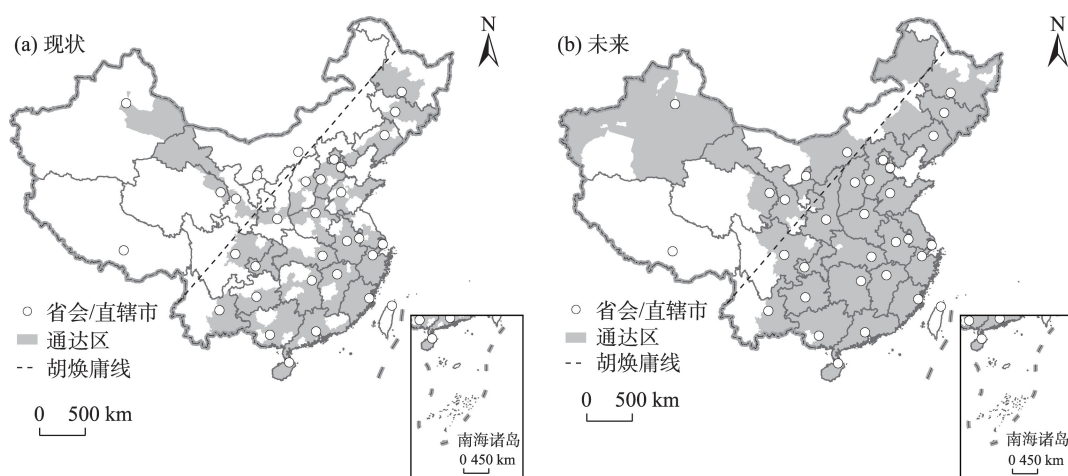
2.2 节点通达性格局

(1) 城市节点通达性大幅提高。2019年中国各地级行政单元的通达指数主要集中在8~13 h之间,均值为12.56 h,122个地级行政单元的通达指数小于10 h,占地级行政单元总数的36.09%,覆盖中国50.98%的人口和54.82%的GDP;各地级行政单元的加权旅行时间主要集中在6~11 h之间,均值为10.80 h,209个地级行政单元的加权旅行时间小于10 h,占地级行政单元总数的61.83%,覆盖中国78.65%的人口和84.11%的GDP(图2)。规划网络建成后,各地级行政单元的网络通达性大幅提高,通达指数和加权旅行时间的均值分别减少了3.97 h和3.27 h。122个地级行政单元的通达指数小于8 h,覆盖中国人口和GDP的比重分别为79.75%和85.39%;251个地级行政单元的加权旅行时间小于8 h,覆盖中国人口和GDP的比重分别为87.31%和90.40%。同时,考虑了人口和经济分布差异的加权旅行时间较通达指数小1~2 h,表明中国的综合交通体系建设较好地耦合了人口和经济的空间布局,人口和经济规模较大的城镇节点及其周边地区在综合交通网络中占据了通达性较高的区位。

(2) 通达性圈层由沿高铁轴向拓展转为各方向

表1 现状与未来中国高速公路与高铁网络的空间服务水平
Tab.1 Spatial service level of expressway and high-speed rail in China at present and in the future

时点	设施网络	城市节点 /个	覆盖人口 比重/%	覆盖GDP 比重/%
现状	高速公路	323	99.20	99.72
	高速铁路	193	70.33	75.14
未来	高速公路	336	100	100
	高速铁路	296	93.59	90.74



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 现状与未来中国高速铁路通达地级行政区

Fig.1 Prefectural-level regions connected to the high-speed rail in China at present and in the future

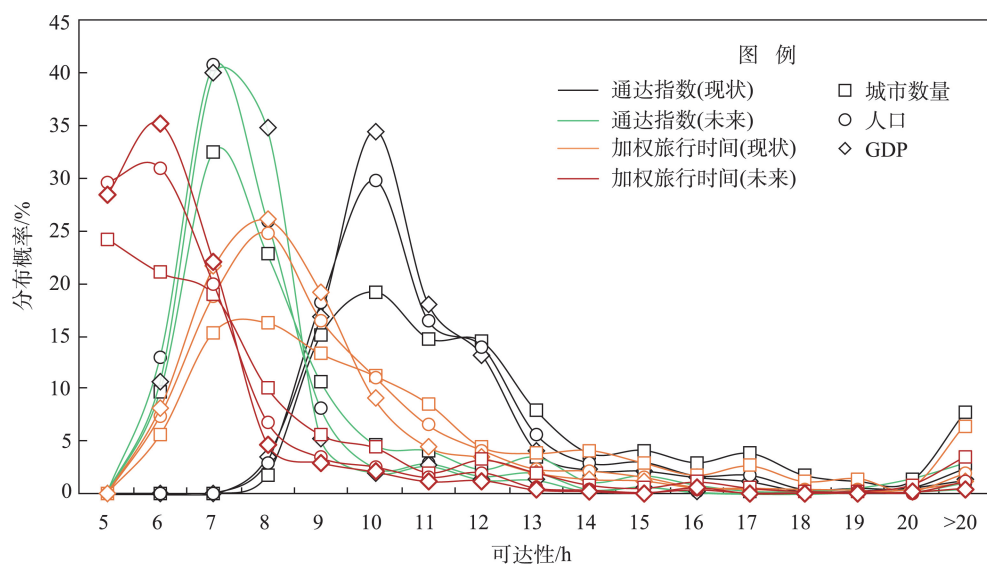


图2 现状与未来中国城市、人口和GDP随可达性指标的分布概率

Fig.2 Distribution of China's cities, population, and GDP by accessibility indices at present and in the future

相对均衡的拓展,强化了原有的城市网络通达性结构。近年来,随着高速铁路的建设,沿线区域的通达性率先得到改善,促使宏观的通达性圈层表现出沿高速铁路轴向拓展的特征,尤其是在京广高铁、沪蓉高铁和沪昆高铁沿线(图3)。规划网络建成后,高速铁路在京兰通道以南、银川—兰州—成都—昆明一线以东将形成较为密集的网络,使时空由原来的沿单一方向收敛转为沿多个方向的均衡收敛,促使宏观的通达性格局回归以华中地区为核心、向外相对均衡拓展的圈层结构。但相对于通达指数,加权旅行时间由于考虑了人口和经济分布的空间差异,空间圈层向人口与经济相对集聚的东部沿海地

区发生了一定偏移。从中国的交通建设历史来看,相对均衡的圈层结构也是各个时期交通网络完善后的典型特征^[21]。

(3) 城市网络通达性格局总体呈核心—边缘结构,高通达性城市节点主要集中在以京津冀地区、长三角地区、珠三角地区和成渝地区为顶点构成的菱形区域内部。2019年,菱形内部各地级行政单元通达指数和加权旅行时间的均值分别为9.73 h和7.56 h,规划网络建成后减少至6.70 h和5.27 h,均较全国平均水平至少低1/5。从分布形态来看,菱形内部各地级行政单元的通达性差异相对较小,规划完成后形成较为规则的圈层;菱形外部各地级行

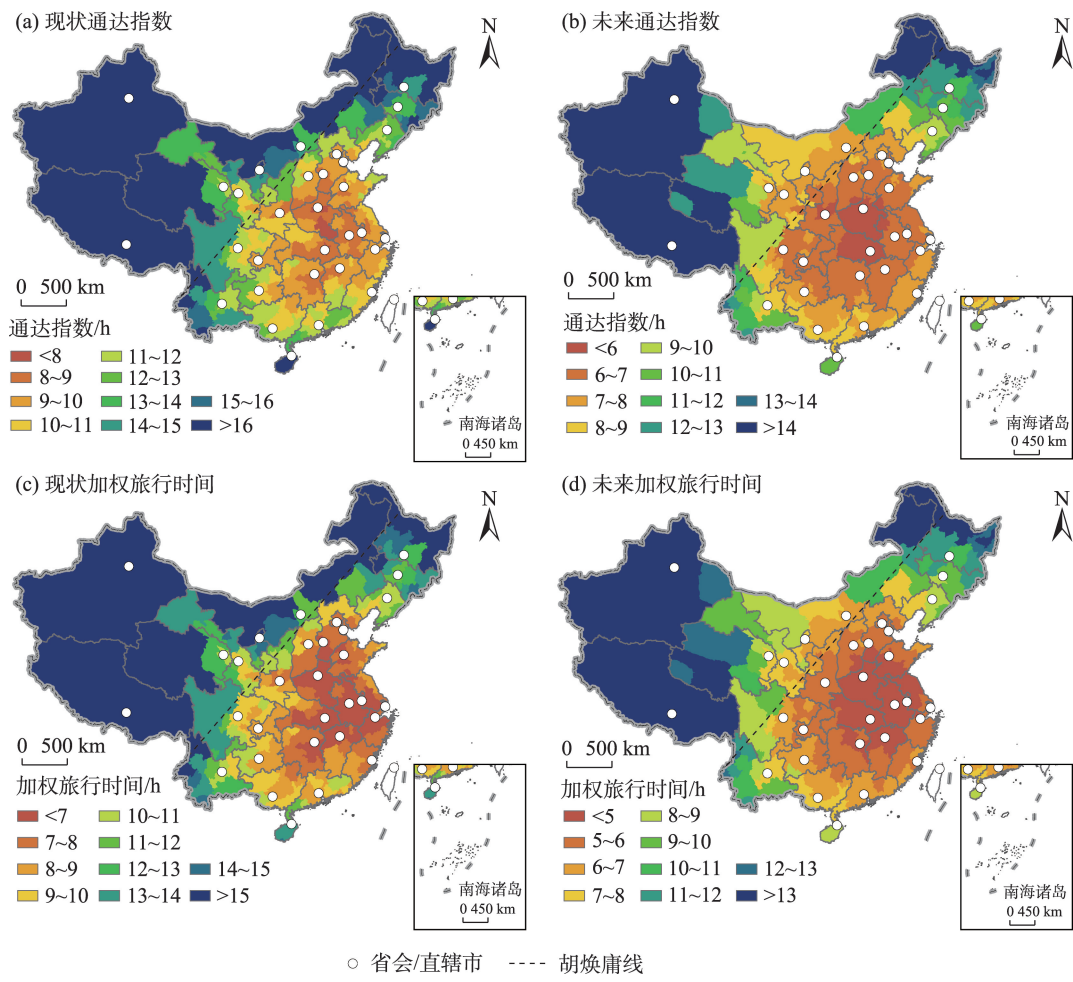


图3 现状与未来城市网络通达性格局

Fig.3 Accessibility of city network in China at present and in the future

政单元的通达性差异较大,通达性较高的地级行政单元除围绕菱形区域外缘分布外,主要沿东北进出关通道和陇海通道沿线分布。基于上述通达性格局,未来菱形区域内部的交通优势将表现出面状拓展的趋势,而菱形区域外部的交通优势仍将持续轴向拓展的趋势,围绕中心城市和城市群地区形成的“十纵十横”放射型综合运输大通道体系是上述趋势形成的重要基础。

2.3 中心城市交通圈

(1) 从最短旅行时间和服务人口与经济的视角来看,已有规划网络基本可以支撑“全国123出行交通圈”的建设。2019年,中心城市3 h交通圈覆盖了中国86.40%的人口和91.24%的GDP;规划网络建成后,中心城市2 h交通圈覆盖人口和GDP的比重分别达到92.69%和96.05%,3 h交通圈覆盖人口和GDP的比重进一步提高(表2)。虽然在“全国123出行交通圈”建设中,不同圈层由于集聚的经济社会

表2 现状与未来中心城市交通圈的基本情况

Tab.2 Basic situation of the traffic circles of central cities at present and in the future

指标	1 h交通圈		2 h交通圈		3 h交通圈	
	现状	未来	现状	未来	现状	未来
城市数量/个	131	185	214	278	257	296
人口比重/%	51.84	66.54	74.50	92.69	86.40	95.35
GDP比重/%	66.83	77.32	83.52	96.05	91.24	97.75

活动不同,所需要的基础设施类型和服务水平也有较大差异。但从最短旅行时间的视角来看,已有规划基本可以支撑“全国123出行交通圈”的建设,时速600 km级高速磁悬浮系统、时速400 km级高速轮轨客运列车系统、低真空管(隧)道高速列车等在较长时期内更加适合作为技术储备。

(2) 中心城市1 h和2 h交通圈的基本空间形态将由斑块状转为较为连续的面状。2019年,至中心城市的旅行时间在1 h和2 h以内的地级行政单元

分别有131个和214个,主要分布在胡焕庸线以东地区,围绕中心城市呈斑块状分布(图4);规划网络建成后,至中心城市的旅行时间在1 h和2 h以内的地级行政单元分别增加至185个和278个,部分邻近中心城市的1 h交通圈连接成片,形成较为连续的面状,以京津冀地区、长三角地区、珠三角地区和成渝地区为顶点构成的菱形区域基本上能够被中心城市2 h交通圈覆盖。

2.4 城市联系潜力格局

(1) 规划网络建成后,城市间要素流动潜力大幅提高。2019年中国各城市的要素流动潜力主要集中在 $2 \times 10^6 \sim 6 \times 10^7$ 之间,平均要素流动潜力为 41.38×10^6 ;规划网络建成后,中国各城市的要素流动潜力主要集中在 $6 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$ 之间,平均要素流

动潜力为 75.94×10^6 ,增长了83.52%。

(2) 要素流动主要集中在以京津冀地区、长三角地区、珠三角地区和成渝地区为顶点构成的菱形区域内,表现出以城市群地区为主体的区域化趋势。2019年中国要素流动潜力大的城市节点主要沿重要的发展轴呈带状分布,尤其是集中在沿海通道、沿江通道、京广通道、京沪通道和沪昆通道沿线地区(图5)。规划网络建成后,要素流动表现出以城市群地区为主体的区域化趋势,京津冀地区、长三角地区、珠三角地区、成渝地区、长江中游地区、中原城市群地区、山东半岛地区和海峡西岸地区的要素流动潜力显著提高,要素流动的平均时距从7.02 h降低到4.98 h,表明以城市群地区为主体的中短途要素流动具有较大的增长潜力。从空间形态上来

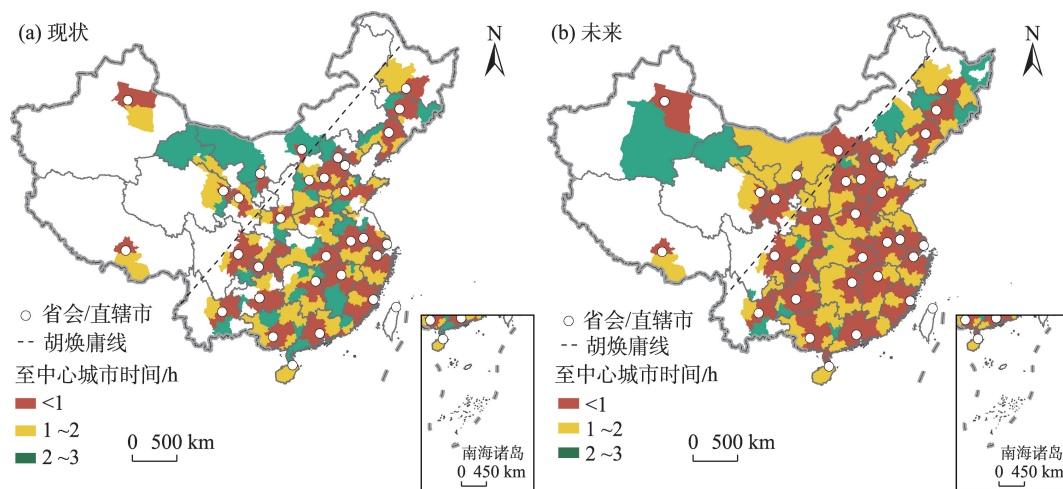


图4 现状与未来中心城市交通圈

Fig.4 The traffic circles of central cities at present and in the future

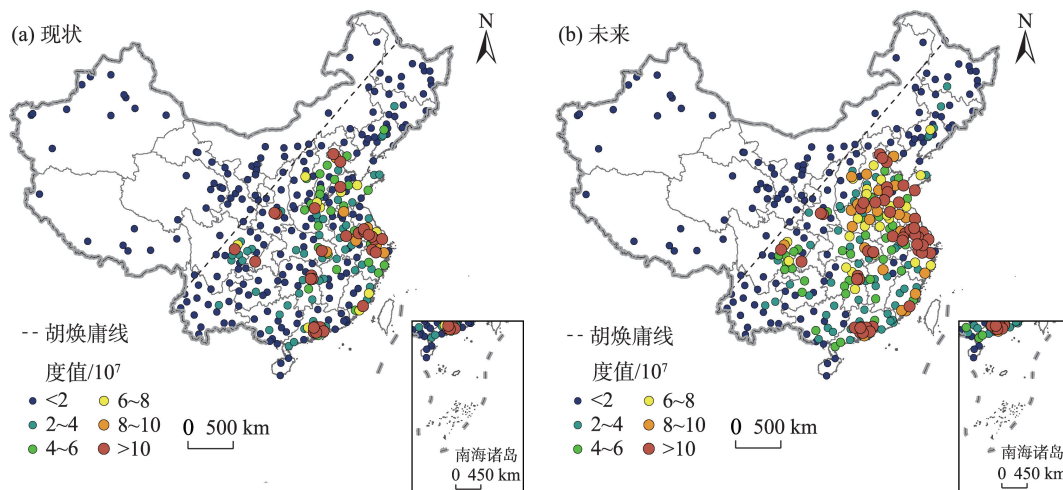


图5 现状与未来城市经济社会联系格局

Fig.5 Patterns of socioeconomic linkages of cities in China at present and in the future

看,要素流动主要分布在以京津冀地区、长三角地区、珠三角地区和成渝地区为顶点构成的菱形区域内,其中北方尤其集中在京广通道以东地区,要素流动潜力较高的城市节点连绵成片;在南方则表现为围绕中心城市呈团状分布,长三角地区、珠三角地区、成渝地区、长江中游地区和海峡西岸地区是核心的集聚平台。

(3) 要素流动网络结构形成区域分异,菱形区域内部结构由以“点—轴”组织模式为基础的“轴带”结构逐渐转向以“轴—辐”组织模式为基础的多中心网络化结构;东北地区仍将持续以“点—轴”组织模式为基础的“轴带”结构,西部地区在较长时期内仍将处于点状集聚的阶段。在菱形区域内部,2019年要素流动的骨干网络主要以中心城市为枢纽,以重要的发展轴沿线地区为重点联系方向,具有典型的“轴带”结构特征(图6)。规划网络建成后,要素流动网络的主导结构要素由发展轴转为城市

群,表现出2个突出特征:一是要素流动围绕中心城市收缩,城市群内部成为要素流动最密集的区域,基本组织模式是以中心城市为枢纽的“轴—辐”模式,形成网络化的实体地域;二是城市群之间要素流动密集,基本组织模式是以城市群地区为枢纽的“轴—辐”模式,形成多中心放射型网络结构。上述组织模式在南方尤为明显,长三角地区、珠三角地区、成渝地区、长江中游地区和海峡西岸地区是主要的枢纽地区;北方的枢纽地区包括京津冀地区、中原地区和山东半岛地区等,在京广线以东地区形成密集的要流动网络。在东北地区,短期内要素流动将持续围绕哈大线开展,但以沈阳为中心的辽中南地区网络化结构逐渐发育;菱形区域以外的西部地区要素流动潜力小,在较长时期内仍将持续围绕中心城市,以点状集聚为主的联系阶段。

(4) 菱形顶点区域对外围区域辐射能力加强。由于要素流动的区域化,菱形区域内部的最小支撑

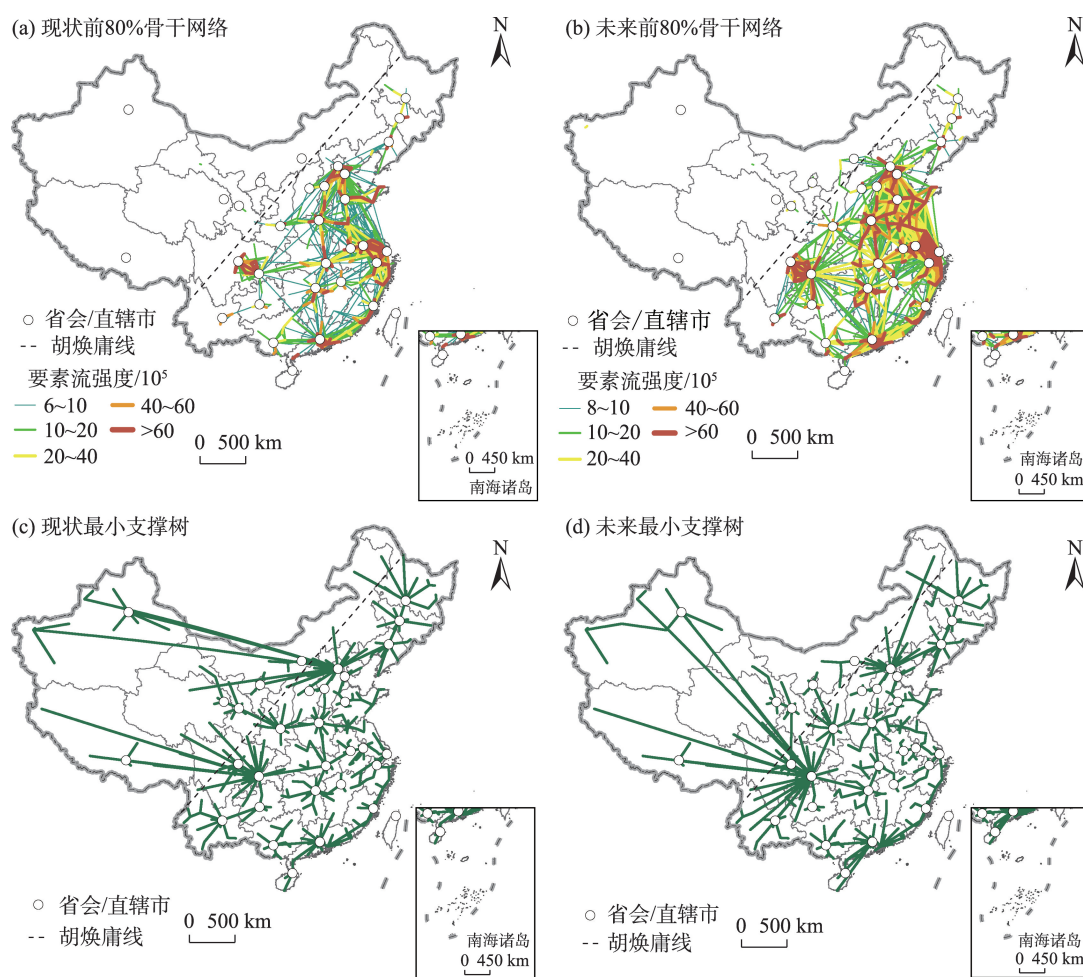


图6 现状与未来城市经济社会联系的骨干网络

Fig.6 The backbone network of socioeconomic linkages of cities in China at present and in the future

树形态由综合运输通道联结中心城市的“串珠状”转向以中心城市为枢纽的“放射状”,整体联系更加紧凑。同时,菱形顶点区域对外围区域的辐射表现出2个重要变化。一是随着东北进出关通道建设的加强,京津冀地区对东北地区的辐射能力加强;二是随着西部陆海新通道的建设,成渝地区成为辐射西部地区的前沿,西北地区在宏观尺度上由主要接受京津冀地区辐射转为主要接受成渝地区辐射,云贵地区接受成渝地区的辐射强度也大幅提高。此外,关中地区对西北地区的辐射强度有所提高,但主要集中在周边的甘肃省和宁夏回族自治区。

3 城市网络通达性演化对区域发展格局的影响

3.1 “菱形”国土开发结构

中国城市网络通达性耦合了“菱形”国土开发结构。经过改革开放以来的发展,在“点—轴”开发模式的引导下,中国的区域发展格局围绕主要的发展轴带形成了以京津冀地区、长三角地区、珠三角地区和成渝地区为顶点的稳定菱形结构^[22],菱形顶点区域经济占比在45%左右,率先成为中国国土开发和深度融入全球经济的枢纽平台;菱形内部区域的经济占比在32%左右,中原地区、长江中游地区等城市化区域保持了强劲的增长态势。从现状与未来城市网络通达性来看,菱形顶点和内部区域围绕中心城市初步形成了多层次、放射型的快速交通网络体系,通达指数、加权旅行时间较全国平均水平低约1/5,各地级行政单元均将接入高铁网络并基本被中心城市2 h交通圈覆盖,交通优势格局在空间形态上由带状转为围绕中心城市连绵成片的面状;要素流动强度较全国平均水平高约70%,要素流动规模占全国的比重超过90%,并表现出显著的以城市群地区为主体的区域化趋势,有力地推动了宏观国土开发结构的演进,形成菱形顶点区域辐射能力持续强化、内部区域多中心网络化发展、外围区域接受顶点区域前沿辐射的总体模式。以此为基础,国土开发结构将表现出显著的区域性差异,菱形内部区域在“十纵十横”放射型综合交通运输通道体系的支撑下,以大都市圈和城市群地区为枢纽的多中心网络化结构将持续发育;东北地区短期内仍将持续以“点—轴”组织模式为基础的“轴带”结构,但以沈阳为中心的辽中南地区网络化结

构逐渐发育;菱形区域以外的西部地区仍在较长时期内将以陇海通道和包昆通道沿线的大中城市为主体,持续点状集聚的增长极发展阶段。

3.2 “轴—辐”空间组织模式

中国交通建设的空间逻辑转变引导了国土开发模式的演进。随着大都市圈和城市群成为人口和产业的核心载体,区域尺度上基于人类生产生活的圈层分布规律围绕中心城市建设交通圈成为重点领域,国家尺度上综合运输通道布局由服务带状经济发展的棋盘状转变为服务多中心网络化经济发展的放射状。在上述交通建设的引导下,“轴—辐”空间组织模式成为国土开发所遵循的重要模式。在城市群地区,以中心城市为枢纽、以周边城市为节点、以密集的“放射型”和“通道型”经济社会联系为特征,逐渐形成结构稳定、功能差异显著的网络化关联区域,控制着经济社会要素集散和劳动地域分工系统演进^[2],至中心城市的快捷性将成为越来越重要的区位优势;各城市群之间通过放射型综合运输通道密切联系,形成多层次枢纽结构,持续促进跨区域经济带的发育成熟,引导国土开发向多极化、网络化结构转变,持续强化国土空间的内在关联性,上述转变尤其发生在菱形顶点和内部区域。

3.3 空间级联秩序发育

通过营造差异突出的经济活动空间区位和发展环境,规划网络的建设能够引导经济社会要素有序集聚和扩散,促进空间级联秩序发育^[23]。从城市联系潜力格局的模拟结果来看:第一,要素流动网络将围绕中心城市重新塑形,表现出显著的区域化趋势,在空间形态上更加紧凑。第二,中间层级的城市节点不断发育,促使要素流动网络的层级性更加丰富。相较于现状要素流动网络,规划完成后,前1%节点的要素流动潜力占比下降4.95%,前20%~50%的节点占比显著提高;前1%的联系占比下降5.56%,其他区间的联系占比均有不同程度的提高,尤其是前2%~5%的联系占比提高3.24%(表3)。第三,轴—辐空间组织模式使要素流动更加有序,改善了网络整体性。枢纽层级结构持续发育,纵向方面高级枢纽控制低级枢纽,形成层级传递功能;横向方面同级别枢纽彼此间密切联系,共同促进国土开发结构朝多中心、网络化的方向演进。

3.4 国土开发的均衡性

规划完成后的通达性格局与多中心、网络化的

表3 现状与未来经济社会联系随位序的概率分布

Tab.3 Probability distribution of socioeconomic linkages by city ranking in China at present and in the future

指标	时间	前1%	1%~5%	5%~10%	10%~20%	20%~50%	50%~100%
节点概率分布/%	现状	20.59	29.68	14.09	14.42	17.03	4.20
	未来	15.64	29.79	14.53	14.14	20.06	5.84
网络概率分布/%	现状	76.97	11.56	4.38	3.63	2.93	0.52
	未来	71.41	14.80	5.33	4.33	3.52	0.63

国土开发结构有利于促进区域发展的协调性和均衡性。从城市网络通达性来看,已有规划的完成将营造更加均衡的通达性格局。规划完成后,除通达指数外的各项通达性指标的标准偏差均减小了,表明各地级行政单元的通达性差异有所减小;菱形区域内部和外部、胡焕庸线东部和西部各项指标的相对差异也均有所减小(表4)。从城市联系潜力格局来看,已有规划将提高菱形区域内外和胡焕庸线东西联系的紧密程度。规划完成后,菱形区域内部和胡焕庸线东部的要素流动规模占全国的比重略有下降,菱形区域内外联系和胡焕庸线东西联系的规模占全国的比重均有提高(表5)。从宏观的国土开发结构来看,已有规划将引导经济社会活动由点状、带状集聚转向以城市群地区为核心平台的面状集聚,支撑国土开发结构向多中心、网络化的方向演进,促进要素流动更加有序,改善宏观国土开发的紧凑性、层级性和整体性,菱形顶点区域对外围

区域的辐射吸引能力进一步强化,有利于形成更加均衡的国土开发格局。

4 结论与讨论

(1) 在城市群地区逐渐成为中国经济地理格局核心结构要素的背景下,已有规划的完成能够大幅提高中国城市网络的通达性水平,在最短旅行时间上基本可以支撑“全国123出行交通圈”的建设;并将通过促进轴—辐空间组织模式和空间级联秩序发育,引导形成多中心、网络化的国土开发结构,为更加协调和均衡的区域发展格局提供交通基础。

(2) 在已有综合交通运输体系的支撑与引导下,国土开发结构将表现出显著的区域性差异。菱形内部区域以大都市圈和城市群地区为枢纽的多中心网络化结构将持续发育,菱形顶点区域对外围区域的辐射吸引能力不断强化;但东北地区仍将持

表4 现状与未来中国城市网络各项通达性指标统计

Tab.4 Statistics of accessibility indices of city network in China at present and in the future

指标/区域	通达指数/h		加权旅行时间/h		至中心城市时间/h		节点联系潜力/10 ⁶	
	现状	未来	现状	未来	现状	未来	现状	未来
标准偏差	0.43	0.43	0.56	0.55	1.37	1.36	3.09	2.55
全国	12.56	8.59	10.80	7.53	2.05	1.25	41.38	75.94
菱形内部	9.73	6.70	7.56	5.27	1.06	0.65	70.08	127.52
菱形外部	16.09	10.95	14.85	10.35	3.29	2.00	5.32	11.12
胡焕庸线东部	11.00	7.64	8.98	6.38	1.46	0.90	49.51	90.55
胡焕庸线西部	20.06	13.15	19.57	13.08	4.89	2.97	1.03	3.45

注:菱形内部包括顶点区域,下同。

表5 现状与未来中国经济社会联系的空间分布

Tab.5 Spatial distribution of China's socioeconomic linkages at present and in the future

指标	时间	菱形内部区域	菱形内部与外部区域之间	菱形外部区域	胡焕庸线以东地区	胡焕庸线以东与以西地区之间	胡焕庸线以西地区
占全国比重/%	现状	91.56	5.45	2.99	99.37	0.42	0.21
	未来	90.30	6.35	3.35	98.87	0.73	0.39
强度/10 ⁴	现状	36.59	1.36	1.86	17.65	0.19	0.91
	未来	66.23	2.91	3.83	32.23	0.60	3.19

续以“点—轴”组织模式为基础的“轴带”结构,菱形区域以外的西部地区仍将持续点状集聚的发展阶段。

(3) 随着中国综合交通运输体系建设进入创新驱动下追求质量效益和一体化融合发展的新阶段,未来应从支撑与引导、整合与衔接、效率与公平等方面持续优化交通服务的供给结构。具体而言,一是引导和适应多中心网络化的空间结构,按照适度超前的要求,根据需求发生与增长的空间格局依次展开,重点围绕菱形顶点区域,满足城市群间密集的人员和物资需求,进一步提高菱形顶点区域对外围地区的辐射吸引能力,服务区域协调发展、满足国土开发需求;二是聚焦城市群和区域中心城市,推进综合交通枢纽和快速交通网络建设,促进不同部门和空间尺度设施体系与运输服务的整合与衔接,满足城市群地区高密度、高增长、个性化和多样化的出行和运输需求;三是遵循绿色集约的发展路径,针对不同的区域采取差异化的运输服务供给方式,在胡焕庸线以东的人口密集区域,重视运输服务的多样化与个性化,胡焕庸线以西地区更加强调运输服务的公平性。

(4) 需要指出的是,交通运输对区域发展的影响并不是一种机械的、决定论的影响,而是以经济社会活动为媒介实现的一种富有弹性的影响力。本文仅在宏观层面从设施体系建设出发,解析了城市网络通达性演化对区域发展格局的潜在影响,未来仍需要通过深入解析交通因素在经济社会空间组织中的地位 and 作用,结合交通技术演进和新模式、新业态的涌现,更加细致地刻画综合交通地理格局演化的规律与趋势,为交通建设与区域协调发展提供更加具有操作性的措施建议。

参考文献(References)

- [1] 金凤君. 基础设施与经济社会空间组织 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 87-95. [Jin Fengjun. Infrastructure and spatial organization. Beijing, China: Science Press, 2012: 87-95.]
- [2] 金凤君, 陈卓. 1978年改革开放以来中国交通地理格局演变与规律 [J]. 地理学报, 2019, 74(10): 1941-1961. [Jin Fengjun, Chen Zhuo. Evolution of transportation in China since reform and opening-up: Patterns and principles. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(10): 1941-1961.]
- [3] 樊杰, 王亚飞. 40年来中国经济地理格局变化及新时代区域协调发展 [J]. 经济地理, 2019, 39(1): 1-7. [Fan Jie, Wang Yafei. Pattern evolution of China's economic geography in the past 40 years and regional coordinated development in the new era. Economic Geography, 2019, 39(1): 1-7.]
- [4] 胡焕庸. 国内交通与等时线图 [J]. 地理学报, 1936, 3(4): 761-774. [Hu Huanyong. Domestic transportation and the isochron map. Acta Geographica Sinica, 1936, 3(4): 761-774.]
- [5] Li S M, Shum Y M. Impacts of the national trunk highway system on accessibility in China [J]. Journal of Transport Geography, 2001, 9(1): 39-48.
- [6] 蒋海兵, 张文忠, 祁毅, 等. 区域交通基础设施可达性研究进展 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(5): 807-817. [Jiang Haibing, Zhang Wenzhong, Qi Yi, et al. Research progress on accessibility to regional transportation infrastructure. Progress in Geography, 2013, 32(5): 807-817.]
- [7] 吴威, 曹有挥, 梁双波. 20世纪80年代以来长三角地区综合交通可达性的时空演化 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 619-626. [Wu Wei, Cao Youhui, Liang Shuangbo. Temporal and spatial evolution of integrated transport accessibility in the Yangtze River Delta: 1986-2005. Progress in Geography, 2010, 29(5): 619-626.]
- [8] Axhausen K W, Froelich P, Tschopp M. Changes in Swiss accessibility since 1850 [J]. Research in Transportation Economics, 2011, 31(1): 72-80.
- [9] Joe W. The evolving interstate highway system and the changing geography of the United States [J]. Journal of Transport Geography, 2012, 25: 70-86.
- [10] 吴威, 曹有挥, 曹卫东, 等. 开放条件下长江三角洲区域的综合交通可达性空间格局 [J]. 地理研究, 2007, 26(2): 391-402. [Wu Wei, Cao Youhui, Cao Weidong, et al. On the patterns of integrated transportation accessibility in the Yangtze River Delta under opening conditions. Geographical Research, 2007, 26(2): 391-402.]
- [11] 金凤君, 王姣娥. 20世纪中国铁路网扩展及其空间通达性 [J]. 地理学报, 2004, 59(2): 293-302. [Jin Fengjun, Wang Jiao'e. Railway network expansion and spatial accessibility analysis in China: 1906-2000. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 293-302.]
- [12] 陈洁, 陆锋, 程昌秀. 可达性度量方法及应用研究进展评述 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 100-110. [Chen Jie, Lu Feng, Cheng Changxiu. Advance in accessibility evaluation approaches and applications. Progress in Geography, 2007, 26(5): 100-110.]
- [13] 王成金, 程佳佳. 中国高速公路网的可达性格局及演化 [J]. 地理科学, 2016, 36(6): 803-812. [Wang Chengjin, Cheng Jiajia. Spatial pattern of expressway network accessibility and evolution in China. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 803-812.]
- [14] 王成金, 王伟, 张梦天, 等. 中国道路网络的通达性评价

- 与演化机理[J]. 地理学报, 2014, 69(10): 1496-1509. [Wang Chengjin, Wang Wei, Zhang Mengtian, et al. Evolution, accessibility of road networks in China and dynamics: From a long perspective. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1496-1509.]
- [15] 孟德友, 李小建. 中国省会城市高铁费用可达性及居民消费格局[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1055-1065. [Meng Deyou, Li Xiaojian. Spatial pattern of cost accessibility of provincial capital cities by high-speed rail and consumption in China. *Progress in Geography*, 2018, 37(8): 1055-1065.]
- [16] Jiao J J, Wang J E, Zhang F N, et al. Roles of accessibility, connectivity and spatial interdependence in realizing the economic impact of high-speed rail: Evidence from China [J]. *Transport Policy*, 2020, 91: 1-15.
- [17] Wang L, Zhang W Y, Duan X J. Understanding accessibility changes from the development of a high-speed rail network in the Yangtze River Delta, China: Speed increases and distance deductions [J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2019, 12(4): 1011-1029.
- [18] Jiao J J, Wang J E, Jin F J, et al. Impacts on accessibility of China's present and future HSR network [J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 123-132.
- [19] Zahn C T. Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1971, C-20: 68-86.
- [20] 陈卓. 城市化区域交通流发生的空间机理与效应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. [Chen Zhuo. Spatial organization of traffic flows in urbanized areas: Mechanism and patterns. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.]
- [21] 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[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 73-75. [Jin Fengjun. Organization mechanism of efficacy space and spatial welfare: Spatial organization and efficiency. Beijing, China: Science Press, 2013: 73-75.]
- [22] 樊杰, 梁博, 郭锐. 新时代完善区域协调发展格局的战略重点[J]. 经济地理, 2018, 38(1): 1-10. [Fan Jie, Liang Bo, Guo Rui. Strategic emphasis of regional coordinated growth pattern optimization in the new era of socialism with Chinese characteristics. *Economic Geography*, 2018, 38(1): 1-10.]
- [23] 金凤君. 论地域生存空间的认知与建构[J]. 地理研究, 2013, 32(7): 1356-1363. [Jin Fengjun. Cognition and constitution of territorial living space. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1356-1363.]

Simulation of city network accessibility and its influence on regional development pattern in China based on integrated land transport system

CHEN Zhuo^{1,2}, LIANG Yi³, JIN Fengjun^{1,2,4*}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China;

4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the increasing emphasis on coordinated regional development, transport and socioeconomic developments in China have taken a new turn in recent years. Based on the present and future integrated land transport network, the trend of city network accessibility and its impact on the change of regional development patterns in China were analyzed in this study by focusing on the construction of travel circles and regional balance. The results show that the completion of the existing planning can greatly improve the accessibility of China's city network and can largely support the construction of travel circles according to the shortest travel time. By promoting the development of hub-spoke organization mode and spatial cascading order, the existing planning can guide the multi-center and networking development of spatial structure and provide a basis for the coordinated and balanced development between regions. In the future, China's transport development should continue to optimize the supply structure of transportation services and improve the ability of the integrated transport system to serve the needs of people's daily lives and production.

Keywords: city network; accessibility; regional development pattern; spatial analysis; China