引文格式：张海军,李丹,代莎,等. 基于矩阵特征分解的中原经济区高铁发展分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 7-11. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.08.002

基于矩阵特征分解的中原经济区高铁发展分析

张海军[1]，李　丹[2*]，代　莎[3]，蒋国富[1]
（1. 南阳师范学院 地理科学与旅游学院，河南 南阳 473061；2. 广东财经大学 文化旅游与地理学院，广东 广州 510320；
3. 南阳师范学院 公共外语教学部，河南 南阳 473061）

摘　要：针对基于位置的空间可达性研究中位置空间成本矩阵存在缺值导致可达性指标无法计算的问题，提出以矩阵特征分解作为替代方法。基于12306网站和网络地图在线服务取得旅行时间成本矩阵并转换为空间权重矩阵，以矩阵特征分解得到的优势度指数作为基本评价指标对中原经济区2017—2021年间的高铁发展进行分析和评价。结果表明矩阵特征分解法是评价部分矩阵元素缺值时空间可达性评价的一种有效替代方法，2021年中原经济区高铁发展空间集聚水平比2017年略下降，南北向和东西向“十”字交叉格局有弱化趋势，同时高铁发展没有显著的空间不均衡现象，但某些高铁发展水平较低，且在研究时段内受益较少的地级市单元在今后的高铁规划中应给予重点关注。

关键词：矩阵特征分解；空间权重矩阵；空间可达性；空间公平；中原经济区
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0007-05

Development Analysis of High-speed Rail in the Central Plains Economic Region Based on Matrix Eigendecomposition Method

ZHANG Haijun[1], LI Dan[2], DAI Sha[3], JIANG Guofu[1]
(1. School of Geography and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;
2. School of Culture Tourism and Geography, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China;
3. Department of College English Teaching & Studies, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: In the study of employing location-based spatial accessibility (LBSA) methods, accessibility indices cannot be calculated for those locations where some missing values exist in the cost matrix. Aiming at the mentioned above problem, we used the matrix eigendecomposition (ME) to replace LBSA in the current study. Taking the central plains economic region (CPER) in China as the study area, we obtained the travel time cost matrices derived from the 12306 website and the online map-based services, transformed it into spatial weights matrices (SWM), and analyzed and evaluated the development of high-speed rail from 2017 to 2021. The results show that being a valid alternative to the LBSA with some missing value in the evaluated locations (units), the ME method demonstrates a good effect when applied in the CPER in China. Compared with 2017, the spatial agglomeration level of high-speed rail decreases slightly and the spatial pattern with the “cross” shape of north-south direction and west-east direction has a weakening tendency in 2021. Significant spatial inequity does not exist in the CPER. Some prefecture-level cities with a low level of high-speed rail development and less benefit during the study period should be paid attention to in the future high-speed rail planning.

Key words: ME, SWM, spatial accessibility, spatial equity, CPER

交通基础设施建设在经济发展中扮演着重要角色，被看作是经济增长的催化剂[1]，其中高速交通线路开通引起的区域内城市可达性改善，在提高区位优势、增强城市竞争力、拉动经济增长等方面会产生明显的正面效应[2-3]。空间可达性由供需分布和供需方在空间上的连接方式确定，一般可分为显式空间可达性和潜在空间可达性，已广泛应用于网络分析、交通规划、土地利用、公共设施评价等相关领域的研究中[4-7]。显式空间可达性考虑供应方提供服务的实际使用情况（如频数、服务满意度等），需要详细的观测数据。潜在空间可达性考虑服务的可能使用情况，因其可操作性强被广泛用于交通网络研究中[8-10]。在研究方法方面，交通网络可达性度量主要包括基于设施的度量法、基于位置的度量法、基于个人的度量法和基于效用的度量法等[11]。因其较低的数据要求、结果容易解释、无需先验假设等，基于位置的可达性度量

收稿日期：2022-08-03。
项目来源：河南省科技厅软科学研究项目（172400410339）；广东省社科规划一般项目（GD20CGL39）。
第一作者简介：张海军（1978—），硕士研究生，副教授，主要研究方向为地理空间分析与建模，E-mail：hjzhangny@126.com。
通信作者：李丹（1980—），博士研究生，讲师，研究方向为地理模拟与空间优化，E-mail：danli@gdufe.edu.cn。

法得到了广泛应用[12]。基于位置的可达性度量方法主要包括距离法[4-5, 13]、重力模型法[8, 14-15]、等值线法[4, 16]、平衡系数法[17]等。不管是同时考虑供需规模、距离衰减和供需自身竞争的平衡系数法，还是考虑供需规模和距离衰减效应的重力模型法，抑或是只考虑网络流动成本而不考虑作用力规模和距离衰减效应的距离法，兴趣位置间的成本矩阵都是基于位置的可达性度量的基本要素。一旦成本矩阵中某些矩阵元素值缺失，将使得上述基于位置的可达性度量指标的计算变得不可行，从而导致度量方法失效。而在基于位置可达性度量的高速公路、高速铁路、航空等高速交通发展评价研究中，矩阵元素缺值是事实上普遍存在的。已有研究要么不考虑缺值元素对应的空间单元[4]，要么把无高速交通的网络节点按规划路线长度除以规划速度计算运行时间[3, 8]，除此以外，目前尚未发现更合适的解决办法。直接删除空间单元或者按规划值计算的方法并不科学，因此建立针对部分矩阵元素缺值时仍然有效的评价方法非常必要。

中原经济区是中国中部崛起战略的重要引擎，也是中国区域经济协调发展的战略支点[18]。该区域位于中国腹地，交通区位重要，区内的公路和铁路建设水平较高，目前已建成的高速铁路主要有石武客运专线、郑西客运专线、郑徐客运专线、京沪高铁等。高铁对中原经济区交通通达度的改善和区域发展格局产生着重要影响[3, 19]。鉴于高铁的重要地位和区域协调发展的总体要求，对中原经济区的高铁发展进行分析和评价具有重要现实意义。本研究以中原经济区的30个地级市和2个县级市为铁路网络的结点，基于12306网站和网络地图在线服务构建旅行时间成本矩阵，然后将旅行时间成本矩阵转换为空间权重矩阵，通过对空间权重矩阵的特征分解得到反映网络节点位置相对优势度的指标，从而对2017—2021年间的高铁发展状况进行分析和评价。本研究的目的为：①建立一种网络成本矩阵元素存在缺值时的高铁发展评价方法，作为对现有基于位置的交通可达性评价方法的有益补充；②为中原经济区的交通规划、区域经济可持续发展研究等提供参考和借鉴。

1 研究方法

1.1 研究区概况

作为中国中部最具发展潜力的区域，中原经济区涵盖了河南省全域及周边相邻省份共30个省辖市、232个县，区域面积28.9万 km^2。截至2017年底，总人口16 529.78万人，生产总值68 616.33亿元，经济总量仅次于长三角、珠三角、京津冀及长江中游城市群，为全国经济第五增长极。该区是中国“两横三纵”城市化战略格局中陆桥通道和京广通道的交汇区域，在全国综合交通运输网络中具有重要的地位[18]。

1.2 OD对旅行时间成本矩阵

OD对旅行时间成本矩阵（origin destination matrix，ODM）基于12306网站和网络地图在线服务功能获取。为表征地级市之间的平均旅行时间，以OD对之间两城市行政中心的旅行时间作为两城市的平均旅行时间，因此ODM中的起点O和终点D为中原经济区的30个地级城市和东平、凤台2个县级城市的行政中心，ODM中时间的单位统一采用min。2017年的数据获取时间为9月10日—9月20日的出行非繁忙时段，2021年的数据获取时间为2021年7月10日—7月20日的出行非繁忙时段。

铁路交通的ODM分为普通铁路ODM（PT_ODM）和高速铁路ODM（GT_ODM）2种，PT_ODM和GT_ODM中矩阵元素值的计算见公式1。

$$T_{ij}=t_i+t_{ij}+t_j \tag{1}$$

式中，T_{ij} 为城市 i，j 之间的最短旅行时间值；T_{ij} 为按指定铁路交通方式（PT、GT）的城市 i、j 火车站之间的最短旅行时间值；t_i 为城市 i 行政中心到城市 i 火车站间的最短旅行时间值；t_j 为城市 j 行政中心到城市 j 火车站间的最短旅行时间值。t_{ij} 通过12306网站和在线地图路径规划服务功能获取，t_i 和 t_j 均为通过在线地图路径规划服务功能获取的非繁忙时段的最短旅行时间。对于 t_{ij}，若 i，j 间有直达车，取直达车的最短旅行时间；若无直达车，取在线地图路径规划服务或12306网站提供的接续换乘方案下的最短旅行时间（2017年9月12306网站尚未上线接续换乘功能，因此使用在线地图路径规划服务获取时间值），该时间已包括换乘等待时间。换乘方案情况有3种：①换乘线路均为高铁，则可取得GT的 t_{ij}，认为无PT换乘方案；②换乘线路均为普通铁路，则可取得PT的 t_{ij}，认为无GT换乘方案；③换乘线路为GT、PT混合线路，2种方式的总运行时间作为GT的 t_{ij}，认为无PT换乘方案。无换乘方案时，t_{ij}=NA（假定实际中不考虑该种交通方式）。高德地图和百度地图均提供了跨城混合交通方式路线规划服务，但高德地图服务比百度地图服务更为方便和直观，同时换乘/非

换乘结果也可通过12306网站验证，因此本研究采用高德地图获取基于铁路交通的行政中心至火车站的最短旅行时间。

为空间权重矩阵元素中 k 值的优化，获取了2017年普通公路（PL）和高速公路（GS）的ODM。PL_ODM中的旅行时间为Google地图和百度地图中非高速出行方式最短驾车旅行时间的平均值，GS_ODM中的旅行时间为采用Google地图和百度地图的高速出行方式最短驾车旅行时间的平均值。

1.3　空间权重矩阵

空间权重矩阵（spatial weighting matrix，SWM）是量化观测单元之间空间依赖关系的重要工具，是衡量区域空间效应的重要变量[20]。SWM的外生构建法主要包括基于邻接关系的构建法、基于距离函数的构建法、基于邻接关系和距离函数的组合构建法、基于离散点的构建法等[21]。不管如何设定，构建SWM的初衷都是尽可能真实地刻画空间依赖关系。本研究将从通行时间角度构建SWM以反映基于不同交通方式城市间联系的相对成本。

1.3.1　空间权重矩阵的构建

本研究的SWM中非对角线元素以 $W_{ij}=(\frac{1}{T_{ij}})^k$ 计算，T_{ij} 为NA的元素和对角线上的元素都赋0值，k 用来捕获距离衰减效应。每当设定一个 k 值，每种ODM可对应生成一种SWM。在构建PT_ODM和GT_ODM时，无直达车且无推荐换乘方案时，对应矩阵元素将赋NA值。此规则导致PT_ODM中有少量NA值，GT_ODM中个别城市所有矩阵元素均为NA值，这造成了对应SWM特征分解的困难。因此，采用把原始GT_ODM中值为NA的元素用PT_ODM中对应元素替换的处理办法，将替换后的结果矩阵作为GT_ODM用来生成对应的GT_SWM。

1.3.2　空间权重矩阵的特征分解

把SWM以 $w'_{ij}=w_{ij}/\sum_{j\in J}w_{ij}$ 进行行标准化处理，则 $w'_{ij}\geqslant 0$，且对于城市 i，到达所有其他城市 j 的 w'_{ij} 的总和，即 $\sum_{j\in J}w'_{ij}=1$。进行标准化后的SWM（W）等同于马尔科夫链转移矩阵。对于一些 n（>0）和所有 i、j，假定该马尔科夫链是各态历经的，则可取得一个唯一的平稳分布 $\boldsymbol{p}_j>0(\sum_j \boldsymbol{p}_j=1.0)$ 的解[22]。

$$W^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}=\boldsymbol{p}\quad \text{or}\quad \sum_i \boldsymbol{p}_i w_{ij}=\boldsymbol{p}_j \tag{2}$$

式中，向量 $\boldsymbol{p}$ 的转置，即 $\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{p}_1,\cdots,\boldsymbol{p}_n)$ 是 W^{T} 的特征值为1的特征向量；w'_{ij} 为城市 j 对城市 i 相对影响的一种量度；$\boldsymbol{p}_i$ 为一个表征相对优势度的指标（本文称为优势度指数），可解释为在交通可达性方面城市 i 在研究区总体影响的大小或所居地位的高低。

1.3.3　空间权重矩阵元素 $(\frac{1}{T_{ij}})^k$ 中 k 值的优化

在SWM的矩阵元素 $W_{ij}=(\frac{1}{T_{ij}})^k$ 中，k 值用来捕获距离衰减效应，越小的 k 值意味着旅行时间的影响越小。与引力模型中距离摩擦系数相似，更小的 k 值使得计算得到的优势度指数的方差更小，从而产生更强的空间平滑效应。或因目标函数需绑定具体问题，或因辅助数据难以获取，当前缺少确定最优 k 值的一般性指导准则。通常通过设定多个 k 值对结果的变异程度进行评估来探查 k 值对建模结果的敏感性[7]。本研究中的优势度指数和空间可达性研究中的平均旅行时间具有一定的相似性，普通公路ODM和高速公路ODM矩阵元素无NA值，考虑到优势度指数和平均旅行时间是方向相反的2个指标，本研究对平均旅行时间取倒数转换为与优势度指数同向的指标。当 k 取不同值时，分别计算公路交通方式下优势度指数和平均旅行时间倒数的线性拟合 R^2 值，R^2 取最大值时对应的 k 值作为最优 k 值。把该最优 k 值也用作PT_SWM和GT_SWM的最优 k 值。

2　结果与分析

2.1　旅行时间矩阵和空间权重矩阵

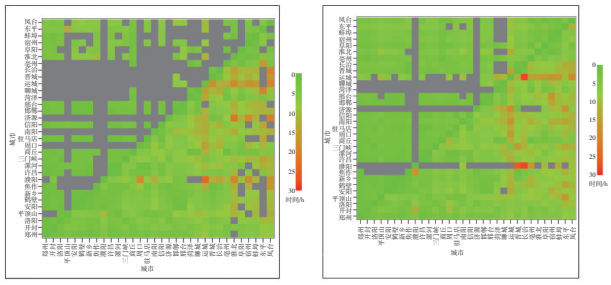
图1a和1b分别为2017年和2021年的铁路双向平均旅行时间矩阵，图1中的上三角为高铁出行方式，下三角为普铁出行方式。在矩阵创建时，若同一城市对的2个方向中有一个NA值，以非NA的那个值作为平均值；若2个方向均为NA值，则取NA值（图1中的灰色单元为NA值单元）。从图1可看出，虽然2017年大多数城市对间的高铁线路不连通，小部分城市在2021年也未连通，但高铁发展均表现出明显的时空收敛效应。高铁发展使得所连通的城市对之间平均节省时间，2017年为2.6 h，2021年为2.9 h。

当 $k=-0.2$ 时，普通公路（图2a）和高速公路（图2b）的优势度指数与平均旅行时间倒数的线性拟合 R^2 均取得最大值。故2017年和2021年普铁和高铁采用的SWM均为 $k=-0.2$ 时的SWM。

2.2　中原经济区高铁发展分析

2.2.1　高铁优势度分析

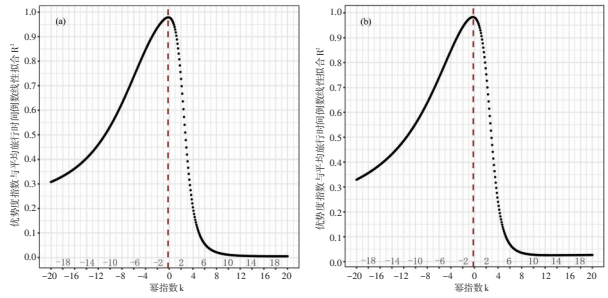
优势度指数是表征某一市级单元对整个研究区总的影响大小或该单元在整个研究区所居地位的一种相



a 2017年时间矩阵　　b 2021年时间矩阵

图1 双向平均旅行时间矩阵

注：上三角为高铁出行，下三角为普铁出行。



a 普通公路　　b 高速公路

图2 优势度指数与平均旅行时间倒数的线性拟合 R^2

对度量指标。整个研究区所有单元优势度指数的总和值为1，指定单元优势度指数值的变化反映了其在整个研究区所处地位的变化。其中优势度指数的Moran’s I值从2017年的0.203降为2021年的0.184（2021），表明高铁发展的空间集聚整体上呈下降趋势。这说明随着更多高铁线路的开通，区域内的高铁发展从原有集中的几个单元扩展到大多数单元，区域内大多数单元获得了更为便利的高铁服务。

具体来说，随着郑州–万州、郑州–太原、郑州–凤台、商丘–阜阳等新高铁线路的开通，2017年显著的南北向和东西向“十”字交叉格局趋于弱化，整体形成向圈层格局演化的态势。从2017年到2021年，等级未发生变化的单元共20个，其中，第一梯队7个（郑州、开封、洛阳、许昌、新乡、鹤壁、安阳）；第二梯队4个（邢台、邯郸、漯河、驻马店），第三梯队4个（宿州、亳州、蚌埠、凤台）；第四梯队5个（运城、长治、聊城、濮阳、东平））；升了1个等级的共5个（商丘、平顶山、阜阳、晋城、南阳）；降了1个等级的共5个（焦作、三门峡、信阳、济源、菏泽），周口升了2个等级，淮北则降了2个等级。

2.2.2 高铁发展受益程度分析

以优势度指数的均值为断点分为两类，低于均值的单元的发展水平称为“低水平”，高于均值的单元的发展水平称为“高水平”。用2021年的优势度指数值减去2017年的优势度指数值，若计算结果为正值，说明指定单元在整个研究区的地位升高（该单元受益较多），反之，若为负值说明指定单元在整个研究区的地位降低（该单元受益较少）。研究时段内均为高水平的单元仍然呈现出与区域内主要高铁线路一致的南北向和东西向“十”字交叉格局特征。晋城、平顶山、周口、阜阳、亳州由2017年的低水平变为2021年的高水平，这可能主要得益于在此期间新开通的郑州–万州、郑州–太原、商丘–阜阳等高铁，其对原来无高铁的上述单元的优势度指数提高有明显作用。被“十”交叉型主要高铁线路分割的分别位于东北（聊城、濮阳、菏泽、东平）、西北（长治、运城、济源）、西南（南阳）、东南（宿州、淮北、蚌埠、凤台）的12个单元在研究时段内高铁发展均为低水平，这说明虽然部分城市有新高铁线路开通，但相对整个区域来说其交通优势度仍较低。从受益程度来看，相对2017年，得益于研究时段区域内多条新高铁线路的开通，32个单元中的18个在研究时段内高铁发展受益较多（即原来无高铁或水平低，新高铁线路的开通导致其优势度相对提高），14个受益较少（即原来有高铁且水平较高，但新高铁线路开通导致了其优势相对下降）。

2.2.3 高铁发展空间公平评价

如何准确定义空间公平，以及如何基于空间公平理论进行实证研究仍缺乏标准的框架[23]。本研究通过对分析单元上的人口百分比（相对需求）与优势度指数（相对供给）匹配关系的度量进行高铁服务空间公平评价[24]。从2017和2021年的人口百分比以及优势度指数与人口百分比双变量LISA显著性分析结果可看出，2017年和2021年人口百分比等级分布非常相似，仅个别单元存在等级差异，如开封、宿州、阜阳、信阳。优势度指数与人口百分比双变量LISA显著的单元，2017年和2021年完全相似，“高–高”类型包括3个单元（开封、驻马店、信阳），即这些单元享有高的高铁服务，同时也有高的人口百分比。运城为“低–低”类型单元，即运城享有低水平的高铁服务，同时其人口百分比也低。中原经济区的其他28个地级单元，高铁服务相对供给（优势度指数）和高铁服务相对需求（人口百分比）的匹配关系类型均不显著。综上可知，在地市级空间尺度上，中原经济区内高铁服务目前不存在显著空间不公平现象（不含“高–低”和“低–高”类型）。

3 讨论和结论

3.1 讨　论

基于位置的可达性度量方法已广泛用于交通发展

评价中[4, 8, 11, 13, 14–15]，但网络节点间成本矩阵元素的缺值会导致可达性指标计算的困难。本文基于矩阵特征分解的评价方法与基于位置的可达性度量方法相似，可作为网络矩阵存在缺值元素时基于位置的可达性度量方法的一种有效替代。通过对矩阵特征分解得到的优势度指数的变化，对高铁发展的损益、高铁发展的空间公平进行评价，本研究的框架可为区域高速交通均衡发展规划提供有力支撑，可为该区交通管理、规划人员提供参考。本研究仅从通行时间成本角度构建SWM（即只考虑距离衰减效应），如果在SWM中添加作用力规模、供需自身竞争等要素，则可取得与重力模型法和平衡系数法类似的效果。

3.2 结　论

通过构建反映地级单元间联系难易程度的SWM，并基于SWM的特征分解得到的优势度指数对中原经济区的高铁发展进行分析和评价，得出了以下几个主要结论：

1）在基于位置的可达性度量指标计算时，矩阵缺值元素关联的评价单元无法实现，矩阵特征分解法是评价单元部分矩阵元素缺值时的一种有效替代方法。在中原经济区高铁发展分析及评价中，利用矩阵特征分解生成的优势度指数作为基本评价指标取得了较好的效果。

2）整体上看，随着新高铁线路的开通，更多地级市可获得较便利的高铁服务，高铁发展的空间集聚水平呈下降趋势。均为高水平的地级单元虽然仍呈现与区域内主要高铁线路一致的南北向和东西向“十”字交叉格局，但这种格局随着新高铁线路的开通趋于弱化，并有进一步演化的趋势。在2017年到2021年的高铁发展中，32个地级市单元中的18个受益较多，14个受益较少。

3）基于相对需求与相对供给匹配的空间公平度量结果表明，中原经济区内高铁服务目前不存在显著的空间不公平现象。

4）运城、济源、聊城、濮阳、菏泽、淮北这些高铁发展水平低，在2017—2021年的高铁发展中又受益有限的单元在今后的高铁规划中应给予重点关注。

参考文献

[1] Zhao J, Yu Y, Wang X, et al. Economic Impacts of Accessibility Gains: Case Study of the Yangtze River Delta[J]. Habitat International, 2017, 66(10): 65-75

[2] 刘欢，孟德友. 高铁背景下省会城市交通优势度空间分异及影响因素[J]. 世界地理研究，2022，31(1):107-119

[3] 俞路. 高铁新时代下中国铁路交通可达性分布格局及其均衡程度的研究[J]. 世界地理研究，2020，29(6):1 148-1 160

[4] 王慧，张梅青. 高铁对京津冀地区可达性及经济联系的影响[J]. 地理科学，2021，41(9):1 615-1 624

[5] 刘书舟，韩增林，郭建科. 高速铁路对东北城市网络结构的空间影响[J]. 地理科学，2020，40(2):270-279

[6] 姜博，初楠臣，修春亮，等. 中国“四纵四横”高铁网络可达性综合评估与对比[J]. 地理学报，2016，71(4):591-604

[7] Wang F H. Quantitative Methods and Socio-economic Applications in GIS (2nd ed.) [M]. CRC Press, 2014: 93-113

[8] Hou Q, Li S M. Transport Infrastructure Development and Changing Spatial Accessibility in the Greater Pearl River Delta China 1990—2020[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(6):1 350-1 360

[9] Guzman L A, Oviedo D, Rivera C. Assessing Equity in Transport Accessibility to Work and Study: the Bogotă Region[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 58(9): 236-246

[10] Rokicki B, Stepniak M. Major Transport Infrastructure Investment and Regional Economic Development: An Accessibility-based Approach[J]. Journal of Transport Geography, 2018, 72(11):36-49

[11] Geurs K T, Wee B. Accessibility Evaluation of Land-use and Transport Strategies: Review and Research Directions[J]. Journal of Transport Geography, 2004, 12(2): 127-140

[12] Wang Y F, Chen B Y, Yuan H, et al. Measuring Temporal Variation of Location-based Accessibility Using Space-time Utility Perspective[J]. Journal of Transport Geography, 2018, 73(9):13-24

[13] Kim H, Sultana S. The Impacts of High-speed Rail Extensions on Accessibility and Spatial Equity Changes in South Korea from 2004 to 2018[J]. Journal of Transport Geography, 2015, 45(12):48-61

[14] Ortega E, López E, Monzón A. Territorial Cohesion Impacts of High-speed Rail at Different Planning Levels[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 24(5):130-141

[15] Mohíno I, Ureña J M, Solís E. Transport Infrastructure and Territorial Cohesion in Rural Metro-adjacent Regions: A Multimodal Accessibility Approach. The Case of Castilla-La Mancha in the Context of Madrid (Spain) [J]. Journal of Transport Geography, 2016, 57(8):115-133

[16] Jin F J, Jiao J J, Qi Y J, et al. Evolution and Geographic Effects of High-speed Rail in East Asia: An Accessibility Approach[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(5):

（下转第67页）