文章编号：1003-1421(2025)12-0099-09
引用格式：杨楠，王家祺，魏杰，等.复杂加权网络视角下西北地区铁路网络客运能力研究[J].铁道运输与经济，2025，47(12)：99-107，117.
YANG Nan，WANG Jiaqi，WEI Jie，et al. Research on Passenger Capacity of Railway Network in Northwest China from Perspective of Complex Weighted Network[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：99-107，117.

复杂加权网络视角下西北地区铁路网络客运能力研究

杨 楠[1]，王家祺[2]，魏 杰[2,3]，王建强[2,3]，闫亭宇[2]

(1.中国铁路兰州局集团有限公司 科技和信息化部，甘肃 兰州 730000；2.兰州交通大学 交通运输学院，甘肃 兰州 730070；3.兰州交通大学 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室，甘肃 兰州 730070)

摘 要：为提升西北地区铁路网络服务效率，基于复杂加权网络视角，构建铁路网络客运能力评估指标体系，并进行网络布局优化。考虑到各城市铁路交通流的多样性，选择26个主要城市作为研究对象，建立考虑各城市间客运列车运行数量和相应运行速度等级的客运能力矩阵；构建基于客运能力矩阵的普速、高速铁路网，运用复杂加权网络模型，构建涵盖网络规模指标、网络形态指标、网络加权指标的铁路网络客运能力指标体系，具体包括度数中心度和中间中心度等核心指标、结合列车频次的平均旅行时间、经济总量和人口等指标刻画的铁路可达性指标。最后，从度数中心度、中间中心度和可达性3个维度，对铁路网络进行布局优化。结果表明，优化银川至延安段、格尔木至库尔勒段、敦煌至德令哈段、提升中卫至平凉段运能等对网络客运能力有不同程度的提升。以期为西北地区铁路网络发展和规划提供科学的理论支持。

关键词：西北地区；铁路网络；拓扑结构；客运能力；复杂加权网络
中图分类号：U293.1 **文献标识码：**A **DOI：**10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20241114005

Research on Passenger Capacity of Railway Network in Northwest China from Perspective of Complex Weighted Network

YANG Nan[1]，WANG Jiaqi[2]，WEI Jie[2,3]，WANG Jianqiang[2,3]，YAN Tingyu[2]

(1. Department of Technology and Information Technology, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to improve the service efficiency of the railway network in Northwest China, from the perspective of a complex weighted network, the evaluation index system of passenger capacity of the railway network was constructed, and the network layout was optimized. By considering the diversity of railway traffic flow in each city, 26 major cities were selected as the research object, and a passenger capacity matrix considering the number of passenger trains and the corresponding operating speed level

收稿日期：2024-11-14
通信作者：魏杰(1994—)，女，陕西渭南人，兰州交通大学交通运输学院讲师。
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023S022)；甘肃省青年科技基金资助项目(24JRRA264)

between cities was established. General-speed and high speed railway networks based on the passenger capacity matrix were constructed, and the complex weighted network model was used to construct a railway network passenger capacity index system covering network scale index, network form index, and network weighted index, including core indicators such as degree centrality and intermediate centrality, as well as railway accessibility indicators of average travel time of train frequency, economic aggregate, and population. Finally, the layout of the railway network was optimized from three dimensions: degree centrality, intermediate centrality, and accessibility. The results show that the optimization of the Yinchuan-Yan'an section, Golmud-Korla section, and Dunhuang-Delingha section and the improvement of the transportation capacity of the Zhongwei-Pingliang section have improved the passenger transport capacity of the network to varying degrees, so as to provide scientific theoretical support for the development and planning of the railway network in Northwest China.

Keywords: Northwest China; Railway Network; Topological Structure; Passenger Capacity; Complex Weighted Network

0　引言

西北地区铁路是沟通新疆、西藏、青海、甘肃、宁夏等省区与内陆腹地，连接亚欧大陆桥的重要走廊；是承东启西、连接“丝绸之路经济带”的关键桥梁；是服务“一带一路”倡议和“西部大开发”战略的重要支撑，在促进西北地区经济社会发展中的地位和作用至关重要。近年来，随着“一带一路”倡议的深入推进，西北地区与国内外其他地区的交流合作日益频繁，铁路客运需求持续增长且呈现出多样化的趋势，这对铁路网络的客运能力提出了更高的要求。

随着城市网络结构研究从早期的单一技术层面的关注向社会、经济、政治等内涵更丰富的层面不断拓展[1-2]，众多学者在宏观和城市内部的微观层面[3-4]上对全国的铁路网络进行了深入探讨，但其研究内容主要集中在经济联系的结构演变[3]、经济的可达性和联系模式[5]，以及城市之间的空间相互作用等方面[6]。在研究铁路网络客运能力的过程中主要采用空间和时间距离等传统的可达性模型，忽略了线路等级和运行速度等带来的影响。覃成林等[7]在研究中国铁路交通发展与沿线城市间经济增长收敛影响的基础上认为，传统可达性测度方法没有考虑到城市间铁路交通量差异性，很难真正体现可达性水平。为弥补这一缺陷，高玉祥等[8]利用改进的网络分析法和GIS技术分析了甘肃省可达性的空间分布格局及演化。张富涛等[9]则进一步考虑了各城市铁路交通流的异质性，通过引入列车频次加权平均旅行时间、经济联系总量及经济联系强度等指标，对铁路可达性及城市空间相互作用进行分析。此外，宋国栋等[10]运用可达性潜力模型，对“十一五”到“十三五”期间西北铁路网的可达性空间布局进行了深入分析，并利用社会网络分析手段，探讨了铁路网的发展如何影响某些城市的中心性和互联性。尽管当前研究已取得一定进展，但在针对西北地区铁路网络客运能力提升及网络结构优化方面的专项研究仍需加强，以期为西北地区铁路网络的未来发展提供更加科学、全面的指导。此外，传统的铁路网络研究方法往往侧重于对网络的拓扑结构进行简单描述，难以全面、准确地反映铁路网络在实际客运运营中的复杂特性和能力状况。

复杂加权网络理论提供了一种新的视角和方法。在复杂加权网络中，节点和边不仅具有连接关系，还被赋予了诸如运输能力等权重信息，这些权重能够更真实地刻画铁路网络中各线路和站点在客运过程中的实际承载能力、重要程度以及相互之间的影响关系。选取西北地区26个主要城市为研究单元，构建考虑各城市之间客运列车开行数目及相应的运行速度等级的客运能力矩阵。将构建的铁路网客运能力矩阵与Ucinet软件相结合生成一个全新的基于西北城市的普速、高速铁路网络图形。通过复杂网络分析各城市在铁路网上的各项指标，最后对铁路网络站点进行布局优化，为西北地区铁路网络的发展和规划提供理论依据。

1　研究方法

1.1　复杂加权网络模型

本研究复杂加权网络模型构建分为2大步骤：首先，构建基于Space L模型的铁路拓扑网络；然后，构建铁路网络“客运能力矩阵”。具体步骤如下。

将连接2个城市的普速铁路和高速铁路各自作为网络的边，考证各城市间存在连通的铁路线路，建立基于Space L模型的铁路拓扑网络。由于铁路线路是双向运行的，所构建的铁路物理网络呈现为一个无方向的网络结构。

国家铁路局官方网站对高速铁路的定义如下：①设计运行速度超过250 km/h；②初始运营速度超过200 km/h；③客运专线铁路。故C、G、D字头列车为高速客运列车，Z、T、K字头列车为普速客运列车。

基于构建的铁路拓扑网络与列车的速度等级，将各字头列车最高运行时速与中国铁路官网发布的列车开行数目加权求和。通式如下。

$$B_{ij} = s_l \cdot N_{ijl} \tag{1}$$

式中：B_{ij}指城市i与j之间的客运运力因子；l指客运列车字头标号；s_l表示客运能力矩阵中l字头列车占所有开行列车比重；N_{ij1}指城市i与j之间l字头客运列车开行数目。通过下列公式可分别计算普速、高速铁路网络客运能力矩阵。计算公式如下。

$$BP_{ij} = 1.6N_{ijZ} + 1.4N_{ijT} + 1.2N_{ijK} \tag{2}$$

$$BG_{ij} = 3.5N_{ijC} + 3N_{ijG} + 2N_{ijD} \tag{3}$$

式中：BP_{ij}和BG_{ij}分别表示城市i和j之间的普速、高速列车客运运力因子。

1.2　网络客运能力指标体系构建

综合考虑网络规模、网络形态与节点权重，构建涵盖3大类共11个指标的网络客运能力指标体系，铁路网络客运能力指标体系描述如表1所示。

2　西北地区复杂加权铁路网络构建

2.1　拓扑网络构建

在综合权衡GDP、人口数量、客运量和列车运行对数等多个因素后，选择西北5省(区)的省会城市(西安、银川、兰州、西宁和乌鲁木齐)以及与其相邻的次级城市，共计26个城市作为节点进行记录。西北城市普速和高速铁路网络拓扑图如图1所示。

表1　铁路网络客运能力指标体系描述

Tab.1　Description of index system for railway network's passenger capacity

分类	指标	含义	计算公式	变量解释
网络规模指标	节点度[11]	与城市i相连的城市j中存在铁路线路的条数	$k_i = \sum_{j=1}^{j=N} a_{ij}$	城市i与j间存在铁路线路，$a_{ij}=1$ 城市i与j间不存在铁路线路，$a_{ij}=0$
	线路条数	运营列车设置的固定运营线路总条数	$M = \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} a_{ij}$	
	运营里程	铁路营业线各线长度的总和	$L = \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} a_{ij} \cdot l_{ij}$	l_{ij}为城市i与j间线路长度，km
网络形态指标	复杂度[12]	网络中边数量M和节点数量N的比值	$\beta = \frac{M}{N}$	M为网络中边数量；N为节点数量
	连通度[13]	网络中实际连边占潜在最大连边的比例	$\lambda = \frac{M}{M_{\max}} = \frac{M}{3N-6}$	$3N-6$为全连通图的总连接边数
	圈数率[13]	从任何车站返回自身车站不经过同一区间2次的概率	$\partial = \frac{M-N+1}{2N-5}$	M为网络中边数量；N为节点数量
节点加权指标	中间中心度[14]	节点媒介程度	$C_B(i) = \frac{2\sum_{j<k}\frac{g_{jk(i)}}{g_{jk}}}{N^2-3N+2}$	g_{jk}为加权的城市j和城市k之间的直达线路，其中通过城市i的铁路线路为$g_{jk(i)}$，且$j \neq k \neq i$，$j<k$
	度数中心度[14]	城市i与一系列相邻的城市的联系程度	$C_D(i) = \frac{\sum_j B_{ij}}{N-1}$	B_{ij}表示城市i与j之间开行列车的权重
	强度中心性[15]	站点与相邻站点连接边上列车发车数目	$s_i = \sum v_i f(\Delta t)$	V_i为节点i的相邻站点；$f(\Delta t)$为单位时间一天内开行列车列数，列
	紧密度中心性[16]	车站到达网络中其他站距离之和的倒数	$C_t = (N-1)\left[\sum_{j=1}^{N} d_{ij}\right]^{-1}$	d_{ij}为i，j两站的站间距离，km
	可达性[17-19]	从一个站点到另一个站点的容易程度	$A_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_j \times f(\Delta t)}{\sum_{j=1}^{n} T_{ij} \times P}$ $P_i = \sqrt{\mathrm{GDP}_i \times POP_i}$	T_{ij}为城市i与城市j之间的最短旅行时间，min；P_j为城市i的城市质量，选取GDP，亿元，常住人口数POP，万人

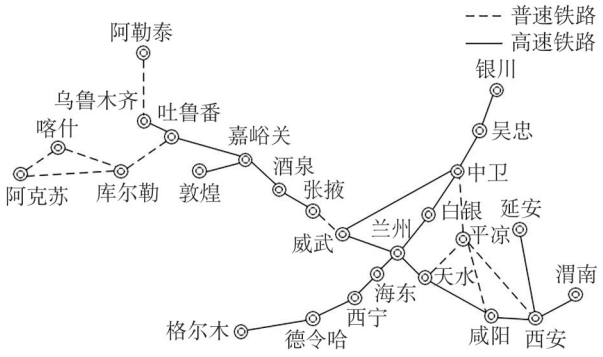

图1　西北城市普速和高速铁路网络拓扑图

Fig.1　Topology of conventional and high speed railway networks in Northwest China

2.2　客运能力矩阵构建

以26个目标城市为基础统计中国铁路官网发布的城市间C、G、D、Z、T、K 6类列车开行数目(包括双向，含始发车和过路车)，西北城市列车开行数目矩阵表如表2所示。

2.3　加权铁路网络构建

将计算得到的普速和高速客运能力矩阵带入Ucinet软件，拓扑后得到的铁路网络中各城市的联系不再基于地理坐标，而是基于城市之间直达列车开通情况、基于城市之间客运需求。西北城市普速铁路网络如图2所示，西北城市高速铁路网络如图3所示，2个城市之间的开行列车数量越多、列车运行速度越快，城市间渲染的线条就越粗，城市之间的客运能力越强。

3　西北地区铁路网络客运能力分析及布局优化

3.1　西北地区铁路网络客运能力分析

3.1.1　网络规模指标分析

使用Pajek软件对目标城市节点度、度分布进

表2　西北城市列车开行数目矩阵表　　列

Tab.2　Matrix of number of trains running in Northwest China

	西安	咸阳	延安	渭南	兰州	天水	平凉	白银	武威	张掖	嘉峪关	酒泉	敦煌	西宁	格尔木	德令哈	海东	银川	吴忠	中卫	乌鲁木齐	吐鲁番	库尔勒	阿克苏	喀什	阿勒泰
西安	0	52	29	71	103	88	3	5	15	19	18	8	2	45	2	1	8	32	18	6	13	13	1	1	1	0
咸阳	52	0	3	14	30	27	2	3	2	6	6	1	2	16	1	0	5	13	6	3	2	3	1	1	1	0
延安	29	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
渭南	71	14	4	0	19	16	1	0	5	0	0	0	0	4	0	0	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0
兰州	103	30	0	19	0	94	2	20	27	33	33	20	4	71	4	3	13	12	7	19	20	23	2	2	2	0
天水	88	27	0	16	94	0	1	0	7	16	17	8	2	2	0	0	5	0	0	0	12	13	0	1	1	0
平凉	3	2	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	5	0	0	0	0	0	0
白银	5	3	0	0	20	0	1	0	0	1	1	1	1	6	0	0	1	12	8	17	0	0	0	0	0	0
武威	15	2	0	5	27	7	0	0	0	8	6	6	1	0	0	0	0	3	2	6	0	0	0	0	0	0
张掖	19	6	0	0	33	16	0	1	8	0	31	21	3	24	0	0	1	1	1	1	20	21	2	2	2	0
嘉峪关	18	6	0	0	33	17	0	1	6	31	0	24	5	30	0	0	1	2	1	4	20	22	2	2	2	0
酒泉	8	1	0	0	20	8	0	1	6	21	24	0	2	18	0	0	1	1	1	2	9	10	1	1	1	0
敦煌	2	2	0	0	4	2	0	1	1	3	5	2	0	3	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0
西宁	45	16	0	4	71	2	0	6	0	24	30	18	3	0	10	9	12	7	2	9	19	20	1	1	1	0
格尔木	2	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
德令哈	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	9	8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
海东	8	5	0	2	13	5	0	1	0	1	1	1	0	12	0	0	0	3	1	5	1	1	0	0	0	0
银川	32	13	0	3	12	0	4	12	3	1	2	1	2	7	0	0	3	0	25	29	1	1	0	0	0	0
吴忠	18	6	0	2	7	0	0	8	2	1	1	1	1	2	0	0	1	25	0	13	0	0	0	0	0	0
中卫	6	3	0	1	19	0	5	17	6	1	4	2	1	9	1	1	5	29	13	0	3	3	0	0	0	0
乌鲁木齐	13	2	0	0	20	12	0	0	0	20	20	9	0	19	0	0	1	1	0	3	0	38	15	8	7	1
吐鲁番	13	3	0	0	23	13	0	0	0	21	22	10	0	20	0	0	1	1	0	3	38	0	10	9	8	0
库尔勒	1	1	0	0	2	0	0	0	0	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	15	10	0	9	8	0
阿克苏	1	1	0	0	2	1	0	0	0	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	8	9	9	0	7	0
喀什	1	1	0	0	2	1	0	0	0	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	7	8	8	7	0	0
阿勒泰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

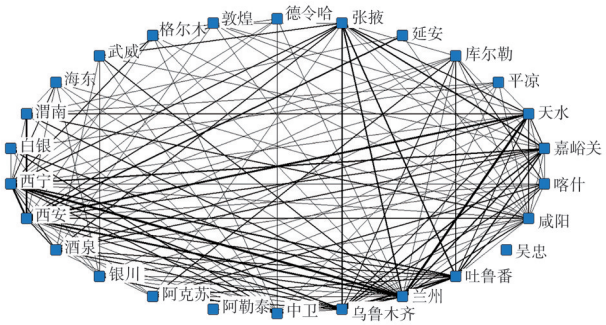

图2　西北城市普速铁路网络

Fig.2　Conventional railway network in Northwest China

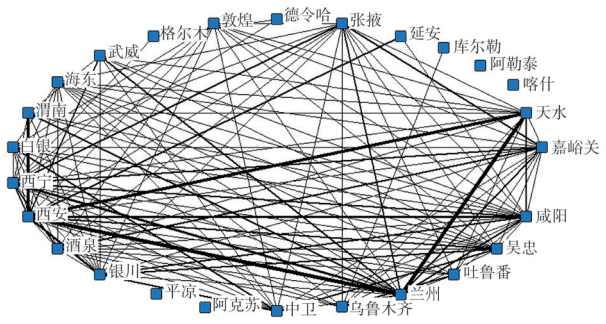

图3　西北城市高速铁路网络

Fig.3　High speed railway network in Northwest China

行计算，普速铁路网络规模指标如表3所示，高速铁路网络规模指标如表4所示，分别反映了西北地区普速铁路、高速铁路网络的节点度、节点个数、累计度分布、运营里程及线路条数。

表3　普速铁路网络规模指标

Tab.3　Conventional railway network size indicators

指标		数值				
节点度分布	节点度	1	2	3	4	5
	节点个数/个	6	8	7	4	1
	度分布/%	0.23	0.31	0.27	0.15	0.04
	累计度分布/%	0.23	0.54	0.81	0.96	1.00
运营里程/km		11 197				
线路条数/条		30				

表4　高速铁路网络规模指标

Tab.4　High speed railway network size indicators

指标		数值				
节点度分布	节点度	0	1	2	3	4
	节点个数/个	5	8	9	2	2
	度分布/%	0.19	0.31	0.35	0.07	0.07
	累计度分布/%	0.19	0.50	0.85	0.93	1.00
运营里程/km		6 201				
线路条数/条		21				

普速铁路线路总里程11 197 km，线路总条数30条，节点度分布不均匀，节点度为2占比最大为0.31；高速铁路线路总里程6 201 km，线路总条数21条，节点度为2同样占比最多为0.35，且有5个节点度为0。由上可知，普速铁路的网络规模较大，节点连接性也较好，高速铁路的网络规模较小，连接性也较差。

3.1.2　网络形态指标分析

对建立的西北铁路网络进行网络形态指标进行分析，依据表1中公式分别求解网络的复杂度、连通度、圈数率可得网络形态指标如表5所示。

表5　网络形态指标

Tab.5　Network pattern indicators

指标	铁路网络形态指标		复杂度	连通度	圈数率
	节点数/个	边数/条			
数值	26	30	1.154	0.417	0.106

从复杂度来看，铁路线路的交织状况较简单，复杂度为1.154，为小中型网络规模，不能像一些运输高度发达地区的铁路网络那样，出现多条线路、多节点缠绕在一起的结构模式；不能满足多方面的运输需求、应对复杂的地理环境。就连通度而言，各个区域之间的铁路连接不够紧密，计算得到的网络连通度仅为0.417，只能满足最基本的货物运输和旅客出行需求，城市与城市、地区与地区之间有很多连接薄弱点，部分重要的经济节点或资源集中地未能通过高效的铁路线路实现无缝对接。一般较发达的轨道交通网络圈数率在0.2~0.4之间，而西北地区铁路网络圈数率的数值为0.106，即西北地区的铁路网络中闭合的铁路环线少且规模有限，难以构建一个完整而高效的环形运输体系，无法通过环线实现对不同方向客货流的有效集散。

3.1.3　节点加权指标分析

由图2可知，西安与兰州、天水、渭南，西宁与兰州、西安、嘉峪关，乌鲁木齐与吐鲁番、张掖、嘉峪关之间的普速铁路客运能力较强；由图3可知，西安与兰州、天水、渭南，银川与西安、吴忠、中卫，兰州与西安、天水、西宁之间的高速客运能力处于西北领先地位，相反，平凉、库尔勒、阿克苏、喀什、阿勒泰这5个城市在高速铁路网络图中处于孤立状态，暂时还未开通通往其他西北城市的高速铁路线路。

利用Ucinet软件分别测量标准化后普速铁路网

络和高速铁路网络中各城市节点加权指标，西北地区城市节点加权指标如表6所示。

从地理空间分布的角度观察，西北5省(区)在列车开行数目和列车运行速度方面，呈现出显著的东西方向的梯度变化。东部地区的铁路网密度、强度较高，西安、兰州、天水3个城市强度中心性都为100以上；西部地区则相对较弱，新疆城市大多强度中心性不超过50。

从可达性指标数值来看，数值越高代表城市可达性越强。甘肃中部及关中地区优势明显，“丝绸之路”核心节点城市如嘉峪关、张掖、天水、吐鲁番可达性超过1.500，密集路网与较高城市质量赋予其优越交通便捷性。省会城市中，西宁、兰州可达性良好，西安、银川处于中等水平，乌鲁木齐因地域广阔、线路稀疏可达性受限。新疆、青海西部及陕北地区可达性较差，阿勒泰地处网络边缘，延安、平凉、喀什等因线路覆盖不足或位置偏远，指标均低于0.08。同时从紧密度中心性上来看几乎只有新疆地区紧密度中心性不超过0.000 7。

几个指标相同的地方是，西北5省(区)都呈现出以省会城市为中心辐射周边枢纽城市的“圈层”式路网布局，省会城市的中间中心度在其本省(区)都处于最高水平。以西安为核心的关中平原城市群，以兰州和西宁为中心的兰西城市群，其高速铁路网络已十分发达；以乌鲁木齐为核心的新疆铁路网络，以及青海部分城市构成的铁路网络，相较于关中地区和甘肃地区的铁路网络，在路网的覆盖范围和功能结构上都存在明显的差距。

从铁路开通的运行时间分布来看，兰新高速铁路的开通显著提高了沿线城市的交通便利性，沿线

表6　西北地区城市节点加权指标

Tab.6　Node weighting indicators in Northwest China

城市	普速铁路网		高速铁路网		铁路网络	铁路网络	s_i	$C_t(i)$	A_i
	$C_D(i)$	$C_B(i)$	$C_D(i)$	$C_B(i)$	$C_D(i)$	$C_B(i)$			
西安	0.224	24.961	0.193	29.609	0.209	55.567	155	7.05×10^{-4}	0.308
咸阳	0.070	21.250	0.070	29.609	0.073	43.167	81	7.16×10^{-4}	0.403
延安	0.022	0.000	0.008	0.000	0.012	0.000	29	5.77×10^{-4}	0.067
渭南	0.061	3.020	0.051	1.114	0.056	7.887	71	6.78×10^{-4}	0.241
兰州	0.278	28.904	0.155	11.109	0.193	35.567	154	9.65×10^{-4}	1.289
天水	0.150	4.776	0.097	6.871	0.114	9.554	122	8.20×10^{-4}	1.533
平凉	0.015	1.565	0.000	0.000	0.004	0.708	11	7.73×10^{-4}	0.068
白银	0.023	0.125	0.024	0.167	0.025	2.095	37	9.05×10^{-4}	0.477
武威	0.030	0.728	0.023	0.849	0.026	1.290	41	9.69×10^{-4}	0.565
张掖	0.150	3.261	0.036	4.300	0.066	9.391	29	9.15×10^{-4}	2.143
嘉峪关	0.167	5.017	0.033	4.300	0.068	9.391	51	8.52×10^{-4}	5.174
酒泉	0.088	3.698	0.025	4.300	0.042	9.391	45	8.60×10^{-4}	0.909
敦煌	0.009	0.658	0.009	0.786	0.009	1.034	5	7.05×10^{-4}	1.205
西宁	0.187	21.055	0.071	81.347	0.103	26.233	21	8.39×10^{-4}	1.376
格尔木	0.022	0.200	0.005	0.000	0.010	0.400	8	5.03×10^{-4}	0.371
德令哈	0.016	0.000	0.006	0.000	0.009	0.000	17	6.03×10^{-4}	0.896
海东	0.023	0.143	0.018	3.508	0.020	3.440	17	9.03×10^{-4}	0.549
银川	0.032	5.537	0.065	4.726	0.059	8.191	25	8.20×10^{-4}	0.294
吴忠	0.000	0.000	0.050	4.726	0.040	1.760	38	8.67×10^{-4}	0.436
中卫	0.060	14.575	0.036	2.679	0.043	21.724	41	9.58×10^{-4}	1.053
乌鲁木齐	0.163	24.558	0.020	20.000	0.057	50.423	39	5.25×10^{-4}	0.235
吐鲁番	0.175	1.558	0.010	0.000	0.052	2.423	70	5.51×10^{-4}	1.586
库尔勒	0.040	0.077	0.000	0.000	0.010	0.000	27	5.63×10^{-4}	0.135
阿克苏	0.039	0.168	0.000	0.000	0.010	0.182	16	2.89×10^{-4}	0.256
喀什	0.036	0.168	0.000	0.000	0.009	0.182	15	3.39×10^{-4}	0.076
阿勒泰	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	4.03×10^{-4}	0.013

城市的可达性逐渐趋于均衡，但同时沿线城市与非沿线城市之间的可达性差距也在扩大。新疆部分城市、青海部分地区的列车频次、列车运行速度仍然处于较低水平，这与城市的发展规模和地理区域相关，在今后的西部地区铁路规划中也可以通过开通新的线路带动西部地区发展，推动“陆上丝绸之路”进一步繁荣。

3.2　西北地区铁路网线路布局优化

基于上述研究，可以看出西北地区铁路分布并不平衡。从网络规模指标来看，急需规划部分地区的高速铁路网络弥补高速铁路、普速铁路网络的不均衡；从网络形态指标来看，目标铁路网络属于中小型网络，连接关系简单，网络复杂度、连通度、圈数率较低；从节点加权中心性指标来看，青海、新疆部分地区中间中心性、强度中心性需要加强；针对可达性问题，可以考虑增开高速铁路以提升运能。为了提升西北地区铁路网络的客运能力，优化资源部署，可以考虑着重优化度数中心度、中间中心度、可达性3项指标。度数中心度反映了节点与其他节点的连接紧密程度，有助于促进资源流动与整合，提高网络稳定性；中间中心度可以帮助确定网络中的核心节点，有助于合理分配资源；优化可达性则可以降低运输成本，提高物流效率。为了形成高速客运网络不断拓展，普速干支线网络不断优化，现代综合交通枢纽不断完善的路网格局，以下将重点从优化度数中心度、优化中间中心度、优化可达性3个角度提出铁路网络布局优化方案。

3.2.1　优化度数中心度

西北地区铁路网络在布局上呈现出极为明显的不均衡态势。其中，延安、渭南、银川、敦煌、格尔木以及阿勒泰等城市的节点度均仅为1，度数中心度分别为0.012，0.056，0.059，0.009，0.010，0，这意味着这些城市在铁路网络中的连接相对薄弱，线路拓展空间巨大。

为了确保网络的均衡性，考虑在节点度为1的6个城市中建设新的线路。其中，库尔勒是新疆维吾尔自治区的核心城市，而格尔木是青海省的第二大城市。因此，这两个城市的新线路建设应被优先考虑。兰州和西安作为西北地区的主要铁路交通枢纽，在铁路车站出现瘫痪的情况下，其铁路网络受到的冲击最为严重。与此同时，平凉等非交通枢纽城市在整个铁路网络中也占据着不可忽视的地位。考虑在某个车站出现瘫痪的情况下整个铁路网络仍能保持正常运行，因此，创建一个宁夏、甘肃、西安三省的闭环网络，并优先规划一条连接银川和延安的铁路线路。新增线路后度数中心度对比图如图4所示。

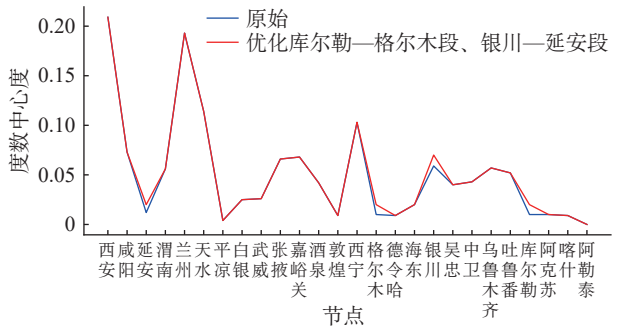

图4　新增线路后度数中心度对比图

Fig.4　Comparison of degree centrality after adding line

3.2.2　优化中间中心度

通过增设环线网络的结构能变得更为稳固，各城市之间的连接联通性会有相应的提升。但各城市存在等级差异，当不同城市铁路网络出现阻滞时，对网络的影响范围、影响程度也会有所不同。因此，考虑新建线路是为了降低网络连通性对某些关键城市的依赖，提升在网络运行不畅时的网络连通能力。西宁、酒泉、嘉峪关3个城市的中间中心度指标分别为26.233，9.391，9.391，在所有选取城市中处于较高水平，所以考虑新建线路将这3个节点周边的城市相连接。西宁周边的城市主要有海东、德令哈，酒泉周边的城市主要有嘉峪关、张掖，嘉峪关周边的城市主要有敦煌、吐鲁番、酒泉。新建线路还需要考虑城市的旅游业、地理位置。德令哈和敦煌中间中心度指标分别为0和1.034，有很大的提升空间，同时2个城市旅游业相对发达且地理位置联系了甘肃、青海2省，所以优先考虑新建线路连接德令哈和敦煌2个城市。新增线路后中间中心度对比图如图5所示。

3.2.3　优化可达性

节点的可达性是一个综合指标，它反映了该节点区域交通通行的难易程度以及居民出行的便捷程度。从之前的计算结果来看，武威、张掖的强度中

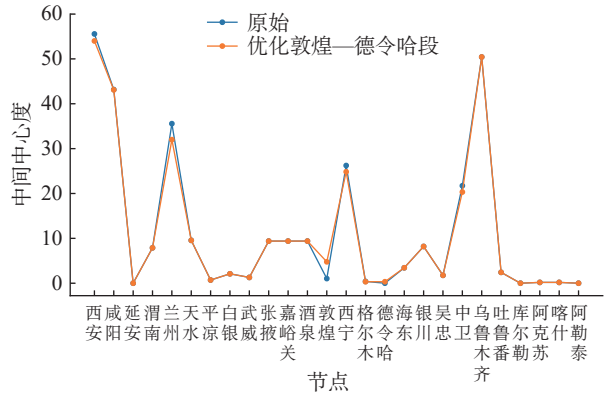

图5　新增线路后中间中心度对比图

Fig.5　Comparison of intermediate centrality after adding line

心性指标、可达性程度不高，在交通连接上存在不足，且张掖、武威作为连接新疆地区的必经城市还未开通高速铁路，也会影响西北铁路网络的均衡性和公平性。因此可以着手规划武威至张掖的高速铁路，以增强其交通联系。

同时，路网性枢纽城市中卫以及地区性枢纽城市平凉，在西北交通网络中本应发挥关键核心节点作用。然而现实状况却是两地之间的交通联系颇为稀少，尤其是平凉的城市可达性指标为14.665，交通流量相对有限，很大程度上限制了枢纽功能的充分发挥以及对周边区域辐射带动效应的实现。故可对中卫至平凉铁路进行扩能改造，以充分发挥中卫、平凉核心枢纽的作用，提升路网运输韧性和可靠性，为逐步形成一个各节点之间互通便捷、协同高效的枢纽格局奠定基础。新增线路后可达性对比图如图6所示。

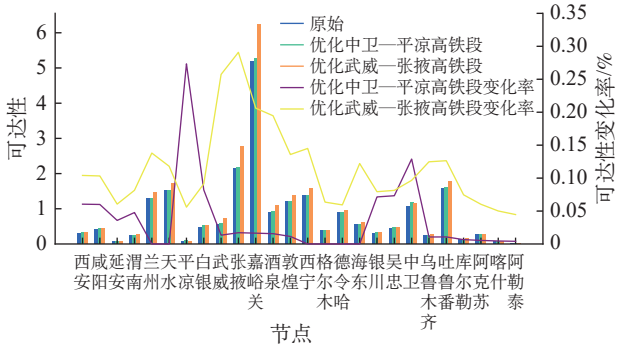

图6　新增线路后可达性对比图

Fig.6　Comparison of accessibility after adding line

4　结论与建议

铁路是国家的战略性、引领性和关键性的基础设施，是国民经济的主要动脉、关键的民生项目以及综合交通运输体系的核心，是中国式现代化建设的重要支撑。综合铁路客运量、人口和GDP等因素，运用复杂网络分析和Ucinet软件，构建基于客运能力矩阵的普速铁路、高速铁路网络。

（1）西安与兰州、天水、渭南，西宁与兰州、西安、嘉峪关，乌鲁木齐与吐鲁番、张掖、嘉峪关之间的普速铁路客运能力较强；西安与兰州、天水、渭南，银川与西安、吴忠、中卫，兰州与西安、天水、西宁之间的高速铁路客运能力较强。平凉、库尔勒、阿克苏、喀什和阿勒泰高速铁路客运能力仍需提升。

（2）通过运用可达性的测度手段，并结合中间中心度、度数中心度等多个指标，对主要城市的铁路可达性等指标进行了全面分析。分析得出兰州、天水、嘉峪关、西宁等城市节点加权指标在所有城市中处于良好水平，而平凉、库尔勒、喀什、阿勒泰等城市节点加权指标低于所有城市平均水平。

（3）从度数中心度、中间中心度、可达性3个方面对铁路网络城市线路进行优化，提出了银川至延安、格尔木至库尔勒、德令哈至敦煌的铁路建设方案、新建武威至张掖段高速铁路、中卫至平凉线路进行扩能改造的建议，积极推进兰州、银川、中卫3个路网性枢纽和天水、张掖、武威、平凉4个地区性枢纽规划建设，形成互通便捷的枢纽格局，为西北地区铁路网络的发展和规划提供理论依据。

参考文献：

[1] JOHNSTON R J，JANIE R M，DEREK G. The Dictionary of Human Geography (5th Edition)[M]. Malden，MA and Oxford：Wiley-Blackwell，2009：501-503.

[2] MALECKI E J. Hard and Soft Networks for Urban Competitiveness[J]. Urban Studies，2002，39(5-6)：929-945.

[3] 潘少奇，李亚婷，高建华. 中原经济区经济联系网络空间格局[J]. 地理科学进展，2014，33(1)：92-101.
PAN Shaoqi，LI Yating，GAO Jianhua. Spatial Pattern of Economic Linkage Network in Central Plains Economic Zone[J]. Progress in Geography，2014，33(1)：92-101.

[4] 刘静玉，杨虎乐，宋　琼，等. 中原经济区城市间相互作用时空格局演变研究[J]. 地理科学，2014，34(9)：1060-1068.

LIU Jingyu，YANG Hule，SONG Qiong，et al. Spatio-Temporal Pattern Evolution of the Interaction among the Cities in Central Plains Economic Zone[J]. Scientia Geographica Sinica，2014，34(9)：1060-1068.

[5] 徐维祥，陈　斌，李一曼. 基于陆路交通的浙江省城市可达性及经济联系研究[J]. 经济地理，2013，33(12)：49-53.
XU Weixiang，CHEN Bin，LI Yiman. The Accessibility and Economic Linkage of Urban Areas in Zhejiang Province Based on Land Communication[J]. Economic Geography，2013，33(12)：49-53.

[6] 王姣娥，焦敬娟，金凤君. 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响[J]. 地理学报，2014，69(12)：1833-1846.
WANG Jiaoe，JIAO Jingjuan，JIN Fengjun. Spatial Effects of High Speed Rails on Interurban Economic Linkages in China[J]. Acta Geographica Sinica，2014，69(12)：1833-1846.

[7] 覃成林，刘万琪，贾善铭. 中国铁路交通发展对沿线城市经济增长趋同的影响[J]. 技术经济，2015，34(3)：51-57，76.
QIN Chenglin，LIU Wanqi，JIA Shanming. Impact of Railway Transportation Development on Convergence of Economic Growth of Cities along Railway[J]. Technology Economics，2015，34(3)：51-57，76.

[8] 高玉祥，董晓峰. 高速铁路建设对甘肃省时空可达性的影响作用研究[J]. 北京交通大学学报，2020，44(6)：82-89.
GAO Yuxiang，DONG Xiaofeng. Study on the Influence of High Speed Railway Construction on Space-Time Accessibility in Gansu Province[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2020，44(6)：82-89.

[9] 张富涛，钱勇生，曾俊伟，等. 高速铁路背景下西北地区铁路可达性与空间相互作用格局变化分析[J]. 干旱区地理，2021，44(4)：1164-1174.
ZHANG Futao，QIAN Yongsheng，ZENG Junwei，et al. Railway Accessibility and Spatial Interaction Pattern Change in Northwest China in the Background of High Speed Rail[J]. Arid Land Geography，2021，44(4)：1164-1174.

[10] 宋国栋，钱勇生，曾俊伟，等. 西北地区铁路建设对区域可达性空间格局的影响[J]. 铁道运输与经济，2021，43(6)：51-57.
SONG Guodong，QIAN Yongsheng，ZENG Junwei，et al. Influence of Railway Construction on Spatial Pattern of Regional Accessibility in Northwest China[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(6)：51-57.

[11] 丁　锐，张宜琳，张　婷，等. 城市轨道交通网络演化对城市空间关联效应的影响研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(4)：52-58，78.
DING Rui，ZHANG Yilin，ZHANG Ting，et al. Influence of Evolution of Urban Rail Transit Networks on Urban Spatial Correlation Effect [J]. Railway Transport and Economy，2022，44(4)：52-58，78.

[12] MENG Y Y，TIAN X L，LI Z W，et al. Comparison Analysis on Complex Topological Network Models of Urban Rail Transit：A Case Study of Shenzhen Metro in China[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2020，559：125031.

[13] TIAN T，CHENG Y Q，LIANG Y C，et al. Hub Node Identification in Urban Rail Transit Network Evolution Using a Ridership-Weighted Network[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2024，2678(8)：549-569.

[14] YIN Y Z，WU Q Y，ZHAO Z Y，et al. Quantifying Centrality Using a Novel Flow-Based Measure：Implications for Sustainable Urban Development[J]. Computers，Environment and Urban Systems，2025，116：102217.

[15] 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[J]. 经济地理，2019，39(3)：57-66.
LIU Chengliang，XU Jiaqi，GUO Qingbin. Spatial Pattern of Urban Centrality on Railway Hub in China's Mainland[J]. Economic Geography，2019，39(3)：57-66.

[16] 刘承良，殷美元，黄　丽. 基于多中心性分析的中国交通网络互补性的空间格局[J]. 经济地理，2018，38(10)：21-28.
LIU Chengliang，YIN Meiyuan，HUANG Li. Spatial Pattern of Complementarity between the Three Transport Networks in China Based on Multiple Centrality Assessments[J]. Economic Geography，2018，38(10)：21-28.

[17] 宗会明，黄　言. 高速铁路对成渝城市群区域可达性和城市相互作用格局的影响[J]. 人文地理，2019，34(3)：99-107，127.
ZONG Huiming，HUANG Yan. The Impact of High Speed Rail on Regional Accessibility and Regional Spatial Interactions：A Case Study of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. Human Geography，2019，34(3)：99-107，127.

[18] 孟德友，陆玉麒. 基于铁路客运网络的省际可达性及经济

（下转第 117 页）