

西部地区多维轨道交通与新型 城镇化协同发展演化

曾俊伟 钱勇生 朱雷鹏 广晓平 张永治¹

(兰州交通大学 交通运输学院, 中国甘肃 兰州 730070)

【摘要】: 多维轨道交通系统的构建对提升区域经济水平、推动区域一体化进程、提高新型城镇化发展质量具有重要意义。基于西部地区 12 个省份, 构建多维轨道交通与新型城镇化评价指标体系, 运用数据拟合、Kendall 及哈肯模型, 分阶段对西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展演化关系进行分析。结果表明: (1) 西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统存在发展水平较低, 但协同度较高的特征。(2) 新型城镇化控制着多维轨道交通与新型城镇化系统协同演化的路径与方向, 两系统具有长期的均衡性与稳定性。(3) 多维轨道交通与新型城镇化协同发展处于中级协同阶段且区域梯度差异明显。(4) 2010—2014 年多维轨道交通与新型城镇化协同发展的演化形式为中级协同阶段向高级协同阶段演化, 2014—2018 年突变为初级协同阶段向中级协同阶段演化, 西部地区两系统协同发展已进入更高级的演化形式。

【关键词】: 多维轨道交通 新型城镇化 哈肯模型 协同演化 高质量发展

【中图分类号】: F572; F299.21 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 11-0077-10

轨道交通作为交通运输系统的主骨架, 在推动国土资源开发、提升区域经济发展、优化城市空间格局等方面积极助力新型城镇化的建设, 同时新型城镇化的建设水平又影响着轨道交通的路网规划及运输效率。新型城镇化与多维轨道交通系统的良性互动是促进二者稳步发展的基础支撑, 因此二者之间的发展关系成为了地理学、社会学等众多学科的研究热点。

针对轨道交通与新型城镇化系统发展关系的研究, 国内外学者已取得了大量成果。国外学者研究范围涵盖轨道交通基础设施与城市空间形态构造, 包括铁路线网与城市空间的协调关系^[1], 轨道交通布局与周边土地利用模式的关系^[2], 铁路线网的分布对沿线人口聚集的影响等^[3], 研究内容侧重于轨道交通与区域一体化的发展。国内学者大多基于单一轨道交通运输方式对两者之间的发展关系进行分析, 针对高速铁路与城镇化方面的研究包括: 高速铁路的修建对沿线区域经济发展^[4]、城市群可达性空间格局演变^[5]、城市群旅游空间格局演变^[6]、城市土地利用^[7]的影响等; 针对城际铁路与城镇化方面的研究包括: 城际铁路发展产生的时间压缩效应对城市要素空间产生的集聚影响^[8]、城际铁路线网布局模式对城市群空间结构的影响^[9, 10]、城际铁路与城市空间结构互馈演化机制等^[11]; 针对城市轨道交通与城镇化方面的研究包括: 城市轨道交通对沿线住房价格的影响和对城市空间结构的优化塑造^[12]、对城镇化进程中快速增长的城市人口的疏解^[13]等。也有部分学者基于两种及以上轨道交通方式对两者之间的作用关系进行研究, 包括市郊铁路与城市轨道交通形成的复合交通网络结构与大都市区协同发展演化^[14]; 地铁、城际铁路、高速铁路构建的多维轨道交通系统与都市圈空间结构耦合演化作用规律等^[15]。得出轨道交通系统在我国新型城镇化发展进程中发挥

¹**作者简介:** 曾俊伟 (1982-), 男, 甘肃白银人, 硕士, 教授, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: zengjunwei@mail.lzjtu.cn; 钱勇生 (1970-), 男, 江苏常州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: qianyongsheng@mail.lzjtu.cn

基金项目: 国家社会科学基金项目 (15BJY037); 国家社会科学基金青年项目 (14CJY052); 甘肃省重点研发计划项目 (21YF5GA052); 甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目 (GSSYLM-04); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目 (2021CYZC-60)

着愈发重要的基础支撑作用^[16]，多维轨道交通系统的构建有利于解决新型城镇化发展过程中带来的系列城市问题，提高城市时空转换能力与空间转化效率，助推新型城镇化高质量发展^[17]。目前，我国发展较为成熟的京津冀、长三角城市群、武汉城市圈已经形成了高铁、城际、地铁（三铁）构成的现代化多维轨道交通系统，为其新型城镇化提供了持续的发展动力^[18]。西部地区部分城市也已进入到“三铁”无缝衔接的现代化轨道交通运营时代，但少有文献将其与新型城镇化之间的作用关系进行综合研究。

目前，西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统发展水平仍待提升，而两系统的协同发展是二者相互促进的基础，因此对二者协同作用关系及动力学特征进行研究很有必要。针对交通与城镇化协同关系进行研究，很多学者采用投影寻踪模型^[19]、交通优势度^[20]、邓氏灰系统^[21]等方法，研究体系已比较成熟。但上述方法只是对两者作用关系进行定性研究，难以清晰刻画两者协同发展的动力学特征及演化趋势。后来部分学者采用向量自回归模型^[22]、耦合协调度^[23]解决了上述问题，而这些研究主要是在静态层面研究了交通与城镇化的协调关系，其研究结果虽对指导城镇化发展具有一定的借鉴作用，但多维轨道交通系统与城镇化系统之间是否能够协同发展，与两者之间发展的动力学作用机制及演化路径密切相关，目前关于这方面的研究尚显匮乏。哈肯模型可以准确研判两系统协同演化作用机制及发展趋势，弥补上述研究方法存在的不足，并已在经济、生态、区域协调等研究领域得到广泛应用^[24]。在对西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同发展进行分析时，也可借鉴哈肯模型的思路方法，分析两系统的协同演化路径，探究其协同演化作用机制。

基于上述分析，本文以西部地区 12 个省份的数据为基础，基于协同学理论，将该理论中的哈肯模型引入多维轨道交通与新型城镇化协同发展研究中。在分析二者协同发展趋势的基础上，运用哈肯模型，以《国家新型城镇化规划（2014—2020）》印发实施时间为节点，分两阶段（2010—2014、2014—2018 年）对二者之间的协同演化机制进行研究，以期为推动西部地区多维轨道交通与新型城镇化高质量发展提供参考建议。

1 数据来源及预处理

1.1 指标选取

1.1.1 多维轨道交通系统指标选取

西部地区多维轨道系统主要包括普通铁路、高速铁路、城际铁路和城市轨道交通四种交通方式，在综合交通体系的构建中处于骨架地位，在完善西部地区综合交通一体化网络体系、拓展各大城市群发展深度、促进大中小城市之间协调交流，助力西部地区经济、空间、社会、生态等方面协调发展，推动新型城镇化高质量建设发挥着主体功能。近年来，西部地区多维轨道交通系统得到了较为充分的发展，但因其特殊的自然条件，发展水平较低。因此在统筹考虑西部地区多维轨道交通系统发展的普遍性与特殊性的基础上，借鉴相关学者的研究成果^[25]，考虑从线网发展、运营水平、经济推动等多方面构建西部地区多维轨道交通系统（X）指标评价体系。

1.1.2 新型城镇化系统指标选取

根据《国家新型城镇化规划（2014—2020）》，现阶段新型城镇化发展主要任务为全面提高城镇化质量，实现区域经济、社会、人口、资源、环境、保障等方面的综合协调发展。目前，随着国家各项关于新型城镇化政策的落地实施，西部地区新型城镇化发展取得显著成效。但西部地区经济基础条件较差，新型城镇化建设水平在一定程度上落后于其他地区。因此在决胜全面建设小康社会的背景下，提高西部地区新型城镇化发展水平，缩小与其他地区的发展差距，完成脱贫攻坚首要任务是西部地区区域协调发展面临的重要议题。结合西部地区新型城镇化发展的具体情况，借鉴前人^[26]研究成果，为科学度量西部地区新型城镇化发展水平，针对西部地区新型城镇化系统（Y）进行指标选取。

1.2 数据预处理

数据来源于 2011—2019 年《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国交通年鉴》《中国固定资产投资统计年鉴》《中国铁道年鉴》和西部地区（四川、云南、贵州、西藏、重庆、陕西、甘肃、青海、新疆、宁夏、内蒙古、广西）各省（自治区、直辖市）统计年鉴及发展公报、各地区轨道交通相关资料。

为消除指标间不同量纲及数量级带来的计算误差，利用极差法对各指标进行了标准化处理，并利用熵值法对各省指标赋予不同权重，计算得到 2010—2018 年西部地区两系统各指标平均发展水平。

2 西部地区新型城镇化与多维轨道交通协同演化趋势研究

为探究西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展作用关系，首先基于 2010—2018 年两系统指标体系基础数据，采用数据拟合方法分别对其进行指标拟合，在宏观层面分析两者协同发展作用趋势。同时为明晰两系统间协同发展作用等级，采用秩相关分析法对两者之间协同作用关系进行深入探究，科学分析西部地区新型城镇化与多维轨道交通协同演化基本趋势。

2.1 数据拟合

为体现西部地区多维轨道交通和新型城镇化系统协同发展的本质属性和基础功能，本文选取了大量指标数据，各指标数据难免存在互有交集但未能全面覆盖的情况，且大量数据的直接使用将对后续计算过程带来不便，并难以深入挖掘数据的潜在信息，给计算结果带来较大偏差。

数据拟合方法可实现大量数据的有效压缩融合^[27]，其建模步骤如下（以西部地区新型城镇化系统（Y）为例）。

①计算 Y 的协方差矩阵 F

$$F = \sum_{i=1}^9 (Y_i - \bar{Y})(Y_i - \bar{Y})^T / 9 \quad (1)$$

式中：Y (Y=Y₁, Y₂, Y₃, ..., Y₉) 为 2010—2018 年新型城镇化系统的全部指标；Y_i (Y_i=Y_{i1}, Y_{i2}, Y_{i3}, ..., Y_{i14}) 为第 i 年新型城镇化系统的具体指标。

其中， $\bar{Y}$ 为：

$$\bar{Y} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 Y_i \quad (2)$$

②计算协方差矩阵的特征值 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{14})$ ，并计算 λ 对应的特征向量 L=(L₁, L₂, ..., L₁₄)

③数据拟合。当累积贡献率 $(\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^9 \lambda_i) \geq 0.85, m \in 9$ ，表示前 m 项指标已经包涵了所有指标的信息，则最终新型城镇化拟合系统为：

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_9) \quad (3)$$

$$\text{式中: } U_i = \sum_{t=1}^m (L_i^T X_i \lambda_i) / \sum_{t=1}^{14} \lambda_i, t \in (1, 14)。$$

利用数据拟合分别对多维轨道交通和新型城镇化系统涉及的指标数据进行融合,在特征值大于 1,贡献率大于 85%的条件下,对多维轨道交通系统 (GDJT) 和新型城镇化系统 (XXCZH) 各取两个主成分, 其中:

$$\begin{aligned} GDJT &= (7.052 \cdot \text{factor11} + 2.529 \cdot \text{factor12}) / 10 \\ XXCZH &= (11.332 \cdot \text{factor21} + 1.105 \cdot \text{factor22}) / 14 \end{aligned}$$

2010—2018 年, 西部地区及所辖各省份多维轨道与新型城镇化系统发展趋势如图 1 所示。

由图 1 可以看出: 2010—2018 年, 西部地区多维轨道交通系统和新兴城镇化系统基本保持稳步上升的协同发展趋势; 多维轨道交通系统与新型城镇化系统相比, 发展速度更快, 并且二者存在一定程度的相互作用关系。2010—2018 年, 西部地区 12 个省份多维轨道交通与新型城镇化系统均表现出协同向好的发展趋势。其中, 2010—2014 年各省份两系统发展质量基本保持一致; 2014—2018 年各省份多维轨道交通系统比新型城镇化系统发展速度更快, 尤其在内蒙古、重庆、云南、西藏、青海、宁夏等省份表现更为显著。

2.2 基于 Kendall 秩相关分析的协同演化定量分析

以往文献大多对两系统协同发展进行定性研究, 难以具体量化两系统协同发展具体水平, 而 Kendall 秩相关分析可用来说刻画两系统间的协同关系, 科学度量系统间协同度强弱等级, 本节将在对西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同演化趋势分析的基础上, 采用 Kendall 秩相关分析模型对具体协同值进行量化分析^[28]。Kendall 秩相关模型见式 (4)。

$$\begin{aligned} \gamma_s(X, Y) &= \frac{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left(\gamma_i - \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \gamma_i \right) \left(\theta_i - \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \theta_i \right)}{\sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left(\gamma_i - \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \gamma_i \right)^2} \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left(\theta_i - \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \theta_i \right)^2}} \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $\gamma_s(X, Y)$ 表示多维轨道交通与新型城镇化系统的协同值, $\gamma_s(X, Y) \in (-1, 1)$, $\gamma_s(X, Y)$ 的值越大, 表明两系统间的协同度越高; γ_i 为 $X=(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i)$ 中 X_i 的秩; θ_i 为 $Y=(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_i)$ 中 Y_i 的秩。其中 X_i 与 Y_i 分别为多维轨道交通系统与新型城镇化系统第 i 年相对应的拟合数据值。

基于多维轨道交通与新型城镇化系统拟合数据, 利用式 (4) 计算得到 2010—2018 年两系统协同度值为 0.792。

两系统发展相对均衡。与东部、中部地区相比, 西部地区轨道交通与新型城镇化发展水平普遍较低, 但两系统的发展速度均高于东部、中部地区^[29], 且计算得到西部地区两系统发展协同度较高。因此基于西部地区两系统发展水平较低, 但系统间协同度较高的问题, 为进一步推动西部地区两系统高质量协同发展, 很有必要对其内部协同演化机制进行深入研究。

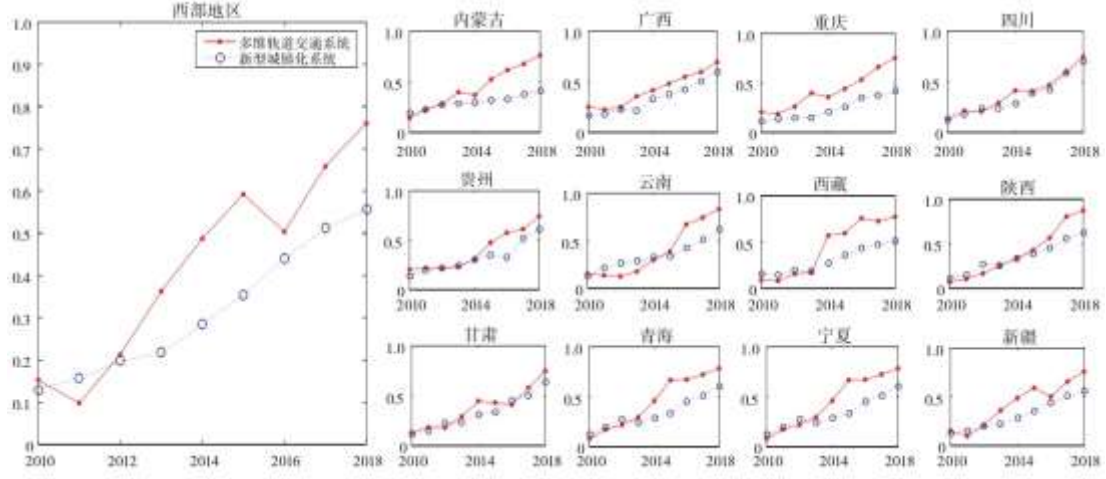


图 1 2010—2018 年西部地区及所辖省份多维轨道交通与新兴城镇化系统发展时序图

3 基于哈肯模型的西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同演化机制

3.1 哈肯模型的建立

哈肯模型是协同学理论的重要模型，通过哈肯模型可以识别系统发展的序参量，可研判系统自组织过程中的演化机制与演化趋势^[30]。其建模过程如下：

①提出假设，构造运动方程。在哈肯模型中，序参量为系统发展的慢变量，系统中慢变量役使快变量，并且决定着整个系统的演化方向，假设 q_1 系统为慢变量， q_2 系统为快变量。

则 q_1 、 q_2 协同发展的运动方程为：

$$q_1(t) = (1 - \gamma_1)q_1(t-1) - aq_1(t-1)q_2(t-1) \quad (5)$$

$$q_2(t) = (1 - \gamma_2)q_2(t-1) + bq_1^2(t-1) \quad (6)$$

式中： a 、 b 表示 q_1 、 q_2 相互之间的协同影响程度。当 $a > 0$ ，表示 q_2 阻碍 q_1 发展，当 $a < 0$ ，表示 q_2 对 q_1 起推动作用；当 $b > 0$ ，表示 q_1 助推 q_2 发展，当 $b < 0$ ，表示 q_1 对 q_2 起阻碍作用； $|a|$ 、 $|b|$ 越大，作用程度越明显。

γ_1 、 γ_2 为阻尼系数。当 $\gamma_1 < 0$ 表示 q_1 对两子系统的演化为正反馈机制； $|\gamma_1|$ 越大，系统有序度越高。当 $\gamma_1 > 0$ 表明 q_1 对两子系统的演化为负反馈机制， γ_1 越大，系统无序度越高。当 $\gamma_2 < 0$ 表示 q_2 对两子系统的演化为正反馈机制，且 q_2 的发展可增强系统的有序度；当 $\gamma_2 > 0$ 表明 q_2 对两子系统的演化为负反馈机制。

②求解运动方程参数，判断是否满足“绝热近似条件”，得到系统序参量。基于西部地区各省多维轨道交通与新型城镇化系统数据拟合值，可求得运动方程参数，进而判断方程（7）、（8）是否满足绝热近似条件： $|\gamma_2| \gg |\gamma_1|$ ，且 $\gamma_2 > 0$ ，若满足，则 q_1 为系统发展的序参量，否则转第一步。

③求解系统演化方程与势函数。若满足绝热近似条件，则令 $q_2' = 0$ ，得到系统演化方程：

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 q_1 - \frac{ab}{\gamma_2} q_1^3 \quad (7)$$

对式（7）进行相反数积分得到系统势函数式（8），可有效判断系统发展趋势。

$$v = \frac{1}{2} \gamma_1 q_1^2 + \frac{ab}{4\gamma_2} q_1^4 \quad (8)$$

④求解系统得分值。在式（7）中，令 $\dot{q}_1 = 0$ ，结合式（8）可解得两系统协同发展的稳定点 $[q^*, v(q)]$ ，与稳定点的距离越小协同值越高，则系统评价函数为：

$$d = \sqrt{(q - q^*)^2 + [v(q) - v(q^*)]^2} \quad (9)$$

为便于衡量两子系统协同度大小，对 d 进行正向化处理，得到两子系统协同发展得分值：

$$s = \frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (10)$$

利用式（10）计算得到的协同发展得分值范围为（0, 1），为便于评估西部地区各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展具体水平，将得分值划分为：初级阶段（0.000, 0.333]、中级阶段（0.334, 0.666]、高级阶段（0.667, 1.000）等三个阶段^[31]。

3.2 第一阶段（2010—2014 年）西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同演化机制

3.2.1 模型计算

基于 2010—2014 年西部地区各省份多维轨道交通（GDJT）与新型城镇化（XXCZH）系统数据的拟合值，利用式（5）、（6）对两系统协同发展情况进行分析。

运动方程②模型假设成立，表明在第一阶段内，西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同发展的过程中，多维轨道交通为快变量，新型城镇化为慢变量，多维轨道交通对新型城镇化的发展有较强的推动作用，新型城镇化控制着多维轨道交通与新型城镇化系统协同演化的路径与方向。运动方程②显示，常数 a 为正值，表示新型城镇化对多维轨道交通的建设具有阻碍作用，主要原因为第一阶段内受地理区位的影响，西部地区各区域间联系不紧密，各类要素交流不自由，多维轨道交通与新型城镇化系统得不到充分的发展，所以应该积极打破区域壁垒，促进各项生产要素充分流动，着力推动两系统发展；常数 b 为正值，说明多维轨道交通对新型城镇化的建设具有积极的推动作用，所以应大力推动轨道交通建设，引领新型城镇化发展。

3.2.2 势函数求解

由运动方程②可得 $\lambda_1 = -0.04591$ ； $\lambda_2 = 0.17603$ ； $a = 0.01233$ ； $b = 0.35342$ ，利用式（5）～（8）计算可得：

系统演化方程：

$$\dot{q}_1 = \frac{4591}{100000}q_1 - \frac{436}{17603}q_1^3 \quad (11)$$

系统势函数：

$$v = -\frac{4591}{200000}q_1^2 + \frac{109}{17603}q_1^4 \quad (12)$$

令 $\dot{q}_1 = 0$ 解得势函数的三个解为： $q_1^* = 0; q_1^{**} = 1.3615; q_1^{***} = -1.3615$ 。

2010—2014 年新型城镇化系统的值均大于 0，因此系统演化方程只考虑 $q_1 > 0$ 的部分，根据势函数的三个解可得系统稳定点为 (1.3615, -0.0213)，利用式 (9) 可得状态评价函数为：

$$d = \sqrt{(q - 1.3615)^2 + [v(q) + 0.0213]^2} \quad (13)$$

3.2.3 序参量识别结果

利用式 (10)、(13) 可得 2010—2014 年西部地区各省多维轨道交通与新型城镇化协同发展得分值。

第一阶段内，西部地区多维轨道交通与新型城镇化发展协同水平呈现逐年改善的趋势，两系统协同度平均水平处于中级阶段 (0.461)。在此期间，随着各类交通规划的落地实施与城镇化建设的逐步推进，各省份两系统协同得分值都表现出稳步上升的趋势。其中，广西、重庆、贵州、陕西两系统协同发展水平平均高于西部地区平均水平，分析原因为上述省份的多维轨道交通与新兴城镇化系统的发展速度高于其他省份，表明这 4 个省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展水平已从有序突变至新的无序状态，进入更高级别的协同发展跃升的演化阶段。此外，2014 年，重庆得分值最高，超出西部地区平均水平约 40 个百分点；西藏最低，低于平均水平约 50 个百分点。由此可见西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展水平阶梯分异程度偏大，与此同时重庆的多维轨道交通与新型城镇化的发展水平远高于西藏，这也同步证明了模型的合理性。

为了进一步分析 2010—2014 年西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同水平发展情况，结合协同等级评价标准，可得 2010—2014 年西部地区及各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展演化趋势及协同水平等级变化情况，结果如图 2 所示。

由图 2 可得，2010—2014 年，广西、重庆、贵州、陕西等省份已由中级阶段跃升至高级阶段，这是推动西部地区两系统协同等级跃升演化的主要动力；内蒙古、甘肃、青海等省份由初级协同演化至中级协同阶段，但得分值变化不明显，对西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展影响不显著；新疆、西藏等省份得分值虽呈现逐年上升的趋势，但协同水平基本保持不变，仍处于初级协同阶段。因此 2010—2014 年，西部地区各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展主要变化为由中级协同向高级协同的演变，且西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展水平整体呈现西南强、西北弱，由东向西逐渐衰弱的空间分异特征。



图 2 第一阶段（2010—2014 年）西部地区各省份协同水平等级变化情况

3.3 第二阶段（2014—2018 年）西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同演化机制

3.3.1 模型计算

基于 2014—2018 年西部地区各省份多维轨道交通（GDJT）与新型城镇化（XXCZH）系统数据的拟合值，利用式（5）、（6）对两系统协同发展情况进行分析。

第二阶段哈肯模型计算结果方程②满足假设要求，2014—2018 年西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同发展的序参量依旧是新型城镇化。运动方程②显示，常数 a 为负值，表明西部地区第二阶段内新型城镇化的建设可为多维轨道交通发展提供良好的发展环境；常数 b 为正值，表明多维轨道交通的发展在一定程度上制约着新型城镇化发展，后续新型城镇化的高质量发展需要更为超前的多维轨道交通规划来匹配。结合第一阶段哈肯模型计算结果可得，2010—2018 年期间，西部地区新型城镇化的建设始终落后于多维轨道交通，新型城镇化作为两系统协同发展的慢变量，控制着两系统协同发展的演化行为，这也与当前西部地区的实际情况相符。

3.3.2 势函数求解

由运动方程②可得 $\lambda_1 = -0.06958$; $\lambda_2 = 0.71085$; $a = -0.00120$; $b = -0.18796$ ，利用式（5）～（8）计算可得：

系统演化方程：

$$\dot{q}_1 = \frac{3479}{50000}q_1 - \frac{23}{71085}q_1^3 \quad (14)$$

系统势函数为：

$$V = -\frac{3479}{100000}q_1^2 + \frac{23}{284340}q_1^4 \quad (15)$$

令 $\dot{q}_1 = 0$ ，解得势函数的 3 个解为： $q_1^* = 0$; $q_1^{**} = 14.6645$; $q_1^{***} = -14.6645$

2014—2018 年新型城镇化系统的值均大于 0，因此系统演化方程只考虑 $q_1 > 0$ 的部分，根据势函数的三个解可得系统稳定点为 (14.6648, -3.7403)，利用式 (9) 可得状态评价函数为：

$$d = \sqrt{(q - 14.6648)^2 + [v(q) + 3.7403]^2} \quad (16)$$

3.3.3 序参量识别结果

利用式 (10)、(16) 可得 2014—2018 年西部地区各省多维轨道交通与新型城镇化协同发展得分值。

由在第二阶段（2014—2018 年）西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同发展平均水平处于中级协同阶段（0.531），与第一阶段（2010—2014 年）相比，协同程度逐步提高。其中，广西、重庆、四川、陕西得分值最高，处于高级协同阶段。2016—2018 年，四川、陕西两省协同得分值开始下降，表明 2016—2018 年随着四川、陕西轨道交通基础设施的大量投入，多维轨道交通的发展水平已慢慢高于新型城镇化的建设速度，使其已由之前的高度有序状态向新的更高级别的无序状态演化。此外，在第一阶段贵州处于高级协同阶段，第二阶段却处于初级、中级协同阶段，表明贵州在向更高级别的协同状态演化时，轨道交通的投入无法助力其新型城镇化的完全升级转型，所以贵州省还应加大轨道交通建设力度，促进新型城镇化发展。2018 年西部地区各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展得分值显示，重庆得分值最高（0.998），高于平均水平约 48 个百分点，西藏得分值最低（0.124），低于平均水平约 50 个百分点。与上一阶段相比，差距进一步扩大，但随着交通基础设施的建设以及城镇化相关政策的实施，西藏地区多维轨道交通的建设质量已逐步呈现向好发展，两系统之间的协同水平也呈现逐步提高的趋势。

同样，为了进一步分析 2014—2018 年西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统协同水平发展情况，与第一阶段计算步骤一致，统计得到 2014—2018 年西部地区及各省多维轨道交通与新型城镇化协同发展演化趋势及协同水平等级变化情况，结果如图 3 所示。

由图 3 分析得到，第二阶段西部地区各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展主要表现为由初级协同阶段向中级协同阶段演化。截至 2018 年，西部地区处于高级协同、中级协同、初级协同的省份数量分别为 4、7、1 个，与第一阶段相比，第二阶段西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展整体水平进一步提升，主要表现为甘肃、宁夏、青海等西北省份得分值稳步提高，与西南地区各省份的差距逐步缩小；协同等级已由初级协同阶段发展演化至中级协同阶段，改善了西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展水平西南强、西北弱，由东向西逐渐衰弱的空间分异特征，缓解了西部地区多维轨道交通与新型城镇化在时空方面发展的不均衡性，进一步推动西部地区区域协调良性发展。



图 3 第二阶段（2014—2018 年）西部地区各省份协同水平等级变化情况

4 结论与建议

4.1 结论

本文通过构建数据拟合、Kendall 秩相关及哈肯模型，对西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展演化，从宏观与微观两个层面进行实证研究，主要结论如下：

第一，在宏观层面，通过构建数据拟合及 Kendall 秩相关分析模型分析发现，2010—2018 年西部地区及所辖省份多维轨道交通与新型城镇化系统保持协同一致的稳步发展趋势，且两系统发展存在协同度高，发展水平较低的情况。

第二，在微观层面，针对宏观层面得出的结论，为提高西部地区多维轨道交通与新型城镇化系统发展质量，构建哈肯模型对西部地区 12 个省份分两阶段（2010—2014、2014—2018）对两系统协同发展情况进行深入研究，分析得出：

①2010—2018 年，新型城镇化是影响西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展的序参量，控制着两系统协同发展演化的路径与方向。西部地区新型城镇化与多维轨道交通系统的协同演化表现为，在一定的资源、生产科技水平等条件维持不变的情况下，两系统协同发展表现为长期的均衡性与稳定性。

②运动方程参数符号的改变表明西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展环境得到改善。第一阶段运动方程表明，西部地区内部区域间联系不紧密，各类资源无法实现优势互补，导致西部地区各省份间协同等级差别越来越大。第二阶段内，参数符号发生变化，西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展环境得到改善，各类要素的流动性增强，区域间交流更加紧密，第一阶段内低协同等级省份在第二阶段得到更加充分的发展，成为推动西部地区两系统协同等级演化的主要动力。

③西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展处于中级协同阶段且存在梯度差异。第一阶段内两系统协同度水平平均处于中级阶段，第二阶段与第一阶段相比，协同程度逐渐提高，但仍处于中级协同阶段。以单个省份为视角，由于投资力度与资源分布的不均衡，两阶段内个别省份（重庆、西藏）两系统间的协同水平差距逐渐扩大；以区域为视角，第一阶段内西部地区两系统协同发展水平整体呈现西南强、西北弱，由东向西逐渐衰弱的空间分异特征，第二阶段内西北地区（甘肃、宁夏、青海等）两系统协同发展后发优势逐步凸显，西南地区发展增速放缓，梯度差异得到改善。

④协同等级的突变表明西部地区多维轨道交通与新型城镇化协同发展进入新阶段。第一阶段，由中级阶段跃升至高级阶段的省份占比较多，是西部地区各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展的主要演变形式。第二阶段西部地区各省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展主要表现为由初级协同阶段向中级协同阶段演化，表明西部地区两系统协同发展已进入更高级的演化阶段。

此外，西部地区除西藏与新疆外，其他省份多维轨道交通与新型城镇化协同发展水平平均处于中、高级协同阶段，且处于各阶段的上游区间，因此西部地区呈现出两系统发展水平较低，但系统间协同度较高的问题，这也验证了模型及结论的正确性。

4.2 政策建议

基于上述结论，结合西部地区多维轨道交通与新型城镇化发展实际情况，为进一步促进两系统高质量协同发展，提出以下政策建议：

①提升多维轨道交通智能化水平，推进新型城镇化系统高质量发展。借力新基建和新型城镇化，充分利用互联网、5G、大数据、人工智能等先进技术，打造智能轨道交通系统，达到多种轨道交通方式在区域间、交路上融通、套跑，各类轨道交通方式之

间连乘、不同网络列车车次自动衔接的目的,最大程度实现多维轨道交通一体化,这对于西部大开放、大开发具有显著的提升作用。结合各省份具体情况,应大力推进各类轨道交通方式的融合,加快城市轨道交通网络基本骨架的形成,实现高铁、普速、城际、城市轨道交通之间的无缝衔接,打造内畅外联、快捷高效的现代化轨道交通网络体系,实现各区域间的有机协调,利用多维轨道交通实现对城市空间格局的优化塑造,实现轨道交通与新型城镇化协同发展。

②制定分层次、有重点、可差异化实施的轨道交通发展规划,助推区域多维轨道交通与新型城镇化协同发展进程。对于初级协同的省份,应该加大力度推进轨道交通基础建设,打造互联互通的运输主骨架,助力新型城镇化空间格局的有效形成。针对新疆、西藏等轨道交通发展水平较低的省份,应充分考虑经济可行性,推进智能化、智慧化的多维轨道交通建设,最大限度促进新型城镇化高质量发展,同时注重高速、普速铁路的协同建设发展,有侧重点地设计“多站点、低票价”的客运产品。同时完善运输枢纽,提高口岸运输效率,支持新疆、西藏地区开放发展,健全地区协同发展内生机制,进一步缩小与其他省份的发展差异。对于中级协同的省份,应以完善并扩大其所辖范围的轨道交通线网为主,借助多维轨道交通运输优势,积极承接发达地区产业转移,优化新型城镇化整体布局。针对内蒙古、甘肃、青海、宁夏、贵州等省份,在进一步发展高速、普速干线铁路的基础上,还应加快市域、城际铁路的规划建设,依托较为完善的轨道线网,积极承接与江苏、山东等中部省份的互惠项目,加强西北与西南的区域合作,推动兰州—西宁、宁夏沿黄、黔中等城市群互动发展,加快区域协调一体化进程。对于高级协同的省份,如四川、陕西等向更高协同级别演化的省份,应该超前科学制定轨道交通规划,使其高效完成协同等级升级演化,带动沿线区域实现轨道交通与区域协同发展一体化。

参考文献:

- [1]Marti-Henneberg J.European integration and national models for railway networks(1840-2010)[J].Journal of Transport Geography,2013,26(JAN.):126-138.
- [2]Lee S,Yi C,Hong S P.Urban structural hierarchy and the relationship between the ridership of the Seoul Metropolitan Subway and the land-use pattern of the station areas[J].Cities,2013,35(dec.):69-77.
- [3]Morillastorne M.Creation of a geo-spatial database to analyse railways in Europe(1830-2010).A Historical GIS Approach[J].Journal of Geographic Information System,2012,4(2):176-187.
- [4]金凤君,武文杰.铁路客运系统提速的空间经济影响[J].经济地理,2007,27(6):10-13,17.
- [5]赵丹,张京祥.高速铁路影响下的长三角城市群可达性空间格局演变[J].长江流域资源与环境,2012,21(4):391-398.
- [6]黄泰,查爱欢,应南茜.高铁对都市圈城市旅游服务力格局演变的影响——以长三角都市圈为例[J].经济地理,2014,34(11):158-165.
- [7]Zhou J,Yang L,Li L.The implications of high-speed rail for Chinese cities:Connectivity and accessibility [J].Transportation Research Part A:Policy and Practice,2018,116:308-326.
- [8]覃成林,杨礼杉.铁路对沿线城市要素空间集聚的影响[J].城市问题,2016(2):25-35.
- [9]吕韬,姚士谋,曹有挥.中国城市群区域城际轨道交通布局模式[J].地理科学进展,2010,29(2):249-256.
- [10]李琳娜,曹小曙,黄晓燕.世界大都会区城际轨道交通的发展规律[J].地理科学进展,2012,31(2):221-230.

-
- [11]李夏苗, 曾明华, 黄桂章. 基于交通系统与城市空间结构互馈机制的城际轨道交通走廊客流预测[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4):118-123.
- [12]赵渺希, 王世福, 张小星. 基于地铁出行的广佛城市功能联系研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012(6):152-158.
- [13]李燕, 王芳. 北京的人口、交通和土地利用发展战略: 基于东京都市圈的比较分析[J]. 经济地理, 2017, 37(4):5-14.
- [14]陈小君. 我国大都市区轨道交通网络结构演进: 由等级到协同[J]. 北京交通大学学报: 社会科学版, 2015, 14(3):28-37.
- [15]王文静, 陆化普. 轨道交通与都市圈空间体系耦合关系研究[J]. 城市发展研究, 2013, 20(4):112-118.
- [16]顾朝林, 曹根榕. 基于城镇化发展趋势的中国交通网战略布局[J]. 地理科学, 2019, 39(6):865-873.
- [17]荣朝和. 铁路/轨道交通在新型城镇化及大都市时空形态优化中的作用[J]. 北京交通大学学报: 社会科学版, 2014, 13(2):20-28.
- [18]张博野, 闫晨红, 曾菊新. “三铁”建设中的武汉城市圈空间效应[J]. 经济地理, 2014, 34(10):46-52.
- [19]孟德友, 陆玉麒, 樊新生. 基于投影寻踪模型的河南县域交通与经济协调性评价[J]. 地理研究, 2013, 32(11):2092-2106.
- [20]孟德友, 沈惊宏, 陆玉麒. 中原经济区县域交通优势度与区域经济空间耦合[J]. 经济地理, 2012, 32(6):7-14.
- [21]单飞, 李旭宏, 张军. 基于 FAHP 和加权灰色关联度的区域交通一体化评价方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011(5):147-154.
- [22]米鹏飞, 钱勇生, 曾俊伟. 基于 VAR 模型的交通运输与城镇化发展的动态关系研究——以甘肃省为例[J]. 现代城市研究, 2019(1):69-74.
- [23]汪德根, 孙枫. 长江经济带陆路交通可达性与城镇化空间耦合协调度[J]. 地理科学, 2018, 38(7):1089-1097.
- [24]郑玉雯, 薛伟贤. 丝绸之路经济带沿线国家协同发展的驱动因素——基于哈肯模型的分阶段研究[J]. 中国软科学, 2019(2):78-92.
- [25]游细斌, 杨青生, 付远方. 区域交通系统与城镇系统耦合发展研究——以潮州市域为例[J]. 经济地理, 2017, 37(12):96-102.
- [26]戚晓旭, 杨雅维, 杨智尤. 新型城镇化评价指标体系研究[J]. 宏观经济管理, 2014(2):51-54.
- [27]范英飞, 章国鹏, 徐梦清. 成渝城市群经济与交通运输通道协同演化表征方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3):238-245.
- [28]何平. 数理统计与多元分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.

-
- [29]莫杨辉,张培林,谢羽盟.新型城镇化与综合交通发展的互动关系计量研究[J].交通运输系统工程与信息,2019(5):13-19.
- [30]李桥兴,胡雨晴.基于哈肯模型的我国大数据产业演化机制研究[J].工业技术经济,2020,39(3):125-131.
- [31]李琳,刘莹.中国区域经济协同发展的驱动因素——基于哈肯模型的分阶段实证研究[J].地理研究,2014,33(9):1603-1616.