文章编号：1003-1421(2026)01-0079-09
引用格式：耿立艳，张占福，魏嘉骏，等.高速铁路开通与碳排放耦合协调度时空演变特征及影响因素研究[J].铁道运输与经济，2026，48(1)：79-87.
GENG Liyan，ZHANG Zhanfu，WEI Jiajun，et al. Research on Spatial-Temporal Evolution Characteristics and Influencing Factors between Coupling Coordination Degree of Opening of High Speed Railway and Carbon Emission[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：79-87.

高速铁路开通与碳排放耦合协调度时空演变特征及影响因素研究

耿立艳[1]，张占福[2]，魏嘉骏[1]，陈文娟[1]

(1.石家庄铁道大学 管理学院，河北 石家庄 050043；2.石家庄铁道大学四方学院 电气工程系，河北 石家庄 051132)

摘 要：高速铁路作为现代化绿色交通的重要标志，其开通不仅带动沿线地区的经济增长，在一定程度上还有助于改善环境质量。基于熵值法构建高速铁路开通与碳排放的指标体系，并运用耦合协调度模型和空间计量模型，研究我国30个省份高速铁路开通与碳排放耦合协调度时空演变特征及影响因素。研究结果表明，2010—2022年高速铁路发展水平呈现明显的上升趋势，碳排放水平整体呈现下降趋势；全国层面、地区层面及省层面的耦合协调度均明显增加，截至2022年，处于协调发展阶段的省份明显增加；经济发展、城镇化、技术创新、金融发展水平及产业结构升级对高速铁路开通与碳排放的耦合协调度具有正向影响；环境规制和外商直接投资对高速铁路开通与碳排放的耦合协调度具有负向影响。

关键词：高速铁路开通；碳排放；耦合协调度；时空演变；影响因素
中图分类号：U2-9 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250422004

Research on Spatial-Temporal Evolution Characteristics and Influencing Factors between Coupling Coordination Degree of Opening of High Speed Railway and Carbon Emission

GENG Liyan[1]，ZHANG Zhanfu[2]，WEI Jiajun[1]，CHEN Wenjuan[1]

(1. School of Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 2. Department of Electrical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University Sifang College, Shijiazhuang 051132, Hebei, China)

Abstract: As an important symbol of modern green transportation, the opening of high speed railway not only drives the economic growth of the areas along the line but also helps improve the environmental quality to a certain extent. This paper constructed an index system for the opening of high speed railways and carbon emissions based on the entropy method and studied the spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of the coupling coordination degree

收稿日期：2025-04-22 **修订日期**：2025-08-21
通信作者：张占福(1978—)，男，天津人，石家庄铁道大学四方学院电气工程系工程师。
基金项目：河北省教育厅人文社会科学研究重大课题攻关项目(ZD202309)

between the opening of high speed railways and carbon emissions in 30 provinces of China from 2010 to 2022 by using the coupling coordination degree model and the spatial econometric model. The conclusions are as follows: From 2010 to 2022, the development level of high speed railway shows a significant upward trend, and the overall carbon emission level shows a downward trend. The coupling coordination degrees at the national level, regional level, and provincial level have all significantly increased. As of 2022, the number of provinces in the coordinated development stage has significantly increased. Economic development, urbanization, technological innovation, the improvement of financial development level, and the upgrading of industrial structure have a positive impact on the coupling coordination degree between the opening of high speed railways and carbon emissions. Environmental regulations and foreign direct investment have a negative impact on the coupling coordination degree between the opening of high speed railways and carbon emissions.

Keywords: Opening of High Speed Railway; Carbon Emission; Coupling Coordination Degree; Spatio-Temporal Evolution; Influencing Factor

0　引言

随着二氧化碳等主要温室气体浓度的持续上升，已造成恶劣的全球性环境影响。对此，我国一直积极采取措施来促进碳减排。交通运输排放是我国碳排放的重要来源，《2030年前碳达峰行动方案》(国发〔2021〕23号)明确提出要加快形成绿色低碳运输方式。高速铁路作为现代化绿色交通的重要标志，其开通不仅带动了沿线地区的经济发展，也在一定程度上改善了环境质量。因此，推动高速铁路发展规模和低碳发展的协调发展，既有助于分区域合理规划高速铁路开通，又有助于减少碳排放、保护生态环境。

目前，高速铁路开通与碳排放的既有研究主要集中在3个方面。一是高速铁路开通产生的经济效应和环境效应。有关研究发现，高速铁路开通存在显著的空间外溢效应[1]，从而带动周边地区的经济增长[2]；同时，其开通也有助于降低城市污染物排放量，使环境质量得到明显改善[3-4]。二是碳排放的研究，包括测算方法、影响因素等。其中，联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)系数法是最常见的测算方法之一，常用于省域尺度下的碳排放测算[5]。还有探讨人口规模、城镇化、技术创新等因素对碳排放影响的研究[6]。三是高速铁路开通与碳排放之间的作用关系，多数研究表明高速铁路开通对碳排放具有抑制作用。就直接影响来看，高速铁路在运营期产生的碳排放更低，以百公里人均碳排放量计，约为航空运输的1/5和高速公路运输的1/3[7]。通过替代其他交通工具，高速铁路开通有效降低了碳排放[8]。就间接影响来看，高速铁路开通通过影响产业结构、经济集聚等因素，使得碳排放降低[9]。

综上所述，既有研究仅关注了高速铁路开通对碳排放的影响效应，并未探究高速铁路开通与碳排放的耦合协调关系、两者耦合协调度的演变规律及外部环境中的影响因素。本研究将耦合协调度纳入到高速铁路开通的碳排放研究中，基于2010—2022年我国30个省份的数据，分析高速铁路开通与碳排放耦合协调度的时空演变特征，并探究耦合协调度的影响因素。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

以我国30个省份为研究对象(不包括西藏自治区、台湾省、香港特别行政区、澳门特别行政区)，数据时间范围取2010—2022年，高速铁路开通数据主要来源于国家铁路局、中国国家铁路集团有限公司，碳排放数据来自《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》、各省统计年鉴及Wind数据库。

1.2　指标选取

(1) 高速铁路开通。参考《交通运输行业统计公报》和有关研究[10]，选择高速铁路里程和高速铁路车站数量构建高速铁路开通指标体系，进而衡量高速铁路发展水平。

(2) 碳排放。参考《可持续能源指标：指南和方法》和刘崇刚等[11]、史霄斌等[12]的研究，选取人均碳排放、碳排放强度、碳排放总量3个指标构建碳排放指标体系，以衡量碳排放水平。其中，人均

碳排放由碳排放总量与年末地区常住人口的比值表示，碳排放强度由碳排放总量与地区生产总值的比值表示。关于碳排放总量的测算方法，参考杨青林等[13]的研究。其中，能源消费量、标准煤折算系数来自《中国能源统计年鉴》，碳排放系数来自《IPCC国家温室气体清单指南(2006)》。高速铁路开通与碳排放指标体系如表1所示。

表1　高速铁路开通与碳排放指标体系

Tab.1　Opening of high speed railways and carbon emission index system

系统	要素层	指标层	属性
高速铁路开通	高速铁路发展规模	高速铁路里程/km	正向
		高速铁路车站数量/个	正向
碳排放	人口碳排放	人均碳排放/(万t/万人)	负向
	经济碳排放	碳排放强度/(万t/亿元)	负向
	能源碳排放	碳排放总量/万t	负向

（3）影响因素选取。根据既有研究，选取经济发展水平、城镇化水平、技术创新水平、产业结构升级、环境规制、外商直接投资、金融发展水平指标，分析高速铁路开通与碳排放耦合协调度的影响效应。其中，经济发展水平采用人均GDP的对数衡量；城镇化水平采用城镇人口占年末常住人口的比重衡量；技术创新水平采用专利申请授权量的对数衡量；产业结构升级采用产业结构升级指数(产业结构升级指数=第一产业占比×1+第二产业占比×2+第三产业占比×3)衡量；环境规制采用工业污染治理投资额占工业增加值的比重衡量；外商直接投资采用实际利用外资额占GDP比重衡量；金融发展水平采用年末金融机构存贷款总额占GDP的比重衡量。

1.3　研究方法

1.3.1　熵值法

测算高速铁路系统及碳排放系统综合评价指数之前，应确定各个指标的权重。常采用的方法有主观赋权法和客观赋权法，主观赋权法是根据主观重视程度确定指标权重，而客观赋权法是根据客观环境提供的原始信息确定指标权重，更为科学客观。熵值法是广泛使用的一种客观赋权法，本研究采用熵值法确定各指标权重，主要步骤包括数据标准化处理、确定指标权重、计算综合评价指数。

1.3.2　耦合协调度模型

耦合度是指2个及以上系统相互作用、相互影响的程度。因此，本研究通过测算耦合度，探究高速铁路开通与碳排放的相互作用关系。

$$C = \frac{2\sqrt{f(R)g(C)}}{f(R) + g(C)} \tag{1}$$

式中：C为耦合度，取值范围在0~1之间，取值越大则耦合度越高，表明两系统间的作用程度越强；$f(R)$为高速铁路发展水平，是高速铁路开通系统的综合评价得分；$g(C)$为碳排放水平，是碳排放系统的综合评价得分。$f(R)$和$g(C)$均由熵值法计算得到。

考虑到两系统的综合评价得分都较低且接近时，可能会出现伪协调，即耦合度不能真实反映两系统的协调水平。因此，引入耦合协调度模型来反映高速铁路发展水平和碳排放水平的耦合协调关系。

$$T = af(R) + bg(C) \tag{2}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{3}$$

式中：T为高速铁路发展水平与碳排放水平之间的综合协调指数；a，b为待定系数，由于在经济高质量发展过程中，推动高速铁路开通和降低碳排放同样重要，因此设定a=b=0.5；D为耦合协调度，取值范围在0~1之间，取值越大表明两系统间的耦合协调水平越高。

根据耦合协调度D可以划分为不同层次的耦合协调水平[14]，耦合协调度等级划分标准如表2所示。

表2　耦合协调度等级划分标准

Tab.2　Classification standard of coupling coordination degree

协调阶段	耦合协调度	协调等级
失调衰退	[0.0，0.1)	极度失调
	[0.1，0.2)	严重失调
	[0.2，0.3)	中度失调
	[0.3，0.4)	轻度失调
过渡发展	[0.4，0.5)	濒临失调
	[0.5，0.6)	勉强协调
协调发展	[0.6，0.7)	初级协调
	[0.7，0.8)	中级协调
	[0.8，0.9)	良好协调
	[0.9，1.0]	优质协调

1.3.3　空间自相关模型

空间自相关检验是使用空间计量模型的前提，通常需要借助莫兰(Moran's I)指数进行分析。常见的空间权重矩阵包括邻接矩阵、反距离平方矩阵、经济距离矩阵等。考虑到邻接矩阵简单地将权重取值为0或1，无法准确地反映出空间关系；经济距

离矩阵权重取值相对复杂，与影响因素可能存在内生性问题，且主观性较强；而反距离平方矩阵同时回避了以上2种矩阵的缺点，能够更客观地反映地区间的空间关系。因此，选择反距离平方矩阵来构建空间权重矩阵。

1.3.4　空间计量模型

常见的空间计量模型包括空间滞后模型(Spatial Autogressive Model，SAR)、空间误差模型(Spatial Error Model，SEM)、空间杜宾模型(Spatial Durbin Model，SDM)3种，SAR模型探讨的是邻近地区的被解释变量是否存在相互影响，SEM模型探讨的是未包含在解释变量里面的遗漏变量或随机冲击对被解释变量的影响，SDM模型则同时包括SAR与SEM 2种效应。SDM模型的表达式为

$$D_{it}=\alpha+\rho\sum_{j=1}^{n}W_{ij}D_{jt}+\beta_1\ln PGDP_{it}+\beta_2 UL_{it}+\beta_3\ln INN_{it}+\beta_4 IND_{it}+\beta_5 ENV_{it}+\beta_6 FDI_{it}+\beta_7 FIN_{it}+\eta_1\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\ln PGDP_{it}+\eta_2\sum_{j=1}^{n}W_{ij}UL_{it}+\eta_3\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\ln INN_{it}+\eta_4\sum_{j=1}^{n}W_{ij}IND_{it}+\eta_5\sum_{j=1}^{n}W_{ij}ENV_{it}+\eta_6\sum_{j=1}^{n}W_{ij}FDI_{it}+\eta_7\sum_{j=1}^{n}W_{ij}FIN_{it}+\upsilon_i+\gamma_t+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

$$\varepsilon_{it}=\lambda W\varepsilon_{it}+\mu_{it} \tag{5}$$

式中：$PGDP$为经济发展水平；UL为城镇化水平；INN为技术创新水平；IND为产业结构升级指数；ENV为环境规制；FDI为外商直接投资水平；FIN为金融发展水平；α为常数项；ρ为空间自相关系数；W_{ij}为空间权重矩阵；β为影响因素的待估系数；η为空间滞后项系数；υ_i为个体固定效应；γ_t为时间固定效应；ε_{it}为随机扰动项；λ为空间误差系数；μ_{it}为随机误差项。

当$\lambda=\eta=0$时，为空间滞后模型；当$\rho=\eta=0$时，为空间误差模型；当$\lambda=0$时，为空间杜宾模型。

2　时空演变特征分析

2.1　高速铁路发展水平与碳排放水平时序特征分析

（1）高速铁路发展水平的时序特征。根据不同地区的经济发展状况，将30个省份划分为4大地区。4大地区的划分结果如表3所示。2010—2022年全国及4大地区高速铁路发展水平的综合评价指数如图1所示。由图1可知，2010—2022年高速铁路发展水平呈现明显上升趋势，范围在0.057~0.473之间，年均增长率高达60.885%。从地区来看，4大地区的均值排名依次为中部、东部、东北和西部地区。首先，中部地区的高速铁路综合评价指数均值为0.373，远超全国高速铁路发展规模的平均水平，这可能与中部地区独特的地理位置有关。其次，东部地区的高速铁路综合评价指数均值为0.307，由于东部地区的经济发展水平高，其对交通基础设施的需求更高，使得高速铁路发展的时间早于其他地区。再次，东北地区的高速铁路综合评价指数均值为0.286，高于全国平均水平。西部地区的高速铁路综合评价指数均值为0.175，远低于全国高速铁路发展规模的平均水平，原因在于西部地区属于经济欠发达地区，且地理位置偏远。

表3　4大地区的划分结果

Tab.3　Division results of four major regions

地区	省级行政区
东部地区	北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南
中部地区	山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南
西部地区	内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆
东北地区	辽宁、吉林、黑龙江

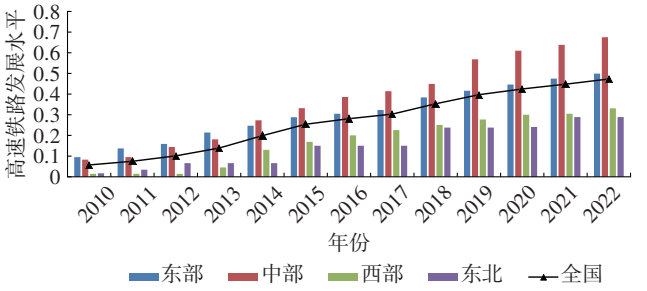

图1　2010—2022年全国及4大地区高速铁路发展水平的综合评价指数

Fig.1　Comprehensive evaluation index of high speed railway development levels nationwide and in four major regions from 2010 to 2022

（2）碳排放水平的时序特征。2010—2022年全国及4大地区碳排放水平的综合评价指数如图2所示。由图2可知，2010—2022年碳排放水平整体呈现下降趋势，从2010年的0.287到2022年的0.219，下降幅度约为23.732%。从地区来看，东北地区的碳排放综合评价指数均值为0.333，排名第1。其次，西部地区的碳排放综合评价指数均值为0.244，

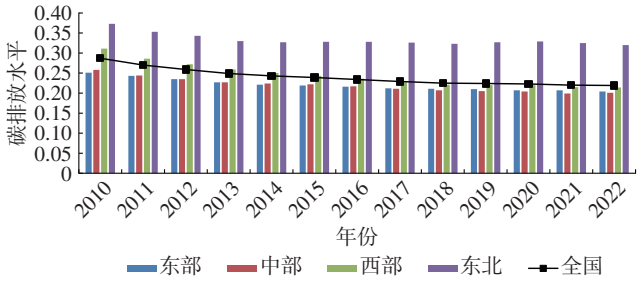

图2　2010—2022年全国及4大地区碳排放水平的综合评价指数

Fig.2　Comprehensive evaluation index of carbon emission levels nationwide and in four major regions from 2010 to 2022

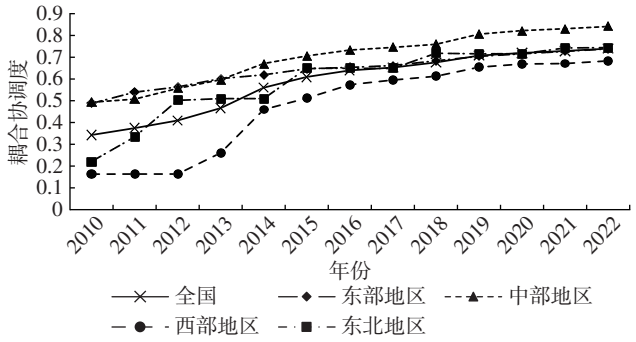

图3　2010—2022年高速铁路开通与碳排放耦合协调度的总体趋势

Fig.3　Overall trend of coupling coordination degree between opening of high speed railway and carbon emissions from 2010 to 2022

已超过全国均值0.240。最后是东部地区和中部地区，其碳排放综合评价指数分别为0.220和0.219，基本相近且均低于全国的平均水平，表明2个地区的低碳发展情况相对较好。

2.2　耦合协调度的时序演变特征

根据式(1)至(3)，测算得到高速铁路开通与碳排放的耦合协调度。2010—2022年高速铁路开通与碳排放耦合协调度的总体趋势如图3所示。由图3可知，2010—2022年高速铁路开通与碳排放的耦合协调度呈现稳定增加的趋势，从2010年的0.343增长至2022年的0.739。表明两者的耦合协调水平得到较大提升，基本实现了从失调衰退阶段到协调发展阶段的转变。这可能和高速铁路网络的持续扩张有关，并且我国经济发展模式也逐渐向绿色发展模式过渡，高速铁路发展水平和碳排放水平具有更好的耦合协调性。从地区来看，地区耦合协调度排名为中部>东部>东北>西部。原因在于中部地区和东部地区的高速铁路发展完善且经济水平高，对碳减排的促进作用更加明显；西部地区由于经济条件、地理位置等因素，高速铁路发展仍有待完善。

2.3　耦合协调度的空间演变特征

为分析高速铁路开通与碳排放耦合协调度的空间特征，2010—2022年我国30个省份耦合协调度的空间演变格局如表4所示。由表4可知，2010年处于失调衰退阶段的省份最多，其中多数省份的类型为极度失调。其次为处于过渡发展阶段的省份，约占全国的43.333%。处于协调发展阶段的省份仅有浙江和福建，类型为初级协调。2014年，极度失调的省份减少为3个，仅包括宁夏、内蒙古、云南，其他省份的耦合协调水平均有不同程度的提升。处于过渡发展阶段的省份共11个，处于协调发展阶段的省份显著增加，初级协调和中级协调的省份同时增加为7个，良好协调的省份增加为1个。2018年，

表4　2010—2022年我国30个省份耦合协调度的空间演变格局

Tab.4　Spatial evolution pattern of coupling coordination degree of 30 provinces in China from 2010 to 2022

年份	2010	2014	2018	2022
极度失调	黑龙江、吉林、内蒙古、新疆、青海、宁夏、甘肃、重庆、贵州、云南、广西	宁夏、内蒙古、云南	宁夏	—
轻度失调	北京、天津、河北、山西	黑龙江	—	—
濒临失调	陕西、江西、辽宁、上海	北京、天津、上海	北京、上海、内蒙古	上海、内蒙古
勉强协调	四川、山东、河南、湖北、湖南、广东、江苏、安徽、海南	新疆、青海、陕西、山西、重庆、贵州、吉林、海南	新疆、青海、山西、天津	新疆、青海、宁夏、山西、北京、天津
初级协调	浙江、福建	甘肃、辽宁、河北、山东、河南、江苏、安徽	河北、吉林、陕西、重庆、海南	吉林、陕西、海南
中级协调	—	四川、湖北、湖南、江西、浙江、福建、广西	黑龙江、辽宁、甘肃、山东、河南、江苏、安徽、湖北、云南、贵州	河北、辽宁、黑龙江、山东、重庆、云南、甘肃
良好协调	—	广东	四川、湖南、广西、江西、浙江、福建	江苏、浙江、安徽、福建、江西、河南、广西、四川、贵州
优质协调	—	—	广东	湖北、湖南、广东

全国的耦合协调水平持续上升，极度失调的省份仅剩宁夏，过渡发展阶段的省份共7个。新增优质协调类型协调发展阶段，且沿着西部地区的方向耦合协调类型明显提升。2022年，30个省份均处于过渡阶段或协调发展阶段，数量分别为8个、22个。其中，协调发展阶段的覆盖范围没有发生太大变化，但贵州等地的耦合协调类型发生改变。总体来看，2010—2022年高速铁路开通与碳排放的耦合协调度在持续增大，说明两者朝着更加协调的方向发展。

3　影响因素分析

3.1　空间自相关分析

2010—2022年高速铁路开通与碳排放耦合协调度的全局Moran's I指数如表5所示。由表5可知，各指数始终为正值，除2014年、2015年仅通过10%的显著性检验，其余年份均通过1%的显著性检验，表明高速铁路和碳排放的耦合协调度在空间上为显著正相关，存在高(低)值集聚现象。

表5　2010—2022年高速铁路开通与碳排放耦合协调度的全局Moran's I指数

Tab.5　Global Moran's I index of coupling coordination degree between opening of high speed railway and carbon emissions from 2010 to 2022

年份	I值	Z值	P值
2010	0.282	3.238	0.001
2011	0.257	2.986	0.001
2012	0.277	3.204	0.001
2013	0.294	3.402	0.000
2014	0.092	1.366	0.086
2015	0.103	1.500	0.067
2016	0.227	2.895	0.002
2017	0.188	2.479	0.007
2018	0.197	2.577	0.005
2019	0.248	2.931	0.002
2020	0.247	2.913	0.002
2021	0.221	2.650	0.004
2022	0.199	2.416	0.008

3.2　模型选择

为准确说明各影响因素对高速铁路开通与碳排放的耦合协调度的影响关系，应选择合适的空间计量模型。可以通过拉格朗日乘子(LM)检验、豪斯曼(Hausman)检验、似然比(LR)检验及沃尔德(Wald)检验等，确定空间计量模型的类型。检验结果如表6所示。由表6可知，本研究更适合选择双固定效应的空间杜宾模型进行影响因素分析。

表6　检验结果

Tab.6　Inspection results

检验	统计量	P值
LM误差	104.153	0.000
LM滞后	140.307	0.000
稳健LM误差	0.483	0.487
稳健LM滞后	36.636	0.000
Hausman检验	23.550	0.001
Wald空间误差	34.520	0.000
Wald空间滞后	28.670	0.000
LR空间误差	33.350	0.000
LR空间滞后	27.980	0.000

3.3　结果分析

根据检验结果，采用双固定效应的空间杜宾模型对耦合协调度的影响因素进行实证分析，回归结果如表7所示。由表7可知，高速铁路开通与碳排放的耦合协调度的空间滞后项系数是0.182，且通过了5%的显著性检验，表明地区的耦合协调度存在显著的空间溢出效应。

表7　回归结果

Tab.7　Regression results

变量	回归结果	变量	回归结果
ln*PGDP*	0.201* (0.118)	*W*×ln*PGDP*	0.608** (0.242)
UL	1.035*** (0.335)	*W*×*UL*	0.700 (0.828)
ln*INN*	0.020 (0.023)	*W*×ln*INN*	0.152** (0.059)
IND	0.002 (0.012)	*W*×*IND*	0.128** (0.053)
ENV	−6.704*** (2.061)	*W*×*ENV*	−2.098 (5.928)
FDI	−0.595 (0.371)	*W*×*FDI*	−2.958*** (0.974)
FIN	0.067*** (0.022)	*W*×*FIN*	0.058 (0.046)
变量相关性	0.182** (0.085)	R^2	0.313
		对数似然函数值	426.569

注：***，**，*分别表示在1%，5%，10%的水平下显著。表8同。

为进一步分析各影响因素对耦合协调度的边际影响，将影响因素的总效应分解为直接效应和间接效应，其中，直接效应指的是某个解释变量对本地区被解释变量的直接影响，间接效应则是指某个解释变量通过空间溢出效应对其他地区被解释变量的影响，分解结果如表8所示。

（1）经济发展水平的直接效应、间接效应及总

表8　分解结果

Tab.8　Decomposition results

变量	直接效应	间接效应	总效应
ln*PGDP*	0.225*	0.757***	0.982***
	(0.117)	(0.280)	(0.256)
UL	1.048***	1.107	2.155**
	(0.319)	(0.913)	(0.902)
ln*INN*	0.027	0.186***	0.213***
	(0.022)	(0.071)	(0.074)
IND	0.006	0.153**	0.159**
	(0.012)	(0.066)	(0.070)
ENV	−6.734***	−3.265	−9.999
	(2.045)	(7.421)	(7.873)
FDI	−0.685*	−3.727***	−4.412***
	(0.378)	(1.289)	(1.506)
FIN	0.069***	0.084	0.154***
	(0.023)	(0.052)	(0.057)

效应分别通过了10%，1%，1%的显著性检验。经济发展水平越高，说明本地区的可利用资金、资源越多，不仅有助于高速铁路的规模发展，也有助于碳减排能力的提升，同时推动了邻近地区的协调发展。

（2）城镇化水平的直接效应通过了1%的显著性检验，总效应通过了5%的显著性检验。城镇化水平的提高通常对本地区的交通基础设施提出了更高的要求，政府则通过加大对基础设施的投资以满足运输需求。同时，城镇人口占比大也意味着该地区技术水平更加先进，能源利用率更高，有利于碳减排。

（3）技术创新水平的直接效应未通过显著性检验，但间接效应、总效应同时通过了1%的显著性检验。高速铁路的开通极大地提高了高素质人才的流动，使得邻近地区的技术创新水平明显提升，从而推动低碳技术研发，能源利用率提高，碳排放降低。

（4）产业结构调整的直接效应未通过显著性检验，但间接效应、总效应同时通过了5%的显著性检验。高速铁路开通打破了要素流动的空间壁垒，技术、信息等要素都可以通过扩散效应流动到邻近地区，导致邻近地区的产业结构发生调整，碳排放降低。

（5）环境规制的直接效应通过了1%的显著性检验，但间接效应和总效应未通过显著性检验。政策具有滞后性，虽然环境规制有助于碳减排，但短期来看，其会对高速铁路开通产生负向作用，原因在于高速铁路本身是一个很复杂的项目，涉及站点选址、审批流程等事项，严格的环境标准可能会加大高速铁路开通的难度。

（6）外商直接投资的直接效应、间接效应及总效应分别通过了10%，1%，1%的显著性检验，系数为负。高速铁路开通有助于吸引外商投资，而外商直接投资的增加又对碳排放产生一些影响。根据实证结果，本地区和邻近地区的碳排放可能主要受到“污染天堂”假说的影响，导致碳排放增加。因此，外商直接投资不利于本地区和邻近地区耦合协调水平的提升。

（7）金融发展水平的直接效应、总效应均通过了1%的显著性检验，但间接效应未通过显著性检验。金融发展水平高，该地区可以通过债券、融资等方式降低高速铁路项目的资金压力，也可以吸引金融投资推动低碳项目的开展，有利于耦合协调度的提升。

4　结论与建议

4.1　结论

基于2010—2022年我国30个省份数据，运用熵值法测算各省份高速铁路发展水平和碳排放水平，通过耦合协调度模型测度各省份高速铁路开通与碳排放的耦合协调度，并从时空演变的维度分析耦合协调度的发展规律，随后运用空间计量模型研究影响耦合协调度的外部因素。结论如下。

（1）从时空演化特征来看，2010—2022年高速铁路发展水平呈现明显的上升趋势，碳排放水平整体呈现下降趋势。由时序演变特征可知，2010—2022年全国、4大地区的耦合协调度均呈现增加的趋势，基本实现了从失调衰退阶段到协调发展阶段的转变。由空间演变特征可知，2010—2022年处于失调衰退阶段的省份逐渐减少，处于协调发展阶段的省份逐渐增加。

（2）从影响因素来看，经济发展、城镇化、技术创新、金融发展水平及产业结构对高速铁路开通与碳排放的耦合协调度具有正向影响；外商直接投资对高速铁路开通与碳排放的耦合协调度具有负向

影响；受政策的滞后性影响，环境规制对耦合协调度也具有负向影响。

4.2　建议

（1）优化高速铁路网络布局，引领区域低碳发展。优先在碳排放压力大、交通需求高的中西部地区实施高速铁路网络加密工程，重点建设连接区域中心城市和重要产业基地的城际铁路线，形成“八纵八横+区域环线”的复合型网络。建立高速铁路与公路、航空联程运输智能调度平台，推动交通运输方式向低碳、绿色方向发展。另外，在高速铁路车站周边3~5 km范围内规划建设低碳产业示范区，重点发展智能制造、绿色物流等低能耗产业，配套实施站产城一体化开发，将高速铁路枢纽打造成为区域低碳经济新增长极[15]，推动高速铁路建设和低碳经济的协调发展。

（2）强化多维度政策协同，促进区域协调发展。制定差异化产业政策，引导外资投向绿色交通、清洁能源等领域，限制高耗能项目投资，扭转外资的负向效应。在城镇化进程中，推行站城一体开发模式，以高速铁路枢纽为核心构建紧凑型城市空间[16]，减少通勤碳排放。同时，加强金融支持，设立绿色交通专项信贷，鼓励企业通过绿色债券融资升级低碳技术。针对产业结构，需加快服务业与高端制造业向高速铁路沿线集聚，利用高速铁路的时空压缩效应促进资源高效配置。此外，应改进环境规制工具，强化市场机制作用(如碳交易)，通过经济激励增强企业减排动力，实现高速铁路建设、经济增长与碳减排的多赢。

参考文献：

[1] HUANG Y，XU W T. Spatial and Temporal Heterogeneity of the Impact of High Speed Railway on Urban Economy：Empirical Study of Chinese Cities[J]. Journal of Transport Geography，2021，91：102972.

[2] 王雨飞，倪鹏飞. 高速铁路影响下的经济增长溢出与区域空间优化[J]. 中国工业经济，2016(2)：21-36.
WANG Yufei，NI Pengfei. Economic Growth Spillover and Spatial Optimization of High Speed Railway[J]. China Industrial Economics，2016(2)：21-36.

[3] 张凯伦，孙华平，钟昌标. 高铁开通能否降低环境污染？[J]. 软科学，2022，36(11)：30-37，58.
ZHANG Kailun，SUN Huaping，ZHONG Changbiao. Can the Opening of High Speed Rail Reduce Environmental Pollution？[J]. Soft Science，2022，36(11)：30-37，58.

[4] YANG X H，LIN S L，LI Y，et al. Can High Speed Rail Reduce Environmental Pollution？ Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production，2019，239：118135.

[5] 高长春，刘贤赵，李朝奎，等. 近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展，2016，35(6)：747-757.
GAO Changchun，LIU Xianzhao，LI Chaokui，et al. Spatiotemporal Dynamics of Carbon Emissions by Energy Consumption in China from 1995 to 2014[J]. Progress in Geography，2016，35(6)：747-757.

[6] 曹洪刚，陈　凯，佟　昕. 中国省域碳排放的空间溢出与影响因素研究：基于空间面板数据模型[J]. 东北大学学报(社会科学版)，2015，17(6)：573-578，586.
CAO Honggang，CHEN Kai，TONG Xin. Study on the Spatial Spillover and Influencing Factors of China’s Provincial Carbon Emission：Based on the Spatial Panel Data Model[J]. Journal of Northeastern University (Social Science)，2015，17(6)：573-578，586.

[7] 王成新，苗　毅，吴　莹，等. 中国高速铁路运营的减碳及经济环境互馈影响研究[J]. 中国人口·资源与环境，2017，27(9)：171-177.
WANG Chengxin，MIAO Yi，WU Ying，et al. Carbon Reduction Effects and Interaction of Economy and Environment of High Speed Railway Transportation in China[J]. China Population，Resources and Environment，2017，27(9)：171-177.

[8] WANG B J，O’SULLIVAN A，SCHÄFER A W. Assessing the Impact of High Speed Rail on Domestic Aviation CO_2 Emissions in China[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2019，2673(3)：176-188.

[9] 徐　超，徐振宇. “双碳”目标下高铁开通影响城市碳排放的机制及效果[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版)，2023，38(1)：117-130.
XU Chao，XU Zhenyu. Mechanisms and Effects of the Influence of Opening High Speed Railway on Urban Carbon Emission under the Goal of “Carbon Peaking and Carbon Neutrality”[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Social Science)，2023，38(1)：117-130.

[10] 张清兰，程　钢，杨　杰. 高铁-人口-经济耦合协调的空间联系研究[J]. 测绘科学，2020，45(7)：190-198.
ZHANG Qinglan，CHENG Gang，YANG Jie. Study on the Spatial of Coupling Harmonization between High Speed Railway-Population-Economy[J]. Science of Surveying and Mapping，2020，45(7)：190-198.

[11] 刘崇刚，孙　伟，张落成. 长江三角洲碳排放与植被覆盖耦合协调时空格局及影响因素分析[J]. 地理科学，2023，43(1)：142-151.
LIU Chonggang，SUN Wei，ZHANG Luocheng. Spatio-Temporal Pattern of Coupling Coordination Degree between Carbon Emissions and Vegetation Cover and Its Influencing Factors of the Yangtze River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica，2023，43(1)：142-151.

[12] 史霄斌，康建军，栾志理. 黄河中下游城市群碳排放水平与经济高质量发展耦合研究[J]. 人民黄河，2024，46(11)：22-28.
SHI Xiaobin，KANG Jianjun，LUAN Zhili. Study on the Coupling of Carbon Emission Levels and High Quality Economic Development in Urban Agglomerations in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River[J]. Yellow River，2024，46(11)：22-28.

[13] 杨青林，赵荣钦，胡月明，等. 京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空耦合关系[J]. 生态学报，2023，43(9)：3458-3472.
YANG Qinglin，ZHAO Rongqin，HU Yueming，et al. Spatial-Temporal Coupling Relationship between Economic and Social Factors and Carbon Emissions in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Acta Ecologica Sinica，2023，43(9)：3458-3472.

[14] 丁学谦，吴　群，刘向南，等. 土地利用、经济高质量发展与碳排放耦合协调度及影响因素：来自中国282个地级市的经验研究[J]. 资源科学，2022，44(11)：2233-2246.
DING Xueqian，WU Qun，LIU Xiangnan，et al. Coupling and Coordination Degree of Land Use，High-Quality Economic Development，and Carbon Emissions and Influencing Factors in China：An Empirical Study of 282 Prefecture-Level Cities[J]. Resources Science，2022，44(11)：2233-2246.

[15] 鲁垠涛，邱圣明，郭淑慧，等. 基于组合赋权-TOPSIS法的铁路客站低碳技术适应性研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：59-68，78.
LU Yintao，QIU Shengming，GUO Shuhui，et al. Adaptability Study of Low-Carbon Technologies for Railway Passenger Stations Based on Combined Weighting-TOPSIS Method[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：59-68，78.

[16] 夏海山，任钰涵. 我国铁路客运枢纽站城空间关系演化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：223-232.
XIA Haishan，REN Yuhan. Research on Evolution of Spatial Relationship between Railway Passenger Transport Hub Stations and Cities in China[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(3)：223-232.

(责任编辑　李丹丹)