

我国交通运输业减污降碳协同效应的时空特征及其空间收敛分析

吴宇晗

福建师范大学数学与统计学院, 福建 福州

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月25日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

交通运输减污降碳协同增效对中国实现“双碳”目标具有重要的理论意义和实践价值。为深入探讨交通运输减污降碳协同效应的时空演变特征及影响路径, 基于2008~2022年中国30个省份(不含西藏及港澳台地区)的面板数据。通过构建交通运输减污降碳协同效应评价指标体系, 结合耦合协调度和空间收敛模型, 分析了其时空演变、收敛趋势及驱动因素。研究表明: 1) 2008~2022年, 交通运输减污降碳协同水平逐步提升, 从低水平协调阶段过渡到中级协调阶段。经济发达的东部省份协同水平较高。2) 2008~2022年, 交通运输减污降碳协同效应呈现出明显的空间收敛趋势, 并显示出空间溢出效应。3) 能源消费结构、污染水平、运输结构、经济发展、对外开放、污染治理是影响交通运输减污降碳协同效应的核心驱动因素。研究表明, 交通运输减污降碳协同效应逐渐增强, 区域差异缩小, 各影响因素具有显著的空间异质性。因此, 建议制定多维度的减污降碳协同治理政策, 充分发挥先进地区的引领作用, 进一步推动交通运输绿色、低碳、高质量发展。

关键词

交通运输, 减污降碳, 协同效应, 时空演变, 空间收敛性

The Spatiotemporal Characteristics and Spatial Convergence Analysis of the Synergistic Effects of Pollution Reduction and Carbon Emission Reduction in China's Transportation Sector

Yuhan Wu

School of Mathematics and Statistics, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

文章引用: 吴宇晗. 我国交通运输业减污降碳协同效应的时空特征及其空间收敛分析[J]. 可持续发展, 2025, 15(11): 81-94. DOI: 10.12677/sd.2025.1511311

Abstract

The collaborative enhancement of pollution reduction and carbon emission reduction in transportation is crucial for China's achievement of its "dual carbon" goals. This study, based on panel data from 30 provinces (excluding Xizang, Hong Kong, Macau, and Taiwan region) from 2008 to 2022, explores the spatial-temporal evolution and influence pathways of these collaborative effects. By constructing an evaluation index system and applying coupling coordination and spatial convergence models, the study analyzes the evolution, convergence trends, and driving factors of these effects. The findings show: 1) From 2008 to 2022, the collaborative level of pollution reduction and carbon emission reduction in transportation steadily increased, shifting from low-level to middle-level coordination, with economically developed eastern provinces exhibiting stronger collaboration. 2) A clear spatial convergence trend and spatial spillover effects were observed during this period. 3) Key driving factors include energy consumption structure, pollution levels, transportation structure, economic development, foreign openness, and pollution governance. The study concludes that while the collaborative effects are strengthening, regional disparities are decreasing, and spatial heterogeneity among influencing factors remains significant. Therefore, multi-dimensional governance policies are recommended to enhance collaboration, leveraging advanced regions to promote green, low-carbon, and high-quality transportation development.

Keywords

Transportation, Pollution Reduction and Carbon Emission Reduction, Synergies, Spatiotemporal Evolution, Spatial Convergence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化和可持续发展议程不断推进的背景下,减污降碳已成为各国共同面对的重要挑战[1]。我国正处于污染防治和碳达峰、碳中和目标协同推进的关键阶段,污染物排放与温室气体排放具有“同根同源、同过程”的特征[2],相关政策文件已明确提出要统筹推进减污降碳,并将其作为生态文明建设的重要内容[3][4]。因此,研究交通运输业的减污降碳协同效应,不仅对推动产业绿色低碳转型具有现实意义,也是实现“双碳”目标的必然要求。交通运输是全球温室气体排放增长最快的部门之一,碳排放约占全球总量的20%,中国在其中居第二位,仅次于美国[5][6]。长期以来,我国交通运输业存在高能耗、高排放路径依赖,运输方式结构单一,能源消费偏向化石燃料,加之区域发展水平差异明显,导致交通运输减污降碳协同效应呈现出显著的空间不均衡[7]。因此,有必要在全国及区域层面系统分析交通运输减污降碳协同效应的时空演化规律,并识别其核心驱动因素。

现有研究在协同效应测度与影响机制方面积累了较多成果。在方法上,学者们常采用交叉弹性分析、相关系数法和耦合协调模型来衡量减污降碳的协同水平[8]-[10];在时空特征研究中,核密度估计、空间自相关分析和社会网络分析等方法被广泛应用,揭示了区域协同效应的演化趋势与空间集聚特征[11][12]。在应用领域方面,研究多集中于工业、农业等行业[13],在交通运输领域,部分学者探讨了碳排放格局与

经济发展的关系[14], 或分析了交通运输碳排放的时空差异[15], 但整体上仍缺乏对交通运输减污降碳协同效应及其空间收敛性的系统研究。

本文以我国交通运输业为研究对象, 构建综合评价指标体系, 测度 2008~2022 年间交通运输减污降碳协同效应的时空演变特征, 结合空间收敛模型系统分析其省际差异及收敛趋势, 并探讨影响因素及区域异质性。本文的贡献主要体现在三个方面: (1) 从协同效应视角切入交通运输绿色转型研究, 弥补了现有文献对该领域关注不足的缺口; (2) 引入空间收敛分析方法, 揭示交通运输减污降碳协同效应的动态趋同性与空间溢出效应; (3) 结合多维度影响因素, 探讨区域差异与驱动机制, 为制定交通运输减污降碳的差异化政策提供实证依据。

2. 研究方法

2.1. 熵权法

考虑到熵权法能够对数据进行客观赋权, 较为客观地反映各指标的实际情况和重要性[16], 本文采用熵权法测度交通运输碳减排(U_1)、经济发展(U_2)、生态环境(U_3) 3 个系统的发展指数。具体计算过程为:

第一步, 标准化处理:

正向指标:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (1)$$

负向指标:

$$Z_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (2)$$

Z_{ij} 为标准值, 若 Z_{ij} 为 0, 以 0.00001 代替; X_{ij} 表示 i 系统 j 指标的值; $\max X_{ij}$ 和 $\min X_{ij}$ 分别表示指标 X_{ij} 中的最大值和最小值。

第二步, 计算各项指标权重:

$$p_{kj} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad (3)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \cdot \sum_{i=1}^n p_{kj} \ln(p_{kj}) \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (5)$$

式中: p_{kj} 为 k 省 j 指标比重; n 为城市数量; e_j 为 j 指标熵值; w_j 为 j 指标权重。

第三步, 计算各个系统综合发展指数:

$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j Z_{ij} \quad (6)$$

式中, U_i 为各个系统综合发展指数, 能够反映各个系统综合效益情况。

2.2. 耦合协调度

耦合协调度模型常用于衡量多个系统之间的相互关系程度[17]，本文通过构建三个子系统以衡量交通运输减污降碳协同水平，分别为交通运输碳减排子系统、经济发展子系统与生态环境子系统，通过分析三者之间的关系，并采用耦合协调度模型来衡量交通运输碳协同水平，表 1 为交通运输减污降碳协同效应发展水平等级划分，模型具体如下[18]：

$$C = \left\{ \frac{U_1 \times U_2 \times U_3}{[(U_1 + U_2 + U_3)/3]^3} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$T = aU_1 + bU_2 + cU_3 \quad (8)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (9)$$

式中 C 表示耦合度，且 $C \in [0,1]$ ； U_1 表示交通运输碳减排指数， U_2 表示经济发展指数， U_3 表示生态环境发展指数； T 为三个子系统的协调指数； D 为交通运输减污降碳耦合协调度且 $D \in [0,1]$ ，当 D 值越大时，交通运输减污降碳协同效应水平越高； a 、 b 、 c 分别表示三个子系统的权重。在大部分研究中，通常假设各子系统的重要性一致[19]，则有 $a = b = c = 1/3$ ，表示三个子系统对交通运输减污降碳协同水平的影响同等重要。

Table 1. Classification of development levels for the synergistic effects of pollution reduction and carbon reduction in transportation

表 1. 交通运输减污降碳协同效应发展水平等级划分

等级	耦合等级划分	耦合协调度得分	协调阶段
1	极度失调	[0.0,0.1]	失调衰退类
2	严重失调	(0.1,0.2]	
3	中度失调	(0.2,0.3]	
4	轻度失调	(0.3,0.4]	
5	濒临失调	(0.4,0.5]	过渡发展类
6	勉强协调	(0.5,0.6]	
7	初级协调	(0.6,0.7]	协调发展类
8	中级协调	(0.7,0.8]	
9	良好协调	(0.8,0.9]	
10	优质协调	(0.9,1.0]	

2.3. 空间收敛分析

β 收敛指的是交通运输业减污降碳协同水平随时间发展逐渐接近稳态的过程，其中包含两种类型，分别为绝对 β 收敛和条件 β 收敛[20]。本研究为了探索交通运输减污降碳协同水平，分别构建空间绝对 β 收敛模型与空间条件 β 收敛模型如下：

$$\ln \left(\frac{Y_{i,t+1}}{Y_{it}} \right) = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} \ln \left(\frac{Y_{i,t+1}}{Y_{it}} \right) + \alpha + \beta \ln(Y_{it}) + \xi \sum_{j=1}^n w_{ij} \ln(Y_{it}) + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

$$\mu_{it} = \theta \sum_{j=1}^n w_{ij} u_{it} + \varepsilon_{it} \tag{11}$$

为了分析各省之间交通运输减污降碳协同效应的空间关联。模型中包括了空间滞后系数 ρ ，表示相邻地区的交通运输减污降碳协同水平变化对本省造成的影响； θ 表示空间误差系数。 ξ 表示空间滞后系数，揭示相邻地区交通运输减污降碳协同水平空间溢出效应。考虑到地理距离能够刻画省际交通运输联系的空间邻近效应，且与邻接矩阵相比，地理距离矩阵避免了单纯依赖行政边界的局限，更能反映省份之间真实的空间相互作用，故采用空间地理距离权重矩阵 w_{ij} 。如果 $\theta = 0$ ，则采用空间杜宾模型；若 $\theta = \xi = 0$ ，则为空间自回归模型；如果 $\rho = \xi = 0$ ，则采用空间误差模型。

在空间绝对 β 收敛模型的基础上，进一步引入控制变量，便于分析交通运输减污降碳协同效应的空间条件 β 收敛。

$$\ln\left(\frac{Y_{i,t+1}}{Y_{it}}\right) = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} \ln\left(\frac{Y_{j,t+1}}{Y_{jt}}\right) + \alpha + \beta \ln(Y_{it}) + \xi \sum_{j=1}^n w_{ij} \ln(Y_{jt}) + \lambda X_{i,t+1} + \tau \sum_{j=1}^n w_{ij} \ln X_{j,t+1} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \tag{12}$$

$$u_{it} = \theta \sum_{j=1}^n w_{ij} u_{it} + \varepsilon_{it} \tag{13}$$

式中， τ 为控制变量的空间滞后系数， λ 为对应的参数向量。

2.4. 指标体系构建

本研究以“排放压力 - 发展基础 - 环境响应”为思路，构建交通运输减污降碳协同效应综合评价指标体系。排放压力是衡量交通运输系统减污降碳现状的核心维度，能源消费结构、运输方式选择以及碳排放强度能够直接反映交通活动对环境造成的压力与减排难度。发展基础是推动交通运输绿色转型的重要前提，经济发展水平与发展潜力不仅决定交通运输活动的规模，也影响减污降碳所需的资金、技术与制度条件，因此在体系中纳入经济增长指数、城镇化水平和外商直接投资等指标。环境响应体现了区域应对交通运输环境压力的治理与改善能力，通过污染治理投资、污水处理率和绿色技术应用等指标，可以衡量政府与社会为实现减污降碳目标所采取的行动力度与成效。综上，所构建的指标体系从三个环节刻画了交通运输减污降碳的机制，为协同效应的测度与比较提供了坚实支撑。具体来看，则以交通运输碳减排、经济发展和生态环境三个子系统为基础，参考任晓松[21]等相关研究，选取 22 个关键指标构建综合评价体系(表 2)，用于衡量交通运输减污降碳的协同水平。

Table 2. Integrated evaluation index system for the synergistic effects of pollution abatement and carbon reduction in transportation

表 2. 交通运输减污降碳协同效应综合评价指标体系

子系统		一级指标	二级指标	测算方法及单位	权重	指标性质
交通运输减污降碳协同水平	投入(0.693)		交通运输能源消耗量	10 ⁴ t (以标准煤计)	0.215	-
			能源强度	交通运输能源消耗量/交通运输生产总值[10 ⁴ t/(10 ⁸ 元)]	0.033	-
			铁路营业里程	10 ⁴ km	0.162	-
			公路里程	10 ⁴ km	0.282	-
	产出(0.307)		交通运输碳排放总量	10 ⁴ t	0.179	-

续表

经济发展(U2)	经济发展水平 (0.421)	交通运输碳排放强度	交通运输碳排放总量/交通运输生产总值[t/(10 ⁴ 元)]	0.035	-
		交通运输碳排放密度	交通运输碳排放总量/各地区面积(t/km ²)	0.092	-
		交通运输生产总值	10 ⁸ 元	0.244	+
	经济发展潜力 (0.579)	交通运输经济增长指数	当期 GDP/上期 GDP(%)	0.036	+
		交通运输经济发展水平	交通运输生产总值/地区生产总值(%)	0.142	+
		人均地区生产总值	10 ⁴ 元/人	0.169	+
	生态环境(U3)	城镇化率	%	0.085	+
		外商直接投资水平	外商直接投资(万元)/GDP(亿元)	0.325	+
		SO ₂ 排放量	10 ⁴ t	0.029	-
	环境治理 (0.884)	PM _{2.5}	10 ⁴ t	0.035	-
		工业烟尘排放量	10 ⁴ t	0.015	-
		工业废水排放量	10 ⁴ t	0.035	-
		森林覆盖率	%	0.135	+
		污染治理投资额	10 ⁴ 元	0.201	+
		生活垃圾无害化处理率	%	0.025	+

		城市污水处理率	%	0.024	+
		绿色专利申请数	件	0.498	+

2.5. 数据来源

本文以中国 30 个省份(不包括西藏及港澳台地区)为研究对象,研究时段为 2008 年至 2022 年。省域交通运输能源消费量、平均低位发热量以及折标准煤系数的相关数据来自《中国能源统计年鉴》。在交通运输能源消费量的计算中,选择了“交通运输、仓储和邮政业”部分的数据,由于仓储和邮政业的能源消耗占比较小,因此本文主要关注交通运输领域的能源消耗[22]。为计算交通运输领域的碳排放量,本研究选用了七种能源来源:原煤、汽油、柴油、天然气、煤油、燃料油及电力。以上能源的单位碳含量、碳氧化率以及区域电网的平均二氧化碳排放指标,参考了《省级温室气体清单编制指南》中的相关数据。外商直接投资数据来源于《中国外资统计公报》。交通运输的生产总值、铁路营业里程、公路里程、城镇化率、地区生产总值以及城市生活垃圾处理率数据均来源于《中国统计年鉴》。绿色专利申请数量则取自 CNRDS 的 GPRD 绿色专利数据库。此外,二氧化硫排放量、工业废水排放量、工业烟尘排放量、建成区绿地率、污染治理投资额、城市污水处理率等数据来自《中国环境统计年鉴》。各省的面积信息由各省政府官网提供。

3. 结果与讨论

3.1. 交通运输减污降碳协同水平的时序特征分析

2008 年至 2022 年,全国交通运输碳排放耦合协调度持续上升。2008~2012 年处于勉强协调阶段,

2013年后进入初级协调阶段,2020年“双碳”目标提出后我国交通运输减污降碳协同水平由0.658提升至0.710从而项良好协调阶段迈进。可见政策推动和技术进步促进了绿色能源应用和交通系统优化,助力碳减排与绿色发展协同推进。

基于我国2008年至2022年交通运输减污降碳协同水平的耦合协调度测算结果(表3),从交通运输碳减排发展指数(U_1)、经济发展指数(U_2)和生态环境发展指数(U_3)三个子系统出发,对其演变趋势与协同机制进行分析。在交通运输碳减排方面,指数呈现明显的“先降后升”趋势。2008年 U_1 值为0.736,至2012年下降至0.474,表明该阶段交通运输碳排放压力较大。2013年至2019年间, U_1 在0.3~0.5内波动,减排效果没有显著提升。2020年后,随着“双碳”战略的实施和绿色交通体系的加速建设, U_1 显著回升,2022年达到0.571,反映了双碳政策的有效性。经济发展子系统整体呈波动上升态势。2008年 U_2 为0.447,2012年前略有回落。2013年起,随着经济发展和交通运输业现代化进程加快, U_2 稳步提高,2019年升至0.508。2020年虽因疫情影响略下降,但2021~2022年迅速恢复并达到0.618的高位。生态环境子系统表现出显著的改善趋势。2008年 U_3 仅为0.070,显示早期生态环境承载压力较大。随着国家生态文明建设的推进, U_3 自2016年起快速上升,2020年突破0.9,2022年达0.901。这一变化明确表明污染治理、生态修复和绿色交通基础设施建设取得实质性成效。

Table 3. The level of coordination in pollution reduction and carbon reduction in transportation

表 3. 我国交通运输减污降碳协同水平

年份	U_1	U_2	U_3	D	协调等级
2008	0.736	0.447	0.070	0.533	勉强协调
2009	0.645	0.351	0.152	0.570	勉强协调
2010	0.590	0.367	0.214	0.599	勉强协调
2011	0.541	0.375	0.195	0.584	勉强协调
2012	0.474	0.350	0.269	0.596	勉强协调
2013	0.542	0.367	0.299	0.625	初级协调
2014	0.480	0.392	0.335	0.631	初级协调
2015	0.418	0.404	0.423	0.644	初级协调
2016	0.365	0.434	0.666	0.687	初级协调
2017	0.323	0.491	0.677	0.689	初级协调
2018	0.308	0.502	0.666	0.685	初级协调
2019	0.247	0.508	0.647	0.658	初级协调
2020	0.325	0.438	0.902	0.710	中级协调
2021	0.527	0.618	0.914	0.817	良好协调
2022	0.571	0.563	0.901	0.814	良好协调

为揭示2008~2022年我国交通运输减污降碳协同效应的动态变化,本研究利用三维核密度估计图(图1)呈现了其分布格局与演化特征。结果显示,核密度曲线整体右移,表明各地区协同水平持续提升,尤其在“双碳”目标提出后显著加快。在分布形态上,峰高“先升后波动”,主峰宽度增加,反映出协同水平趋于集中,但区域差异仍然存在。东部地区始终保持较高水平,而中西部与东北地区虽有改善但整体偏低。从延展特征看,右拖尾减弱、左拖尾扩展,说明低水平地区逐渐追赶,高水平地区保持领

先；同时，波峰数量逐渐减少，极化现象明显缓解。总体而言，2008~2022 年我国交通运输减污降碳协同水平呈稳步上升趋势，区域间同步性不断增强。2008~2022 年我国 30 个省份减污降碳协同水平见附录。

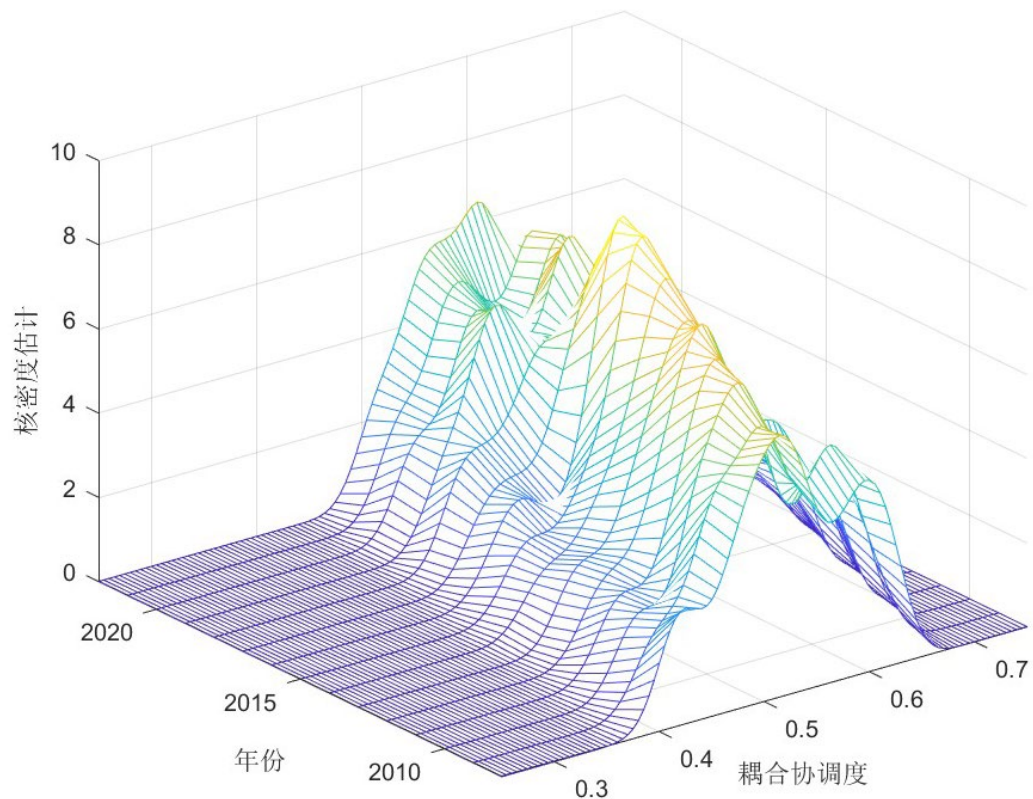
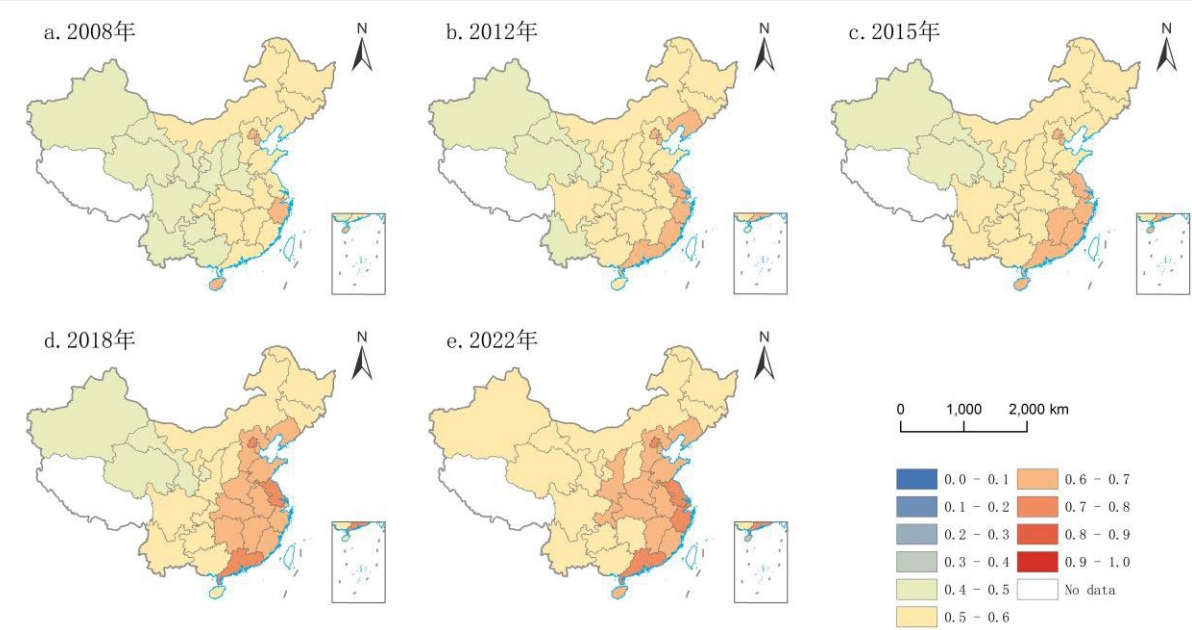


Figure 1. Kernel density estimation map of pollution and carbon reduction synergies in China's transportation sector
图 1. 交通运输减污降碳协同效应核密度估计图

3.2. 交通运输减污降碳协同水平的空间特征分析

从 2008 年到 2022 年，基于我国交通运输减污降碳耦合协调度空间演变图(图 2)分析可得我国交通运输减污降碳的耦合协调度在空间上呈现出固化和动态变化的特征。固化特征表现在一些省份始终保持在相同的耦合协调阶段。例如，上海、江苏等东部沿海省份，在整个时期内耦合协调度较高，始终处于“良好协调”或“中级协调”阶段，显示出这些地区在政策执行和绿色发展方面取得了较为稳定的成效。动态变化特征则体现在一些省份的耦合协调度随着时间的推移逐步上升，尤其是在中西部及北方地区。2008 至 2012 年间，许多省份的交通运输减污降碳协同水平较低，大部分处于“濒临失调”或“勉强协调”阶段。到 2012 至 2015 年，部分省份的耦合协调度有所提高，更多地区进入“勉强协调”或“初级协调”阶段，如云南、江西等地交通运输减污降碳取得初步成效。2015 至 2018 年间，大多数省份的耦合协调度进一步提升，尤其是东部地区，许多省份进入“初级协调”阶段。到了 2018 至 2022 年，全国交通运输减污降碳协同水平均在 0.5 以上，即都进入了“勉强协调”阶段，且东部地区的交通运输减污降碳协同水平较中西部地区高。2008 至 2022 年我国各省份的交通运输碳排放耦合协调度整体呈现上升趋势，减污降碳绿色发展的成效日益显著。但仍存在较强的区域的不平衡性，需要制定更加具体的绿色低碳发展政策，以促进各省份减污降碳与扩绿增长的协同推进。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2023) 2767 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. Spatial evolution of coupled pollution and carbon reduction in China's transportation sector
图 2. 我国交通运输减污降碳耦合协调度空间演变图

3.3. 交通运输减污降碳协同水平的影响因素分析

本研究参考陈晓红[23]、丁学谦[24]等人的研究，选取了 6 个变量作为协同水平的驱动因素，包括污染水平、运输结构、经济发展、能源消费结构、对外开放和污染治理。主要基于以下原因：污染水平体现交通运输活动对大气环境的压力，是协同水平的关键约束；运输结构反映不同交通方式的比重，高公路依赖度往往导致高能耗与高排放，因此对协同效应具有重要影响；经济发展水平决定了地区交通需求与减排能力，其对协同水平可能既有正向的推动，也存在结构性负担；能源消费结构是决定碳排放强度的因素，煤炭依赖度越高，减污降碳难度越大；对外开放通过资本流入与技术扩散提升交通运输系统的绿色转型能力，是重要的外部驱动因素；污染治理投入则反映了政府与社会在环境保护方面的努力，其对协同水平的提升具有直接作用。综上，这六个因素兼顾了排放压力、结构约束、发展动力与政策响应，能够较为全面地解释交通运输减污降碳协同效应的差异来源，具体见表 4。考虑到变量之间的共线性可能影响模型的准确性，本文对影响因素进行了共线性检验。结果显示，各因素的 VIF 值均低于 10，且 VIF 的平均值为 1.74，表明各变量之间不存在显著的共线性问题。

Table 4. Factors affecting the synergy level of transportation pollution reduction and carbon reduction
表 4. 交通运输减污降碳协同水平影响因素

	变量名称	全称	变量符号	变量说明	vif	1/vif
被解释变量	耦合协调度	Degree	D	耦合协调度模型计算结果		
解释变量	污染水平	Pollution Level	pl	SO ₂ 排放量	2.61	0.38
	运输结构	Transportation Structure	ts	公路里程	1.57	0.64
	经济发展	Economic Development	edl	交通运输生产总值/地区生产总值	1.03	0.97

续表

能源消费结构	Energy Consumption Structure	ecs	煤炭消费量占能源消费总量的比重	2.38	0.42
对外开放	Foreign Direct Investment Linkages	fdil	外商直接投资额	1.25	0.80
污染治理	Pollution Governance	pg	污染治理投资额	1.58	0.63

3.4. 基于空间 β 收敛的追赶效应分析

根据检验结果,本文选用时空固定效应的空间滞后模型进行空间绝对 β 收敛分析。表 5 显示,2008~2022 年在空间绝对 β 收敛模型中,交通运输减污降碳协同水平的系数显著为负($-0.120, p < 0.01$),表明我国各地区的协同水平存在显著的空间收敛特征,协同水平较低的地区增长速度更快,呈现出追赶效应。收敛速度为 0.009,对应的半程收敛期约为 75.93 年,说明虽然存在 β 收敛,但收敛过程较为缓慢。这意味着在全国范围内,区域间交通运输减污降碳水平的差距有缩小趋势,但长期来看仍需较长时间才能实现高度均衡。同时,模型的空间相关系数 ρ 在水平为 0.1 时显著为正,表明交通运输减污降碳协同水平存在一定的空间溢出效应,即相邻地区之间具有相互影响和联动性。

在进一步引入控制变量的空间条件 β 收敛模型中,交通运输减污降碳协同水平的系数依然显著为负($-0.371, p < 0.01$),表明即使在控制污染水平、运输结构、污染治理、对外开放、能源消费结构和经济增长等因素后,区域间的交通运输减污降碳水平仍表现出显著的收敛趋势。值得注意的是,收敛速度提升至 0.033,半程收敛期缩短至约 20.94 年,显著快于绝对收敛模型。这表明区域差异在控制相关条件因素后能够更快收敛,说明外部条件和结构性因素在加速区域追赶过程中起到了关键作用。在具体变量方面,污染水平系数显著为负($-0.015, p < 0.01$),表明环境污染越严重的地区,其交通运输减污降碳协同水平提升受到抑制;运输结构对协同水平具有正向影响($0.001, p < 0.05$),说明运输方式优化有助于减污降碳协同发展;污染治理投入($0.016, p < 0.01$)、对外开放($0.792, p < 0.01$)与经济增长($0.050, p < 0.01$)均表现为显著促进作用,表明资本与技术流入以及经济发展水平提升能够有效推动区域绿色转型。能源消费结构的负向效应($-0.040, p < 0.1$),则表明高碳排放能源依赖仍是制约交通运输绿色转型的障碍。从空间效应分解结果来看,直接效应显著为负($-0.372, p < 0.01$),间接效应也为负($-0.052, p < 0.1$),说明不仅本地区的初始水平会影响其自身收敛速度,相邻地区的初始水平也会对本地区产生负向影响。

Table 5. The spatial convergence results of collaborative pollution reduction and carbon reduction.

表 5. 交通运输减污降碳协同水平空间收敛分析结果

项目	空间绝对 β 收敛分析	空间条件 β 收敛分析
	(SAR)	(SAR)
ρ	0.138*	0.133*
	(1.74)	(1.91)
交通运输减污降碳协同水平	-0.120^{***}	-0.371^{***}
	(-6.73)	(-13.40)
污染水平		-0.015^{***}
		(-9.42)

续表

运输结构		0.001** (2.18)
污染治理		0.016*** (7.17)
对外开放		0.792*** (10.92)
能源消费结构		-0.040* (-1.91)
经济增长		0.050*** (9.67)
直接效应	-0.034*** (-2.91)	-0.372*** (-13.51)
间接效应	-0.010** (-2.09)	-0.052** (-1.83)
总效应	-0.045*** (-2.98)	-0.424*** (-11.31)
半程收敛周期	75.930	20.939
收敛速度	0.009	0.033
时间效应	YES	YES
固定效应	YES	YES
Hausman 检验	39.45***	118.66***
r ²	0.114	0.496
sigma2_e	0.000*** (14.47)	0.000*** (14.48)

注：t statistics in parentheses * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 。

4. 结论与政策建议

4.1. 结论

本研究基于 2008~2022 年我国 30 个省份的面板数据，测度并分析了交通运输减污降碳协同效应的时空特征及收敛趋势，得到以下主要结论：

从整体趋势来看，全国交通运输减污降碳协同水平持续提升，表现出由低水平逐渐向良好协调阶段过渡的特征。这与环境库兹涅茨曲线假说相吻合，即在经济发展的早期，环境污染和碳排放会随之上升，但在一定阶段后，随着产业升级、绿色技术应用和规制政策加强，协同效应逐渐增强[25]。从驱动因素来看，污染治理、运输结构优化、经济发展和对外开放均对协同水平产生显著正向影响。这说明政策投入、运输方式的转变、资本与技术流入以及经济增长共同推动了绿色转型。运输结构对交通运输减污降碳协同水平具有显著的正向作用，提升铁路和水运比重、推广新能源汽车等运输方式优化措施，能够有效缓解交通运输业的碳排放压力，从而推动交通系统向绿色低碳转型。这一发现与黄志辉等[26]的研究结果基

本一致，即运输结构调整不仅是控制碳排放的重要抓手，也是实现交通运输业可持续发展的关键途径。经济增长的促进作用说明，经济发展不仅带来资金和技术支撑，还增强了绿色转型的可持续性。对外开放的显著效应主要体现在通过吸引国际资本与先进低碳技术的引入，促进本地交通运输业绿色化升级，并通过示范效应、产业链关联等机制向周边地区扩散，从而形成区域间的联动效应，最终推动全国交通运输业绿色低碳转型的整体进程。能源消费结构和污染水平对协同水平产生了负向影响。这揭示出交通运输业存在碳锁定效应和路径依赖问题，即对化石燃料的长期依赖和高排放惯性阻碍了绿色转型的进程，若缺乏外部政策干预和能源结构调整，交通运输将持续维持在高碳轨道[27]。从空间效应来看，交通运输减污降碳协同水平存在显著的空间 β 收敛特征。空间绝对收敛结果表明，低水平地区存在追赶效应，但收敛速度较慢，半程收敛期长达 75.93 年。空间条件 β 收敛则表明，在控制经济发展、能源消费结构等条件后，收敛速度显著加快，半程收敛期缩短至 20.94 年。同时，空间溢出效应的显著存在说明，区域间在交通运输绿色转型中的发展具有明显的联动特征。

从不同区域层面分析，东部地区在政策引导、技术创新和基础设施建设等方面保持领先地位，表现出“先行者优势”；中西部和东北地区则在政策支持和外部要素流入的带动下逐步追赶，但仍受制于能源结构和运输方式单一等约束。这一结果不仅揭示了区域间的不平衡性，也说明在实现全国绿色转型过程中，需强化区域协同和差异化政策设计。

4.2. 政策建议

首先，应继续强化污染治理投入与政策规制。结果表明污染治理对协同水平具有显著促进作用，因此需加大环保设施建设与绿色技术研发的财政支持力度，并通过严格的排放标准和监管机制，提升治理效能，推动减污与降碳的协同增效。完善多元指标考核体系，形成地方政府之间的良性竞争激励格局，协同推进交通运输减污降碳与经济增长[28]。其次，加快推进运输结构优化。应发展铁路和水运等低碳运输方式，同时加快新能源汽车的推广和充电基础设施建设，从源头上降低交通运输对化石燃料的依赖，缓解碳排放压力，提升交通运输体系的低碳韧性。第三，充分利用经济发展与对外开放的协同作用。在经济增长过程中，应注重将新增资源投入引导至绿色交通领域，确保资金和技术能够服务于绿色低碳转型。同时，深化对外开放，吸引国际资本与低碳技术，并通过技术扩散和示范效应带动区域间联动发展，形成绿色转型的“溢出效应”。第四，着力推动能源消费结构转型。针对能源消费结构的负向效应，应加快减少交通运输领域对煤炭、石油等高碳能源的依赖，积极推动清洁能源和新能源的应用，构建多元化、低碳化的交通能源体系，以削弱碳锁定效应和路径依赖。最后，应注重区域差异化政策设计与协同治理。东部地区应发挥示范引领作用，将成功经验和技术创新向其他地区辐射，实现依法降碳和依法治污协同，加强减污降碳同时实现经济社会绿色转型发展[29]；中西部和东北地区在绿色低碳转型方面面临较大挑战，能源结构不合理和污染治理水平偏低，严重制约了减污降碳与扩绿增长的协同发展，需要尽快制定有效的绿色低碳转型策略[30]，需在政策支持、资本投入和运输方式调整上加快突破，推动区域追赶。通过跨区域协同机制，促进东中西部和东北地区的经验共享与要素流动，提升全国交通运输业绿色转型的整体效率。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[Z]. 2021.
- [2] 田嘉莉, 付书科, 刘萧玮. 财政支出政策能实现减污降碳协同效应吗? [J]. 财政科学, 2022(2): 100-115.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 中国应对气候变化的政策与行动 2020 年度报告[R]. 北京: 生态环境部, 2021.
- [4] 生态环境部. 关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见[Z]. 2021.

- [5] 邓红梅, 梁巧梅, 刘丽静. 交通领域减污降碳协同控制研究回顾及展望[J]. 中国环境管理, 2023, 15(2): 24-29+23.
- [6] Wang, S., Fang, C. and Wang, Y. (2016) Spatiotemporal Variations of Energy-Related CO₂ Emissions in China and Its Influencing Factors: An Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.140>
- [7] 周伟. “双碳”目标下交通运输转型发展挑战与机遇[N]. 中国交通报, 2021-09-23(003).
- [8] 郭沛, 王光远. 数字经济的减污降碳协同作用及机制——基于地级市数据的实证检验[J]. 资源科学, 2023, 45(11): 2117-2129.
- [9] 唐湘博, 曹利珍, 马志文, 等. 不同排放控制策略的城市减污降碳协同效应及空气质量改善研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(11): 2423-2433.
- [10] 高维龙. 数字经济对城市减污降碳的协同效应及空间机制[J]. 华东经济管理, 2025, 39(3): 70-82.
- [11] 崔连标, 陈惠. 京津冀城市群减污降碳的时空特征及其驱动因素研究[J]. 工业技术经济, 2023, 42(6): 87-96.
- [12] 李汶豫, 文传浩, 苏旭阳, 等. 长江经济带城市减污降碳协同效应时空演化及驱动因素研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(8): 1641-1653.
- [13] 范行行, 介晓磊, 李玲, 等. 河南省农业减污降碳协同效应及其驱动因素[J]. 环境科学, 2024, 46(8): 4864-4875.
- [14] 尹鹏, 段佩利, 陈才. 中国交通运输碳排放格局及其与经济增长的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 7-12.
- [15] 张诗青, 王建伟, 郑文龙. 中国交通运输碳排放及影响因素时空差异分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4787-4797.
- [16] 樊祖洪, 熊康宁, 李亮, 等. 喀斯特生态脆弱区农业生态经济系统耦合协调发展研究——以贵州省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 482-491.
- [17] Nie, C. and Lee, C. (2023) Synergy of Pollution Control and Carbon Reduction in China: Spatial-Temporal Characteristics, Regional Differences, and Convergence. *Environmental Impact Assessment Review*, 101, Article 107110. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107110>
- [18] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2252-2263.
- [19] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [20] 南士敬, 李方东, 汪金伟, 等. 中国可再生能源发展水平的区域差异、分布动态与收敛性[J]. 资源科学, 2023, 45(7): 1335-1350.
- [21] 任晓松, 梁宇琪, 赵敏, 等. 中国建筑业减污降碳协同效应的空间收敛性及驱动因素分析[J]. 环境科学研究, 2025, 38(4): 724-735.
- [22] 李霄含. 数字经济对交通运输碳排放强度的影响及其路径研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古财经大学, 2024.
- [23] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2387-2398.
- [24] 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.
- [25] Grossman, G.M. and Krueger, A.B. (1991) Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. National Bureau of Economic Research Working Paper 3914. NBER.
- [26] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 385-393.
- [27] 陈赞, 石梦怡, 马崇森. 省域交通基础设施碳锁定系统耦合效应时空演化[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 1127-1138.
- [28] 建设人与自然和谐共生的美丽中国——生态环境部部长黄润秋在国新办新闻发布会答记者问[J]. 环境教育, 2021(8): 14-23.
- [29] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1155-1167.
- [30] 尹碧波, 邝萍, 欧阳昕彤, 等. 中国减污降碳与扩绿增长耦合协调度的时空特征及其驱动因素[J]. 经济地理, 2024, 44(11): 122-131.

附 录

Table A1. Results of the collaborative level of pollution reduction and carbon reduction in transportation across provinces from 2008 to 2022

表 A1. 2008~2022 各省交通运输减污降碳协同水平

年份 省市区	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Mean
北京市	0.619	0.629	0.636	0.639	0.651	0.669	0.690	0.697	0.716	0.749	0.734	0.736	0.738	0.749	0.757	0.694
天津市	0.615	0.634	0.643	0.652	0.657	0.663	0.679	0.687	0.651	0.656	0.629	0.625	0.637	0.633	0.640	0.647
河北省	0.517	0.531	0.552	0.570	0.571	0.573	0.576	0.579	0.594	0.618	0.646	0.619	0.643	0.641	0.627	0.590
山西省	0.471	0.475	0.496	0.514	0.528	0.534	0.529	0.537	0.560	0.548	0.540	0.546	0.561	0.566	0.570	0.532
内蒙古自治区	0.528	0.539	0.547	0.560	0.564	0.580	0.579	0.565	0.579	0.567	0.552	0.552	0.556	0.555	0.561	0.559
辽宁省	0.587	0.609	0.635	0.646	0.667	0.654	0.640	0.591	0.568	0.583	0.610	0.574	0.583	0.591	0.601	0.609
吉林省	0.515	0.523	0.531	0.533	0.537	0.543	0.548	0.555	0.565	0.566	0.570	0.547	0.558	0.567	0.563	0.548
黑龙江省	0.536	0.538	0.542	0.544	0.551	0.562	0.564	0.574	0.586	0.586	0.572	0.532	0.541	0.546	0.546	0.555
上海市	0.589	0.593	0.591	0.586	0.606	0.608	0.628	0.633	0.639	0.638	0.653	0.666	0.680	0.701	0.704	0.634
江苏省	0.580	0.592	0.613	0.633	0.654	0.665	0.666	0.676	0.686	0.706	0.707	0.717	0.739	0.743	0.743	0.675
浙江省	0.613	0.600	0.616	0.614	0.632	0.635	0.651	0.665	0.688	0.692	0.698	0.693	0.709	0.714	0.712	0.662
安徽省	0.517	0.515	0.529	0.546	0.561	0.577	0.583	0.595	0.612	0.617	0.645	0.637	0.646	0.649	0.626	0.590
福建省	0.598	0.597	0.604	0.603	0.614	0.619	0.621	0.637	0.648	0.656	0.638	0.642	0.656	0.663	0.667	0.631
江西省	0.558	0.568	0.578	0.582	0.594	0.589	0.593	0.600	0.616	0.623	0.631	0.631	0.639	0.640	0.606	0.603
山东省	0.534	0.529	0.537	0.548	0.559	0.598	0.587	0.590	0.619	0.636	0.639	0.625	0.656	0.672	0.680	0.601
河南省	0.481	0.478	0.491	0.506	0.520	0.529	0.544	0.558	0.579	0.605	0.616	0.619	0.635	0.640	0.615	0.561
湖北省	0.502	0.519	0.523	0.533	0.543	0.554	0.565	0.570	0.589	0.596	0.609	0.614	0.607	0.625	0.620	0.571
湖南省	0.520	0.538	0.539	0.545	0.562	0.567	0.575	0.595	0.594	0.605	0.644	0.606	0.625	0.593	0.594	0.580
广东省	0.571	0.585	0.635	0.597	0.605	0.619	0.623	0.635	0.641	0.672	0.735	0.735	0.767	0.783	0.785	0.666
广西壮族自治区	0.492	0.500	0.511	0.522	0.524	0.532	0.542	0.560	0.560	0.562	0.543	0.557	0.578	0.579	0.577	0.543
海南省	0.609	0.581	0.602	0.596	0.596	0.596	0.601	0.611	0.609	0.616	0.568	0.598	0.624	0.633	0.634	0.605
重庆市	0.541	0.565	0.561	0.590	0.564	0.568	0.580	0.583	0.584	0.588	0.600	0.595	0.602	0.611	0.611	0.583
四川省	0.492	0.490	0.511	0.532	0.539	0.547	0.560	0.568	0.576	0.584	0.581	0.580	0.586	0.592	0.583	0.555
贵州省	0.415	0.482	0.489	0.500	0.504	0.514	0.525	0.530	0.544	0.554	0.517	0.539	0.540	0.548	0.550	0.517
云南省	0.467	0.462	0.482	0.487	0.497	0.505	0.508	0.515	0.498	0.508	0.558	0.549	0.552	0.563	0.567	0.515
陕西省	0.493	0.509	0.521	0.529	0.541	0.555	0.562	0.568	0.585	0.598	0.597	0.606	0.623	0.630	0.610	0.568
甘肃省	0.415	0.415	0.426	0.433	0.444	0.454	0.447	0.454	0.463	0.473	0.483	0.492	0.497	0.506	0.515	0.461
青海省	0.431	0.440	0.447	0.454	0.459	0.457	0.462	0.467	0.479	0.484	0.484	0.497	0.499	0.508	0.512	0.472
宁夏回族自治区	0.458	0.476	0.486	0.496	0.504	0.506	0.505	0.514	0.527	0.530	0.515	0.528	0.534	0.541	0.544	0.511
新疆维吾尔自治区	0.419	0.427	0.435	0.447	0.470	0.477	0.486	0.484	0.491	0.506	0.492	0.512	0.495	0.509	0.518	0.478
Mean	0.523	0.531	0.544	0.551	0.561	0.568	0.574	0.580	0.588	0.597	0.600	0.599	0.610	0.616	0.615	