**文章编号**：1003-1421(2026)01-0088-11
**引用格式**：周晓佳，汪玲. 长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合关系研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：88-98.
ZHOU Xiaojia，WANG Ling. Coupling Relationship between Energy Conservation and Emission Reduction Efficiency of Transportation Industry and Green Economy in the Yangtze River Economic Belt[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：88-98.

# 长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合关系研究

周晓佳[1,2]，汪　玲[1]

(1.大连交通大学 交通工程学院，辽宁 大连　116028；2.合肥工业大学 汽车与交通工程学院，安徽 合肥　230009)

**摘　要**：为探究交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调关系，以长江经济带11个省(市)为研究对象，构建交通业节能减排效率与绿色经济评价指标体系，分别采用超效率SBM模型和熵值法测算交通业节能减排效率和绿色经济发展水平，运用耦合协调度模型探究二者耦合协调水平，并用核密度估计和Tobit模型分析其时空演变特征和影响因素。结果表明：2013—2022年长江经济带交通业节能减排效率呈先降后升趋势，绿色经济发展水平呈上升趋势；二者耦合协调水平在时序上持续向好，空间上呈长江下游领先，中游居中，上游较为落后的分布格局；科技创新、对外开放及产业结构对该区域耦合协调度有促进作用，能源消耗与其呈负相关，环境规制对其未有明显影响。最后根据研究结果提出针对性建议。

**关键词**：交通业节能减排效率；绿色经济；耦合协调；时空演变；影响因素
**中图分类号**：U-9；F062.2；X321　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250624001

# Coupling Relationship between Energy Conservation and Emission Reduction Efficiency of Transportation Industry and Green Economy in the Yangtze River Economic Belt

ZHOU Xiaojia[1,2]，WANG Ling[1]

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China; 2. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** To explore the coupling coordination relationship between energy conservation and emission reduction efficiency of the transportation industry and green economy, this paper took 11 provinces (cities) in the Yangtze River Economic Belt as the research object, and constructed the evaluation index system of energy conservation and emission reduction efficiency of the transportation industry and green economy. Meanwhile, the super efficiency SBM model and entropy method were adopted to measure the energy conservation and emission reduction efficiency of the transportation industry and the development level of the green economy respectively. Then, the coupling coordination degree model was employed to explore the coupling coordination of the two, with the kernel density

**收稿日期**：2025-06-24
**基金项目**：辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20230043)

estimation method and Tobit model utilized to analyze the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors. The results show that from 2013 to 2022, the energy conservation and emission reduction efficiency of the transportation industry in the Yangtze River Economic Belt shows a trend of first decreasing and then increasing, while the development level of the green economy shows an upward trend. The coupling coordination degree of the two continues to improve in time sequence: Spatially, the lower reaches of the Yangtze River are in the lead, the middle reaches are in the middle, and the upper reaches are relatively backward. Scientific and technological innovation, opening up, and industrial structure play a role in improving the coupling coordination degree of this region, energy consumption negatively correlates with it, and environmental regulations have no significant influence on it. Finally, targeted suggestions were proposed based on the research results.

**Keywords:** Energy Conservation and Emission Reduction Efficiency of Transportation Industry; Green Economy; Coupling Coordination; Spatiotemporal Evolution; Influencing Factor

## 0　引言

长江经济带作为我国“生态优先、绿色发展”的主战场，其经济绿色转型可为全国实现“双碳”目标提供实践范式。当前，该区域在经济与交通快速发展的同时，正面临日益严峻的环境压力，其碳排放量占全国总量的37.5%[1]，而交通业作为碳排放的关键领域，其绿色变革成为推动经济绿色转型的核心环节。因此，长江经济带亟需提升交通业节能减排效率，促进其与绿色经济协同发展。基于此，探究长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调关系及其影响因素，对推动该区域经济与交通绿色转型、实现高质量发展具有重要意义。

目前，国内外学者围绕交通业节能减排效率展开了大量研究，如Bencekri等[2]测定不同政策下交通业节能减排效率，发现电动汽车政策有利于提升其节能减排效率；Atiaja等[3]测算厄瓜多尔交通业能源消耗及污染排放，同样证实使用电动汽车能减少碳排放；Kumar等[4]研究巴基斯坦道路交通电气化对节能减排效率的影响，表明该举措可以减少交通业温室气体排放；郑琰等[5]运用超效率松弛变量测度(Slacks Based Measure，SBM)模型测算了我国交通业碳排放效率；杨青等[6]基于全局超效率SBM模型分析我国中心城市交通业碳排放效率；李艳鸽等[7]采用超效率SBM-GML指数模型测度了铁路运输企业碳排放效率。相比之下，对于交通业节能减排效率与绿色经济耦合关系的研究略显单薄。Mohmand等[8]研究巴基斯坦经济增长与交通业碳排放之间的关系，得出短期内经济增长会增加碳排放；Pietrzak等[9]分析针对城市公共交通实施零排放带来的经济效果，表明经济效益会受到能源结构的限制；唐晓灵等[10]探讨陕西省节能减排效率与经济发展间的耦合关系；徐素波等[11]研究我国碳减排效率与绿色经济的耦合协调关系。

既有研究为探索交通业节能减排效率与绿色经济耦合关系积累了一定的基础，但仍存在以下问题。一是研究层面上大多聚焦于国家或省市，很少针对特定区域展开研究；二是研究内容上虽涉及节能减排效率与经济的耦合关系，但对耦合关系时空特征及影响因素的探索较少；三是研究方法上主要基于SBM模型测算效率，方法较单一，难以系统揭示耦合关系的变化趋势及其关联要素。鉴于此，立足于长江经济带高质量发展的战略要求，以沿江11个省(市)为研究对象，分别运用超效率SBM模型和熵值法测算交通业节能减排效率与绿色经济发展水平，采用核密度估计法及Tobit模型揭示二者耦合关系的时空演变特征及影响因素，为促进该区域经济与交通绿色低碳发展提供有益参考。

## 1　指标选取

### 1.1　交通业节能减排效率指标

借鉴已有研究[12-13]，选取资本、人力及能源作为投入指标，分别以交通业固定资产投资额、交通业从业人数、交通业能源消耗总量表征。产出指标选取交通业生产总值及碳排放量。由于现有统计年鉴未将交通运输、仓储和邮政业区分开，且考虑到仓储

和邮政业在该大类中占比较小，所以不进行区分。交通业节能减排效率投入产出指标体系如表1所示。

**表1　交通业节能减排效率投入产出指标体系**

Tab.1　Input-output index system of energy conservation and emission reduction efficiency in transportation industry

| 指标类别 | 指标名称 | 具体说明 |
|---|---|---|
| 投入指标 | 资本投入/亿元 | 交通业固定资产投资额 |
| | 人力投入/万人 | 交通业从业人数 |
| | 能源投入/万t标准煤 | 交通业能源消耗总量 |
| 产出指标 | 期望产出/亿元 | 交通业生产总值 |
| | 非期望产出/万t | 交通业碳排放量 |

其中，由于部分省(市)交通业能源消耗总量数据缺失，参考《综合能源计算通则》中的方法计算，具体公式如下。

$$E = \sum_{i=1}^{n}\left(E_i \times k_i\right) \tag{1}$$

式中：$E$为交通业能源消耗总量，万t标准煤；$E_i$为第$i$种能源消耗量，万t；$k_i$为第$i$种能源的折标准煤系数，kgce/kg或kgce/m$^3$。

另外，对于交通业碳排放量，考虑到不同能源类型碳排放强度的差异，采用自上而下的方法估算[14-15]，以反映当前减排压力，公式如下。

$$C = \sum_{i=1}^{n}E_i \times F_i = \sum_{i=1}^{n}E_i \times ALV_i \times CV_i \times COF_i \times \frac{44}{12} \tag{2}$$

式中：$C$为交通业碳排放量，万t；$E_i$为第$i$种能源消耗量，选取原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气及天然气作为交通业主要消耗的能源种类；$F_i$为第$i$种能源的碳排放系数，kgCO$_2$/kg或kgCO$_2$/m$^3$；$ALV_i$为第$i$种能源的平均低位发热量，kJ/kg或kJ/m$^3$；$CV_i$为单位热值含碳量，TC/TJ；$COF_i$为碳氧化率。

各类能源对应参数及碳排放系数如表2所示。

## 1.2　绿色经济指标

从绿色经济注重经济、社会和生态系统协调发展的内涵出发，参考其他研究成果[16-18]，兼顾数据可获得性及可比性原则，基于DPSR模型，从驱动力(Driving force)、压力(Pressure)、状态(State)、响应(Response)4个层面展开，构建绿色经济发展水平评价指标体系，并利用熵值法计算各指标权重。其中，驱动力分为经济发展驱动力和社会发展驱动力，经济发展是绿色经济最根本的驱动力，以人均地区生产总值、社会消费品零售总额和固定资产投资表征；社会发展能够为经济绿色转型提供内在动力，以居民人均可支配收入和城镇登记失业人员表征。压力主要考虑能源和环境2方面，能源压力以单位GDP能耗和单位GDP电耗表征，环境压力以二氧化硫排放总量和工业固体废物产生量表征，以此衡量经济发展对能源及环境带来的压力。状态即环境状态，以建成区绿化覆盖率和人均公园绿地面积来反映环境现状。响应主要涉及环境治理与科技创新，环境治理以工业污染治理完成投资表征，科技创新包括R&D经费支出强度及万人专利申请数。绿色经济评价指标体系及其权重如表3所示。

## 1.3　耦合协调度影响因素

参考既有研究[19-21]，选取以下5个因素，分析其对交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调关系的影响程度。①科技创新($X_1$)，以专利申请件数表示。科技创新有助于提高绿色技术和设备在行业中的应用，对绿色经济及交通业节能减排产生积极影响。②能源消耗($X_2$)，以交通业单位生产总值的能源消耗量表示。过高的交通业能源消耗，不仅会增加生产成本，加剧对环境的破坏，还会导致能源枯竭，阻碍绿色经济的发展。③环境规制($X_3$)，以工

**表2　各类能源对应参数及碳排放系数**

Tab.2　Corresponding parameters and carbon emission coefficients of each type of energy source

| 能源种类 | 折标准煤系数 | 平均低位发热量/(kJ/kg或kJ/m$^3$) | 单位热值含碳量/(TC/TJ) | 碳氧化率 | 碳排放系数/(kgCO$_2$/kg或kgCO$_2$/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 原煤 | 0.714 3 | 20 934 | 26.37 | 0.94 | 1.902 7 |
| 汽油 | 1.471 4 | 43 124 | 18.9 | 0.98 | 2.928 7 |
| 煤油 | 1.471 4 | 43 124 | 19.6 | 0.98 | 3.037 2 |
| 柴油 | 1.457 1 | 42 705 | 20.2 | 0.98 | 3.099 8 |
| 燃料油 | 1.428 6 | 41 868 | 21.1 | 0.98 | 3.174 4 |
| 液化石油气 | 1.714 3 | 50 242 | 17.2 | 0.98 | 3.105 2 |
| 天然气 | 1.330 0 | 38 979 | 15.3 | 0.99 | 2.164 9 |

注：第2，3列数据来源于《综合能源计算通则》；第4，5列数据来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》。

**表3　绿色经济评价指标体系及其权重**

Tab.3　Evaluation index system and weights of green economy

| 评价对象 | 准则层 | 一级指标 | 二级指标 | 指标属性 | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|
| 绿色经济发展水平 | 驱动力 | 经济发展驱动力 | 人均地区生产总值/元 | + | 0.106 5 |
| | | | 社会消费品零售总额/亿元 | + | 0.093 9 |
| | | | 固定资产投资/亿元 | + | 0.088 7 |
| | | 社会发展驱动力 | 居民人均可支配收入/元 | + | 0.108 2 |
| | | | 城镇登记失业人员/万人 | − | 0.032 6 |
| | 压力 | 能源压力 | 单位GDP能耗/(吨标准煤/万元) | − | 0.014 6 |
| | | | 单位GDP电耗/(kW·h/万元) | − | 0.018 5 |
| | | 环境压力 | 二氧化硫排放总量/t | − | 0.034 0 |
| | | | 工业固体废物产生量/万t | − | 0.056 0 |
| | 状态 | 环境状态 | 建成区绿化覆盖率/% | + | 0.032 6 |
| | | | 人均公园绿地面积/$m^2$ | + | 0.040 7 |
| | 响应 | 环境治理 | 工业污染治理完成投资/亿元 | + | 0.139 4 |
| | | 科技创新 | R&D经费支出强度/% | + | 0.080 7 |
| | | | 万人专利申请数/(件/万人) | + | 0.153 7 |

业污染治理完成投资额占工业生产总值的比例表示[22]。通过环境规制，能够制约污染环境行为并对污染进行治理，提升交通业节能减排效率，促进绿色经济的发展。④对外开放($X_4$)，以货物进出口总额表示。对外开放有利于引入国外先进技术及人才，为交通业节能减排效率与绿色经济协同发展提供支撑。⑤产业结构($X_5$)，以第三产业增加值占GDP比重表示。产业结构优化升级可以推动传统产业向节能降碳方向发展，促进节能减排与经济绿色发展，提升二者协调水平。

以上数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》及各省(市)统计年鉴。

## 2　研究方法

### 2.1　超效率SBM模型

数据包络分析法是当前测算效率的主流方法，但传统方法无法处理含有非期望产出的情况。而SBM模型的提出能够有效解决这一问题。但该模型在多个评价单元均有效时无法对其进一步区分与排序，因此，需采用超效率SBM模型。同时，为保证不同时期效率值的可比性，选取基于全局参比的超效率SBM模型，并将规模报酬不变作为前提假设，从技术、管理和规模的角度综合评估效率，以便对现有投入规模进行改进，其公式如下。

$$\rho=\min\frac{1+\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{\bar{x}_i}{x_{io}^t}}{1-\frac{1}{l+m}\left(\sum_{s=1}^{l}\frac{\bar{y}_s}{y_{so}^t}+\sum_{q=1}^{m}\frac{\bar{b}_q}{b_{qo}^t}\right)}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1,j\neq j_o}^{n}\lambda_j^t x_{ij}^t-\bar{x}_i\leqslant x_{io}^t & i=1,2,\cdots,k\\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1,j\neq j_o}^{n}\lambda_j^t y_{sj}^t+\bar{y}_s\geqslant y_{so}^t & s=1,2,\cdots,l\\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1,j\neq j_o}^{n}\lambda_j^t b_{qj}^t-\bar{b}_q\leqslant b_{qo}^t & q=1,2,\cdots,m\\ 1-\frac{1}{l+m}\left(\sum_{s=1}^{l}\frac{\bar{y}_s}{y_{so}^t}+\sum_{q=1}^{m}\frac{\bar{b}_q}{b_{qo}^t}\right)>0\\ \lambda_j^t,\ \bar{x}_i,\ \bar{y}_s,\ \bar{b}_q\geqslant 0\end{cases}\tag{3}$$

式中：$\rho$为交通业节能减排的效率值，当$\rho\geqslant1$时，评价单元相对有效，$\rho<1$时，评价单元无效；$i$，$s$及$q$分别为第$i$个投入指标、第$s$个期望产出指标及第$q$个非期望产出指标，其中投入指标共有$k$个，期望产出有$l$个，非期望产出有$m$个；$x_{io}^t$，$y_{so}^t$和$b_{qo}^t$分别为第$o$个被评价单元在第$t$时期的投入变量、期望产出变量和非期望产出变量；$\bar{x}_i$，$\bar{y}_s$及$\bar{b}_q$为松弛变量；$\lambda_j^t$为第$j$个评价单元在第$t$时期的权重。

### 2.2　熵值法

选用能进行客观赋权的熵值法测算绿色经济发展水平，其计算步骤如下：首先对各项指标进行标准化处理；然后计算指标比值；再求熵值，并通过

熵值得到各指标权重；最后用权重与各省(市)指标标准值相乘得到绿色经济发展水平[23]。

### 2.3　耦合协调度模型

借助耦合协调度模型测算交通业节能减排效率与绿色经济间的耦合协调水平。其计算公式如下。

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{U_1 \times U_2}{(U_1 + U_2)^2}} \tag{4}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{5}$$

$$T = \alpha \times U_1 + \beta \times U_2 \tag{6}$$

式中：$C$为耦合度，取值为[0，1]；$U_1$和$U_2$分别为交通业节能减排效率和绿色经济发展水平；$D$为耦合协调度，取值为[0，1]，$D$越大，表明系统间协调程度越好；$T$为综合协调指数；$\alpha$和$\beta$分别表示交通业节能减排效率和绿色经济的权重值，考虑到二者在社会可持续发展中同样重要，因此取值均为0.5。

参照既有研究[24-25]，将耦合协调度划分为6个等级，耦合协调度等级划分标准如表4所示。

**表4　耦合协调度等级划分标准**

Tab.4　Grading standard for coupling coordination degrees

| 耦合协调度$D$ | 耦合协调度类型 |
|---|---|
| [0.0，0.3) | 严重失调 |
| [0.3，0.4) | 轻度失调 |
| [0.4，0.5) | 濒临失调 |
| [0.5，0.6) | 勉强协调 |
| [0.6，0.8) | 中度协调 |
| [0.8，1.0] | 高度协调 |

### 2.4　核密度估计法

核密度估计法能依据所提供的样本数据衡量随机变量的分布位置、分布形状及分布延展，采用此方法能够揭示耦合协调度的时序演变特征，其公式如下。

$$f(x) = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \tag{7}$$

式中：$n$为样本数目，即省(市)的数量；$x_i$为各省(市)交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度；$K$为核密度函数；$h$为带宽。

### 2.5　Tobit模型

鉴于耦合协调度的取值范围为[0，1]，呈现出明显的切割特性，符合Tobit模型的应用前提。因此，选用该模型分析交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度的影响因素，其公式如下。

$$D = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 \ln X_4 + \beta_5 X_5 + \varepsilon \tag{8}$$

式中：$D$为耦合协调度；$X_i$为解释变量；$\beta_0$为常数项；$\beta_i$为各解释变量的系数；$\varepsilon$为误差项。

## 3　研究结果及分析

### 3.1　交通业节能减排效率分析

根据公式(3)求解得到长江经济带各省(市)交通业节能减排效率，其中，2013—2022年长江经济带交通业节能减排效率均值变化趋势如图1所示。2013—2022年各省(市)交通业节能减排效率均值如图2所示。

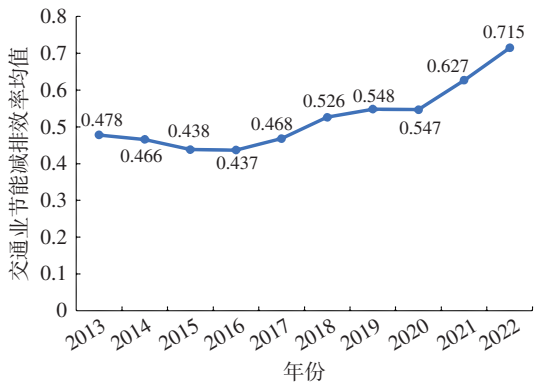


**图1　2013—2022年长江经济带交通业节能减排效率均值变化趋势**

Fig.1　Variation trend of average energy conservation and emission reduction efficiency of transportation industry in the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022

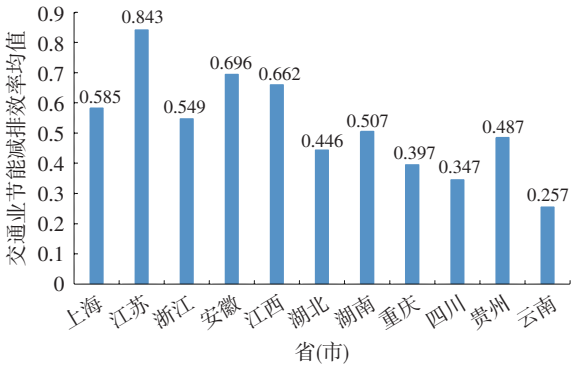


**图2　2013—2022年各省(市)交通业节能减排效率均值**

Fig.2　Average energy conservation and emission reduction efficiency of transportation industry of each province (city) in the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022

从图1可以看出，长江经济带交通业节能减排效率均值呈先降后升的“U”型变化趋势，自2013年

开始效率缓慢降低，至2016年达到最低水平0.437后，效率水平逐渐提升，并在2020年之后效率值显著提升，究其原因，《绿色交通“十四五”发展规划》的提出为该区域交通业绿色低碳发展提供了政策指引，使其节能减排效率与增长速度得到极大改善。

由图2可知，各省(市)交通业节能减排效率均值都小于1，处于无效状态。其中，江苏省交通业节能减排效率处于领先地位，效率均值达到了0.843，这与江苏省聚焦交通运输绿色转型，不断推广低碳运输装备密不可分；其次为安徽、江西、上海、浙江及湖南，其节能减排效率均值位于0.5~0.7之间，仍存在一定的提升空间；贵州、湖北、重庆、四川及云南的效率值偏低，均值低于0.5，可能是中西部省(市)在吸引人才、资本等交通创新要素方面存在区位劣势，使得其交通业节能减排效率均值较低。

### 3.2　绿色经济发展水平分析

利用熵值法计算绿色经济发展水平。2013—2022年长江经济带各省(市)绿色经济发展水平如表5所示。

由表5可知，从整体上看，2013—2022年长江经济带绿色经济发展水平呈上升趋势。从省域上看，大部分省(市)绿色经济发展水平在0.2~0.5之间，占总样本数的65.5%，10.9%的省(市)低于0.2，23.6%的省(市)高于0.5，这说明该区域绿色经济发展水平普遍偏低，提升空间较大。其中，绿色经济发展水平较高的省(市)有江苏、浙江及上海，原因可能是三者位于我国东部沿海地区，地理位置和各类资源较为优越；贵州和云南绿色经济的水平则较低，这反映出各省(市)间绿色经济发展水平差异较大，发展不均衡。

### 3.3　交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度分析

运用耦合协调度模型计算2013—2022年长江经济带各省(市)交通业节能减排效率与绿色经济的耦合协调度，2013—2022年长江经济带各省(市)交通业节能减排效率与绿色经济的耦合协调度如表6所示。

由表6可知，从整体上看，2013—2022年长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济的耦合协调度均值为0.650，属于中度协调。十年间两系统耦合协调水平呈逐年上升态势，由2013年的0.586增至2022年的0.751，提升28.1%，耦合协调类型也由勉强协调转为中度协调。究其原因，可能是在发展初期，经济增长模式更偏重于速度与规模，使得耦合协调程度较低，但自2016年《长江经济带发展规划纲要》将保护生态环境摆在首位后，交通业节能减排与绿色经济互促共进关系不断加强，耦合协调程度得以稳步提升。从省域上看，2013年耦合协调度排名居前列的省(市)有江苏、浙江、上海及江西，而云南、四川及贵州相对靠后。2018年，江苏稳居首位，安徽凭借大力推广新能源汽车与加快充电基础设施建设而跃居第二，浙江和上海紧跟其后。2022年，江苏仍居首位，其后依次为上海、浙江和安徽。从平均值来看，均值较高的依次是江

表5　2013—2022年长江经济带各省(市)绿色经济发展水平

Tab.5　Green economy development level of each province (city) in the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022

| 省(市) | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 | 2021年 | 2022年 | 均值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 上海 | 0.375 | 0.421 | 0.431 | 0.515 | 0.535 | 0.548 | 0.563 | 0.547 | 0.551 | 0.627 | 0.511 |
| 江苏 | 0.501 | 0.526 | 0.582 | 0.643 | 0.612 | 0.664 | 0.731 | 0.743 | 0.695 | 0.708 | 0.641 |
| 浙江 | 0.489 | 0.533 | 0.541 | 0.576 | 0.554 | 0.588 | 0.620 | 0.675 | 0.650 | 0.710 | 0.594 |
| 安徽 | 0.297 | 0.283 | 0.301 | 0.377 | 0.374 | 0.394 | 0.423 | 0.438 | 0.462 | 0.486 | 0.384 |
| 江西 | 0.213 | 0.222 | 0.239 | 0.245 | 0.282 | 0.311 | 0.351 | 0.354 | 0.381 | 0.392 | 0.299 |
| 湖北 | 0.263 | 0.290 | 0.292 | 0.360 | 0.340 | 0.364 | 0.377 | 0.397 | 0.434 | 0.484 | 0.360 |
| 湖南 | 0.231 | 0.248 | 0.287 | 0.294 | 0.310 | 0.336 | 0.358 | 0.387 | 0.432 | 0.443 | 0.333 |
| 重庆 | 0.277 | 0.281 | 0.314 | 0.334 | 0.357 | 0.366 | 0.378 | 0.390 | 0.417 | 0.448 | 0.356 |
| 四川 | 0.185 | 0.202 | 0.211 | 0.247 | 0.262 | 0.278 | 0.303 | 0.350 | 0.337 | 0.349 | 0.272 |
| 贵州 | 0.126 | 0.141 | 0.148 | 0.180 | 0.189 | 0.203 | 0.236 | 0.266 | 0.255 | 0.281 | 0.203 |
| 云南 | 0.136 | 0.157 | 0.164 | 0.173 | 0.182 | 0.185 | 0.218 | 0.235 | 0.244 | 0.265 | 0.196 |
| 均值 | 0.281 | 0.300 | 0.319 | 0.359 | 0.363 | 0.385 | 0.414 | 0.435 | 0.442 | 0.472 | 0.377 |

表6　2013—2022年长江经济带各省(市)交通业节能减排效率与绿色经济的耦合协调度

Tab.6　Coupling coordination degree of energy conservation and emission reduction efficiency of transportation industry and green economy of each province (city) in the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022

| 省(市) | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 | 2021年 | 2022年 | 均值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 上海 | 0.639 | 0.685 | 0.654 | 0.677 | 0.694 | 0.731 | 0.753 | 0.774 | 0.815 | 0.905 | 0.733 |
| 江苏 | 0.844 | 0.796 | 0.811 | 0.837 | 0.835 | 0.835 | 0.857 | 0.887 | 0.923 | 0.920 | 0.854 |
| 浙江 | 0.710 | 0.737 | 0.726 | 0.748 | 0.746 | 0.739 | 0.759 | 0.761 | 0.786 | 0.833 | 0.755 |
| 安徽 | 0.596 | 0.582 | 0.577 | 0.604 | 0.604 | 0.793 | 0.807 | 0.805 | 0.830 | 0.848 | 0.705 |
| 江西 | 0.610 | 0.594 | 0.591 | 0.596 | 0.652 | 0.686 | 0.706 | 0.702 | 0.735 | 0.763 | 0.664 |
| 湖北 | 0.556 | 0.578 | 0.572 | 0.584 | 0.587 | 0.635 | 0.675 | 0.662 | 0.701 | 0.747 | 0.630 |
| 湖南 | 0.600 | 0.603 | 0.611 | 0.614 | 0.632 | 0.644 | 0.645 | 0.660 | 0.684 | 0.686 | 0.638 |
| 重庆 | 0.546 | 0.572 | 0.577 | 0.592 | 0.604 | 0.610 | 0.627 | 0.627 | 0.662 | 0.697 | 0.611 |
| 四川 | 0.460 | 0.501 | 0.515 | 0.545 | 0.554 | 0.536 | 0.556 | 0.576 | 0.576 | 0.681 | 0.550 |
| 贵州 | 0.522 | 0.538 | 0.545 | 0.570 | 0.590 | 0.509 | 0.535 | 0.552 | 0.570 | 0.586 | 0.552 |
| 云南 | 0.366 | 0.375 | 0.377 | 0.378 | 0.382 | 0.504 | 0.528 | 0.540 | 0.563 | 0.594 | 0.461 |
| 均值 | 0.586 | 0.596 | 0.596 | 0.613 | 0.626 | 0.657 | 0.677 | 0.686 | 0.713 | 0.751 | 0.650 |

苏、浙江、上海及安徽，其耦合协调度均值均超过了0.7，属于中度协调及以上的水平；江西、湖南、湖北及重庆耦合协调度均值位于0.6~0.7；而贵州、四川及云南耦合协调度较低，均低于0.6，其交通业节能减排效率与绿色经济协调程度仍存在较大提升空间。

### 3.3.1　耦合协调度时空演变特征分析

（1）时序演变特征。基于长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度计算结果，选择2013年、2016年、2019年和2022年为观测时点，绘制出其核密度曲线以分析其时序演变特征，耦合协调度的核密度图如图3所示。

由图3可知，从分布位置上看，核密度曲线在这4个时间段内不断右移，表明该区域交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度在逐渐提高，这一总体趋势与长江经济带持续贯彻“生态优先、绿色发展”的战略导向密不可分。从分布形状上看，2013年和2016年的核密度曲线呈“单峰”形态，而在2019年出现了“双峰”，但两峰间高度相似、间距较近，说明各省(市)耦合协调度之间存在轻微分化，但差异不明显，可能是下游地区与中上游产业结构存在差异，使得下游地区在交通业节能减排与绿色经济的协调上率先取得突破，这导致了分化的形成。从分布延展上看，2013年和2016年的核密度曲线存在明显拖尾现象，但随着时间推移，变化区间有所缩窄且无明显拖尾现象，说明各省(市)间差距在逐渐缩小，促使该区域耦合协调度趋于同向化发展。

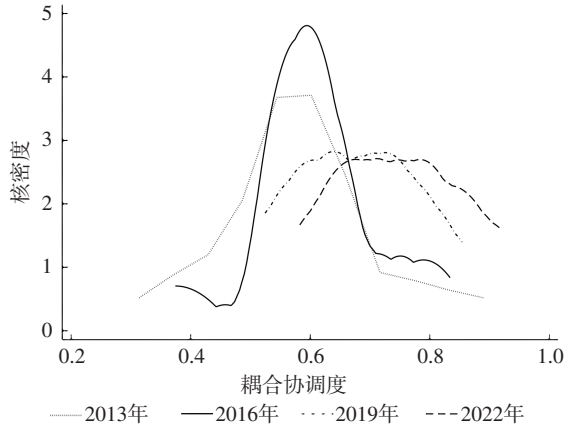


图3　耦合协调度的核密度图

Fig.3　Kernel density of coupling coordination degrees

（2）空间演变特征。为了更加直观地展示长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调类型的空间演变特征，绘制出2013年、2016年、2019年和2022年二者耦合协调类型的空间分布图，长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调类型空间分布如图4所示，参照秦小辉等[26]做法，分别以X轴和Y轴表示经度和纬度，并以省会城市位置表示各省(市)位置。

从图4可以看出，总体上，长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调类型的等级在逐步提升，最初存在失调状态，且属于高度协调的省(市)不多，而到2022年，所有省(市)均在勉强协调及以上，且有多个省(市)迈入高度协调阶段。另外，该区域各省(市)间耦合协调类型存在明显的空间差

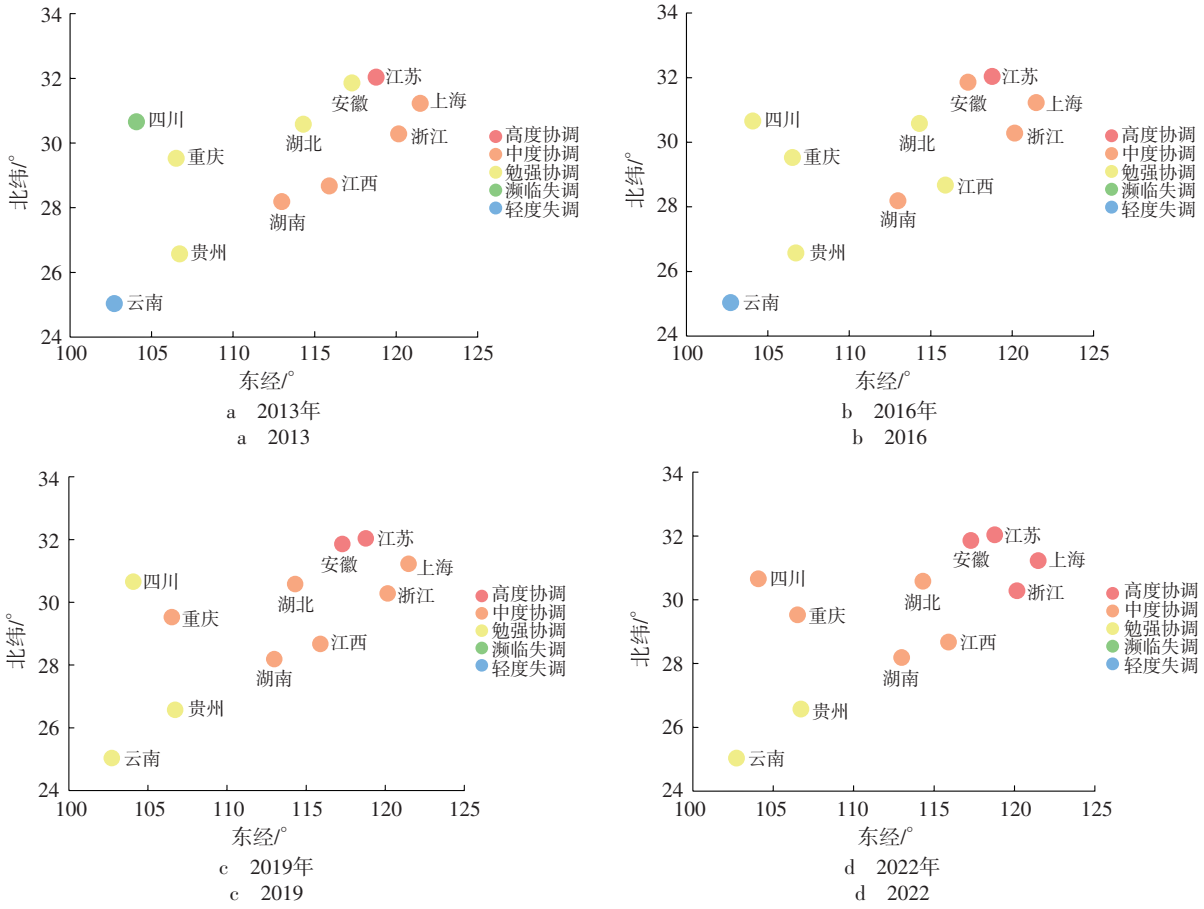


**图4　长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调类型空间分布**

Fig.4　Spatial distribution of coupling coordination types between energy conservation and emission reduction efficiency of transportation industry and green economy in the Yangtze River Economic Belt

异，大致呈现出长江下游地区领先，中游居中，上游较为落后的空间分布形态，究其原因，长江下游地区得益于良好的地理位置、经济基础和基础设施，利于节能减排效率的提升。相比之下，上游地区多为山地、丘陵地形，交通基础设施建设成本较高，在交通绿色转型上面临更大的压力，导致耦合协调度水平相对靠后。具体到各省(市)，2013年各省(市)主要以勉强协调和中度协调为主。2016年，四川、安徽耦合协调水平有所提升，江西协调水平下降，其余省(市)保持不变。2019年，所有省(市)均进入协调状态，区域耦合协调水平提升幅度较大。2022年，四川、浙江及上海耦合协调度等级均有提升，其中浙江和上海迈入高度协调阶段，这得益于《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》的提出，加强了区域的联动发展。

### 3.3.2　耦合协调度影响因素分析

整理长江经济带2013—2022年各省(市)耦合协调度影响因素的原始数据，采用方差膨胀因子(Variance Inflation Factor，VIF)对各因素进行多重共线性检验。经检验可知，各影响因素的VIF值均小于10，说明不存在严重的多重共线性，能够进行回归分析。耦合协调度影响因素的Tobit结果如表7所示。

**表7　耦合协调度影响因素的Tobit结果**

Tab.7　Tobit results of influencing factors of coupling coordination degrees

| 变量 | 回归系数 | 标准误差 | Z | P值 | sig |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0.039 | 0.013 | 3.09 | 0.002 | *** |
| $X_2$ | −0.075 | 0.008 | −9.49 | 0.000 | *** |
| $X_3$ | 1.943 | 2.782 | 0.70 | 0.485 | — |
| $X_4$ | 0.036 | 0.011 | 3.16 | 0.002 | *** |
| $X_5$ | 0.360 | 0.101 | 3.56 | 0.000 | *** |

注：***表示在1%水平下显著。

为验证所得结果是否可靠，采用替换变量的方法对模型进行稳健性检验。在其他变量不变的前提下，选择用R&D经费支出($X_1'$)替换原有指标($X_1$)，表征科技创新水平，稳健性检验结果如表8所示。

**表8　稳健性检验结果**

Tab.8　Robustness test results

| 变量 | 回归系数 | 标准误差 | Z | P值 | sig |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1'$ | 0.055 | 0.015 | 3.77 | 0.000 | *** |
| $X_2$ | −0.072 | 0.008 | −9.07 | 0.000 | *** |
| $X_3$ | 3.317 | 2.823 | 1.17 | 0.240 | — |
| $X_4$ | 0.029 | 0.011 | 2.56 | 0.010 | *** |
| $X_5$ | 0.278 | 0.105 | 2.64 | 0.008 | *** |

注：***表示在1%水平下显著。

从表7可以看出，①科技创新对交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度的影响显著，科技创新水平每提升1%，耦合协调度会增加0.039%，说明科技创新水平的提高，能够增加行业对低碳节能技术的使用，促进交通业节能减排及绿色经济的发展，推动二者协调水平的提升。②能源消耗在1%的显著水平下对二者耦合协调水平产生负面影响，能源消耗每增加1%，耦合协调度会下降0.075%。这意味着减少能源消耗，可以提升交通业节能减排效率，促进绿色经济的发展。③环境规制对二者耦合协调度的影响并不显著，表明该区域环境规制未能有效促进耦合协调水平的提升。主要是由于环境规制的影响具有滞后性，难以在短时间内产生效用；其次，部分地区为了提升经济效益，可能会放宽对环境污染的管控，削弱了环境规制对耦合协调水平的作用。④对外开放通过了1%显著性水平检验且其回归系数为0.036，说明加大对外开放能够显著提升耦合协调发展水平。这是因为通过对外开放，能够为交通业节能减排及绿色经济引入先进的技术与管理经验，全面推动二者发展。⑤产业结构的回归系数为0.360，并通过了1%显著性水平检验，意味着当产业结构优化1%，该区域交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调度会提升0.360%，这是因为产业结构的调整升级，能够提高交通业及其他产业的技术水平，促进行业向智能化、绿色化发展，进而提高二者耦合协调水平。从表8可以看出，替换变量后各指标回归系数的正负及显著情况依然与替换前保持一致，只是大小有所变动，这表明结果具有较好的稳健性。

## 4　结论与建议

通过测算2013—2022年长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济的耦合协调度，并对其时空演变特征及影响因素进行分析，主要得出以下结论。①2013—2022年长江经济带交通业节能减排效率均值呈先降后升趋势，但各省(市)效率均值均小于1，未达到有效水平；绿色经济呈上升趋势，但大多数省(市)绿色经济发展水平不高。②长江经济带二者耦合协调度呈逐年上升态势，2013—2022年耦合协调类型由勉强协调上升到中度协调。③耦合协调水平在时序上持续向好，且各省(市)差距在逐渐缩小；在空间上，该区域交通业节能减排效率与绿色经济耦合协调类型大致呈现出长江下游领先，中游居中，上游较为落后的空间格局。④科技创新、对外开放与产业结构对该区域耦合协调度有显著的促进作用，能源消耗与其呈负相关，环境规制对其未有明显影响。

针对结论，提出以下对策建议，以促进长江经济带交通业节能减排效率与绿色经济的协调发展。①发挥下游地区引领作用，强化创新驱动与对外开放。下游地区耦合协调[27]程度显著高于中下游，因此应充分发挥引领示范作用，加强与其他省(市)的资源共享及经验分享，以缩小区域差距。同时，考虑到科技创新与对外开放对耦合协调度的显著促进作用，下游地区还应持续加大在科技创新方面的投入，积极引进国际先进技术设备，为全流域绿色升级提供核心动力。②推动中游地区枢纽建设与产业结构优化，提升联接效能。中游省份耦合协调程度居中，提升空间广阔，需充分利用区位优势，重点规划建设一批公铁水“无缝衔接”的多式联运枢纽，通过简化转运手续、统一载具标准，加强对上下游地区的联接作用。另外，考虑到产业结构对耦合协调水平影响较大，政府应鼓励传统企业的转型升级和绿色环保型企业的发展，促进中游地区产业结构优化升级。③补齐上游地区基础设施短板，释放绿色发展潜能。上游地区耦合协调度水平相对落后，因此要着力弥补自身在基础设施上的不足，加大对现代化交通基础设施的投入与建设力度，以破除绿色发展的瓶颈，激活后发优势。

**参考文献：**

[1] 冯新惠，李　艳，王诗逸，等．“双碳”目标下城市形态对碳排放的影响：以长江经济带为例[J]. 环境科学，2024，

45(6)：3389-3401.
FENG Xinhui，LI Yan，WANG Shiyi，et al. Impacts of Urban Form on Carbon Emissions under the Goal of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality：A Case Study of the Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Science，2024，45(6)：3389-3401.

[2] BENCEKRI M，KU D，LEE D，et al. The Elasticity and Efficiency of Carbon Reduction Strategies in Transportation[J]. Energy Sources，Part A：Recovery，Utilization，and Environmental Effects，2023，45(4)：12791-12807.

[3] ATIAJA J，ARROYO F，HIDALGO V，et al. Dynamic Simulation of Energy Scenarios in the Transition to Sustainable Mobility in the Ecuadorian Transport Sector[J]. Sustainability，2024，16(15)：6640.

[4] KUMAR R，KANWAL A，ASIM M，et al. Transforming the Transportation Sector：Mitigating Greenhouse Gas Emissions through Electric Vehicles (EVs) and Exploring Sustainable Pathways[J]. AIP Advances，2024，14(3)：035320.

[5] 郑　琰，蒋雪梅，肖玉杰. 交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测[J]. 环境科学，2024，45(4)：1879-1887.
ZHENG Yan，JIANG Xuemei，XIAO Yujie. Spatio-Temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency[J]. Environmental Science，2024，45(4)：1879-1887.

[6] 杨　青，吴向荣，刘　洋，等. 国家中心城市交通碳排放效率的空间网络结构及动因研究[J]. 环境工程技术学报，2024，14(4)：1167-1177.
YANG Qing，WU Xiangrong，LIU Yang，et al. Research on Spatial Network Structure and Influencing Factors of Transportation Carbon Emission Efficiency in National Central Cities in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology，2024，14(4)：1167-1177.

[7] 李艳鸽，伍　生，王天宇，等. 基于超效率SBM-GML指数模型的铁路运营碳排放效率测度[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(5)：2303-2316.
LI Yange，WU Sheng，WANG Tianyu，et al. Carbon Emission Efficiency Measurement of Railway Operation Based on Super-SBM-GML Index Model[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(5)：2303-2316.

[8] MOHMAND Y T，MEHMOOD F，MUGHAL K S，et al. Investigating the Causal Relationship between Transport Infrastructure，Economic Growth and Transport Emissions in Pakistan[J]. Research in Transportation Economics，2021，88：100972.

[9] PIETRZAK O，PIETRZAK K. The Economic Effects of Electromobility in Sustainable Urban Public Transport[J]. Energies，2021，14(4)：878.

[10] 唐晓灵，曹　倩. 节能减排效率与经济发展水平的耦合关系研究：以陕西省为例[J]. 环境污染与防治，2020，42(2)：249-253.
TANG Xiaoling，CAO Qian. Coupling Relationship between Economic Development and Efficiency of Energy Conservation and Emission Reduction：Taking Shaanxi as an Example[J]. Environmental Pollution & Control，2020，42(2)：249-253.

[11] 徐素波，王国庆. 碳排放强度与经济社会绿色转型耦合协调的时空格局演化[J]. 生态经济，2024，40(12)：22-31.
XU Subo，WANG Guoqing. Evolution of Spatio-Temporal Pattern of Coupling and Coordination of Carbon Emission Intensity and Economic and Social Green Transition[J]. Ecological Economy，2024，40(12)：22-31.

[12] 梁美琪. 中国省域节能减排效率及影响因素分析[D]. 武汉：中南财经政法大学，2023.

[13] 何景师，王术峰，徐　兰. 碳排放约束下我国三大湾区城市群绿色物流效率及影响因素研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(8)：30-36.
HE Jingshi，WANG Shufeng，XU Lan. Research on the Efficiency and Influencing Factors of Green Logistics in Three Bay-Area City Clusters under the Constraint of Carbon Emission[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(8)：30-36.

[14] 张艳妃，张春勤，黄　毅，等. 中国省域交通运输碳排放空间网络特征研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2025，23(1)：174-188.
ZHANG Yanfei，ZHANG Chunqin，HUANG Yi，et al. Spatial Correlation Network of Transportation Carbon Emissions in China[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2025，23(1)：174-188.

[15] 陈人杰. 面向片区层面的空间规划交通碳排放测算方法研究[J]. 交通节能与环保，2025，21(1)：57-62，112.
CHEN Renjie. Research on the Accounting Method of Transport Carbon Emissions for Spatial Planning at Regional Level[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection，2025，21(1)：57-62，112.

[16] 宋　辉，辛　欣. 基于熵值赋权的中国绿色经济发展水平

评价[J]. 当代经济，2020，37(5)：80-84.

[17] 武勇杰，原　悦，侯柳茹. 黄河流域绿色物流与绿色经济协调发展的驱动因素[J]. 科技管理研究，2024，44(24)：57-66.
WU Yongjie，YUAN Yue，HOU Liuru. Driving Factors of Coordinated Development of Green Logistics and Green Economy in the Yellow River Basin[J]. Science and Technology Management Research，2024，44(24)：57-66.

[18] 张　薇. 我国绿色经济评价指标体系的构建与实证[J]. 统计与决策，2021，37(16)：126-129.

[19] 汪　彬，刘晓阳，古晨光，等. 创新要素对绿色经济的影响及空间效应研究[J]. 华东经济管理，2022，36(8)：1-12.
WANG Bin，LIU Xiaoyang，GU Chenguang，et al. Research on the Impact and Spatial Effect of Innovative Elements on Green Economy[J]. East China Economic Management，2022，36(8)：1-12.

[20] 田秀杰，孙瑞琦. 数字经济与碳减排的耦合协调及影响因素研究[J]. 资源开发与市场，2024，40(12)：1793-1801.
TIAN Xiujie，SUN Ruiqi. Study on the Coupling Coordination and Influencing Factors of Digital Economy and Carbon Emission Reduction[J]. Resource Development & Market，2024，40(12)：1793-1801.

[21] 窦红宾，陈怡曼. 绿色物流与区域经济时空耦合及影响因素：以长江经济带为例[J]. 生态经济，2024，40(11)：65-71.
DOU Hongbin，CHEN Yiman. Spatial and Temporal Coupling and Influencing Factors between Green Logistics and Regional Economy：A Case Study of the Yangtze River Economic Belt[J]. Ecological Economy，2024，40(11)：65-71.

[22] 刘　丽，任保平，汪　浩. 数字经济与产业绿色高质量发展耦合协调度的时空特征、区域差异与影响因素[J]. 统计与决策，2023，39(22)：24-29.
LIU Li，REN Baoping，WANG Hao. Spatiotemporal Characteristics，Regional Differences and Influencing Factors of Coupling Coordination Degree between Digital Economy and Industrial Green High-Quality Development[J]. Statistics & Decision，2023，39(22)：24-29.

[23] 杜晓梅，孙孝文，王一鸣. 绿色物流与低碳经济系统协调度评价及其影响因素研究：基于西部地区面板数据的实证分析[J]. 成都行政学院学报，2024(5)：31-42，73，117-118.
DU Xiaomei，SUN Xiaowen，WANG Yiming. Evaluation of the Coordination Degree of Green Logistics and Low-Carbon Economic System and Its Influencing Factors：An Empirical Study Based on the Panel Data of 11 Provinces in Western China[J]. Journal of Chengdu Administration Institute，2024(5)：31-42，73，117-118.

[24] 邢文婷，刘明珠. 减污降碳与新质生产力发展耦合协调效应时空演变格局及影响因素：以长江经济带为例[J/OL]. 环境科学. (2025-04-25) [2025-06-01]. https：//link. cnki. net/doi/10. 13227/j. hjkx. 202412244.

[25] 罗　婧，吴　静，王毓乾，等. 广州市城市化与生态环境变化耦合协调分析[J]. 北京测绘，2025，39(3)：350-357.
LUO Jing，WU Jing，WANG Yuqian，et al. Coupling and Coordination Analysis between Urbanization and Ecological Environment Changes in Guangzhou City[J]. Beijing Surveying and Mapping，2025，39(3)：350-357.

[26] 秦小辉，赵晨曦. 西部陆海新通道物流产业效率及时空演化研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(2)：11-18.
QIN Xiaohui，ZHAO Chenxi. Research on Logistics Industry Efficiency and Spatial-Temporal Evolution of the New International Land-Sea Trade Corridor[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(2)：11-18.

[27] 谯熙康，陈　斌，黄福友. 组态视角下我国低碳物流效率分析及提升路径研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：61-72.
QIAO Xikang，CHEN Bin，HUANG Fuyou. Efficiency Analysis and Improvement Path of Low-Carbon Logistics in China from the Perspective of Configuration[J]. Railway Logistics，2025，43(5)：61-72.

(责任编辑　金　晶)