蒋艺璇,陈芷萱,石 磊.长江经济带城市水-能-碳耦合协调时空演化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):525-538.
Jiang Y X, Chen Z X, Shi L. Spatiotemporal evolution and influencing factors of water-energy-carbon coupling coordination in cities of the Yangtze River Economic Belt [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):525-538.

长江经济带城市水-能-碳耦合协调时空演化及影响因素

蒋艺璇,陈芷萱,石 磊* (中国人民大学生态环境学院,北京 100872)

摘要：水、能、碳是社会经济发展中的关键资源环境要素,探究水-能-碳的耦合协调关系、促进其协调发展对于推动区域绿色高质量发展具有重要意义.以长江经济带 95 个城市为研究对象,从总量和强度双控视角构建水-能-碳评价指标,运用耦合协调度模型测算 2006~2019 年长江经济带各城市水-能-碳耦合协调度,并采用空间杜宾模型识别促进耦合协调的关键影响因素.研究发现:长江经济带水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳四类耦合协调度数值在 0.6724~0.9987 区间范围内变化,呈现初级、中级、良好和优质协调四种等级,中位数和均值呈上升趋势,存在明显改善,自 2014 年起,每年均有超过 75%的城市达到优质协调等级.四类耦合协调度均呈现正向空间聚集,除能-碳外其他三类优质协调等级城市由零散分布逐步发展为连片式分布格局.四类耦合协调度均存在显著的正向空间溢出效应,本地耦合协调度的提高会对空间关联城市的耦合协调度产生积极影响.经济发展水平、环境规制、技术创新、NDVI 对本地耦合协调度的提升有显著促进作用,而固定资产投资则产生抑制作用.同时经济发展水平和产业结构升级对空间关联城市的耦合协调度分别存在正向和负向的空间溢出效应,环境规制和技术创新对邻近城市的负向空间溢出相比经济联系城市更加显著.

关键词：长江经济带；水-能-碳；耦合协调；时空演化；空间杜宾模型
中图分类号：X703.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0525-14

Spatiotemporal evolution and influencing factors of water-energy-carbon coupling coordination in cities of the Yangtze River Economic Belt. JIANG Yi-xuan, CHEN Zhi-xuan, SHI Lei* (School of Ecology & Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：525~538

Abstract：Water, energy, and carbon are critical resource and environmental elements that underpin socio-economic development. Exploring the coupling coordination among water-energy-carbon (WEC) and promoting their synergistic development are essential for advancing regional green and high-quality growth. Taking 95 cities in the Yangtze River Economic Belt (YREB) as the study area, WEC evaluation indicators were constructed from the dual-control perspective of total amount and intensity. The coupling coordination degree (CCD) model was applied to measure the CCD of WEC from 2006 to 2019, and the spatial durbin model was employed to identify the key influencing factors. The results showed that the CCD of WEC, water-energy, water-carbon, and energy-carbon in the YREB ranged from 0.6724 to 0.9987, and were classified into four levels: primary, intermediate, good, and quality coordination, with the median and mean showing an overall upward trend and notable improvement. Since 2014, more than 75% of the cities had reached the quality coordination level each year. All four categories of CCD exhibited positive spatial clustering, with cities achieving quality coordination in the other three categories evolving from scattered to contiguous distribution patterns, while energy-carbon remained widely distributed. Significant positive spatial spillover effects were detected for all four categories, indicating that improvements in local coupling coordination positively impacted that of spatially connected cities. Economic development level, environmental regulation, technological innovation, and NDVI significantly promoted local CCD, whereas fixed asset investment exerted a suppressing effect. Furthermore, economic development level and industrial structure upgrading showed positive and negative spatial spillover effects on spatially connected cities, respectively, while the negative spillovers of environmental regulation and technological innovation were more pronounced among geographically adjacent cities compared to economically linked cities.

Key words：Yangtze River Economic Belt；water-energy-carbon；coupling coordination；spatiotemporal evolution；spatial durbin model

水-能-碳之间通过生产、消费和流动过程形成复杂的关联关系,并与经济社会、生态环境高度交织,单纯针对某一资源要素进行优化不仅难以实现可持续发展目标,还可能会诱发更深层次的环境冲突[1-2].“十二五”以来,中国逐步将水资源、能源消费以及碳排放总量和强度双控纳入国家治理核心议程,环境治理也正从单一领域突破转向生态要素协

收稿日期：2025-05-20
基金项目：国家社会科学基金重大项目(21ZDA083)
* 责任作者, 教授, shil@ruc.edu.cn

同治理[3-4].探究水-能-碳的耦合协调关系及其影响因素,对于破解区域资源环境约束与高碳发展模式的结构性矛盾、推动区域高质量发展具有重要理论和实践意义[5-6].

系统探究水-能-碳的关联关系,探索破解三者耦合制约的矛盾、实现协调发展的路径方案,已成为目前研究的热点[7-8].就研究视角而言,大部分研究主要基于耦合关联视角探讨水、能、碳要素的流动耦合特征[9]、系统关联网络[10]和协同政策评估[11],并逐渐由单要素分析演进到两两要素以及水-能-碳为核心的多要素关系研究.方法学上,部分研究采用投入产出分析[12]、可计算一般均衡模型[13]等自上而下的方法,通过经济或生态网络模拟和评估水-能-碳的跨部门流动与整体耦合效应;一些研究采用生命周期分析[14]、多目标优化[15]等自下而上的方法量化特定过程的水-能-碳足迹;而耦合协调度模型因适用于评估两个或多个系统、要素或变量之间的相互作用,被广泛用于水-能-碳要素关联和系统评价分析[6,16].研究尺度上,已有研究多从国家[17]、流域区域[18]、省域单元[19]、产业部门[20]等不同空间尺度进行探究评估.总体而言,目前学者对水-能-碳关联关系的研究不断丰富,但仍有以下方面有待进一步补充完善:一是当前区域层面研究多聚焦于省级尺度,关注城市层面的研究较少且在城市数量和空间覆盖度方面存在一定局限;二是目前研究主要集中在探讨水-能-碳三者关系的现状评估以及未来预测,对于影响因素的探讨相对较少,且影响因素可能存在的空间溢出效应未充分考虑,制约了区域协同治理策略的应用.

基于此,本文选取作为我国经济发展重要引擎但仍面临严峻资源环境问题的长江经济带为研究区域,从总量和强度双控视角采用耦合协调度模型探讨长江经济带 95 个城市 2006~2019 年水资源利用、能源消耗及碳排放之间的关联关系,探索水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调度的时空演变主要趋势和特征,并识别其背后的关键影响因素及其空间溢出效应,以期为制定综合性的区域资源环境政策提供科学依据.

1 研究方法和数据来源

1.1 研究区域

长江经济带横跨中国东、中、西三大区域,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 个省市,占全国陆地总面积的 21.4%,人口、地区生产总值、用水量占全国 40%以上,能源消费和碳排放占比也超过 35%[21-22].随着经济的快速发展,该区域的水资源、能源过度开发和消耗以及碳排放问题日益凸显[23].根据数据的可获得性及统计口径的一致性原则,本文选取长江经济带 95 个地级及以上城市作为研究对象.

1.2 水资源、能源、碳排放指标构建

在借鉴已有研究成果的基础上[6,18],基于国家和区域对于用水总量控制和用水效率控制两条红线、能耗双控、碳排放双控的要求,从总量和强度双控视角构建了水资源利用、能源消费、碳排放指标,并利用熵值法计算得到三类指标内分项指标的权重.熵值法属于客观权重确定方法,反映同一指标差异的信息含量,能够有效避免在权重设置过程中的主观因素影响,其权重由指标数据的信息熵决定,指标变异程度越高,离散性越强,信息熵越小,权重越大[24].

首先对指标进行标准化处理,本文涉及指标均为负向指标,标准化计算公式如下:

$$x_{ij}^{'}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{1}$$

式中:x_{ij}为第 i 个城市各系统的第 j 项评价指标的初始值,$x_{ij}^{'}$为标准化值,$\max(x_{ij})$和$\min(x_{ij})$分别为初始值中的最大值和最小值.

为了使数据全部大于 0,避免数据处理无意义,按公式(2)对标准化数据进行了平移,平移值为 0.0001:

$$x_{ij}^{''}=x_{ij}^{'}+0.0001 \tag{2}$$

按公式(3)计算第 i 个城市在第 j 个指标中所占的比例:

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}^{''}}{\sum_{i=1}^{n}x_{ij}^{''}} \tag{3}$$

采用公式(4)计算第 j 个指标的熵值:

$$e_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}y_{ij}\ln y_{ij} \tag{4}$$

第 j 个指标的权重按公式(5)计算:

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

采用公式(6)计算水资源、能源及碳排放系统各自的综合评价指数:

$$U=\sum_{j=1}^{m}w_j x_{ij}'' \tag{6}$$

1.3　耦合协调度模型

本文采用耦合协调度模型探究水资源利用、能源消耗与碳排放之间的相互作用关系和特征,分别计算水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳的耦合协调度.具体计算步骤如下:

采用公式(7)计算各系统两两之间或三者之间耦合度 C:

$$C=n\left[\frac{U_1\times U_2\times\cdots\times U_n}{(U_1+U_2+\cdots+U_n)^n}\right]^{\frac{1}{n}} \tag{7}$$

式中:$C\subset[0,1]$,C 值越大,系统间耦合程度越高.

采用公式(8)计算各系统两两之间或三者之间的综合评价指数:

$$T=\gamma_1U_1+\gamma_2U_2+\cdots+\gamma_nU_n \tag{8}$$

式中:本文认为各子系统同等重要,因此取 $\gamma_1=\gamma_2=\cdots=\gamma_n=1/n$.

最后采用公式(9)计算各子系统两两之间或三者之间的耦合协调度 D:

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{9}$$

式中:$D\subset[0,1]$,数值越接近于 1,表示系统之间耦合协调程度越高,协同发展越有序;数值越接近于 0 表示系统之间越絮乱,发展濒临失调.目前耦合协调等级划分标准常用五等分法[25]和十等分法[26],相较而言,十等分法阈值划分更加细化,能提升区分度从而更敏锐地捕捉城市间的差异,反映区域协调发展梯度和演变特征,在长江经济带区域高质量发展、城市群协同治理等领域被广泛应用[27-28],因此本文耦合协调等级划分标准采用十等分法,如表 1 所示.

表 1　耦合协调等级划分

Table 1　Classification of coupling coordination levels

耦合协调度数值区间	对应等级
[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
[0.4,0.5)	濒临失调
[0.5,0.6)	勉强协调
[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

1.4　空间计量模型

考虑到水、能、碳之间存在的空间关联和依赖性[29],本文选择空间计量模型进行影响因素的探索.常见的空间计量模型包括空间滞后模型、空间误差模型以及空间杜宾模型三类,其中空间杜宾模型作为最一般的空间计量模型,在满足一定条件下,可以转化为空间滞后模型和空间误差模型,其表达式为:

$$y_{it}=\rho\sum_{j=1}^{n}w_{ij}y_{jt}+\beta x_{it}+\theta\sum_{j=1}^{n}w_{ij}x_{jt}+\varepsilon_{it} \tag{10}$$

式中:当θ=0 时,表示为空间滞后模型;当 $\theta+\rho\beta=0$ 时,表示为空间误差模型.

基于上述设定,本文构建空间杜宾模型探究影响城市水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调关系的关键因素:

$$D_{it}=\rho\sum_{i\neq j}w_{ij}D_{jt}+\beta_0+\beta X_{it}+\theta\sum_{i\neq j}w_{ij}X_{jt}+\lambda_t+\mu_i+\varepsilon_{it} \tag{11}$$

式中:D_{it} 和 D_{jt} 分别为城市 i 及其空间关联城市 j 在 t 年的耦合协调度,w_{ij} 为空间权重矩阵 W 中的元素,ρ、β 和 θ 为待估参数,λ_t 为时间固定效应,μ_i 为空间固定效应,ε_{it} 为随机误差项.基于长江经济带的战略定位强调城市间的经济联系,考虑到单纯以地理距离定义空间关联性可能会存在偏差,本文参考张栀等[30]构建综合考虑空间地理距离特征和经济属性的经济距离空间权重矩阵并将其分析结果作为基准结果,并以二进制邻接矩阵的结果作为稳健性检验.

1.5　变量选取

在探究城市水-能-碳耦合协调的影响因素时,本文综合考虑了经济、社会、环境和技术等多个维度的影响,基于已有文献和理论基础[6,31-34],具体选取了经济发展水平(PGDP)、产业结构升级(IND)、人口密度(POP)、环境规制(ER)、技术创新(TEC)、固定资产投资规模(INV)和生态状况(NDVI)等指标,构建空间杜宾模型,以进一步分析各因素对本地及其空间关联城市水-能-碳耦合协调度的影响作用,从而揭示城市在区域协同发展中如何通过自身优化和空间互动实现资源的高效利用和环境的可持续发展.其中,经济发展水平用人均 GDP 的自然对数形式表示;产业结构升级通过三大产业份额比例的相对变化刻画长江经济带城市的产业结构演进[35];人口密度以每平方公里的常住人口数度量;环

境规制选取各城市政府工作报告中与水、能、碳相关的 24 个生态环境词汇出现频数占报告全文词频总数的比例表示[36],包括 5 个目标词汇:环境保护、环保、绿色、清洁、低碳,5 个环境因素对象词汇:生态、空气、水体、水资源、水质,11 个环境污染对象词汇:污染、排污、化学需氧量、氨氮、总磷、能耗、PM_{10}、$PM_{2.5}$、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物,3 个措施词汇:节水、节能、减排;技术创新以“专利授权数量+1”的自然对数形式表示[37];固定资产投资规模以全社会固定资产投资额表示;生态状况采用可直接反映城市植被覆盖度、碳汇潜力和生态系统稳定性的归一化植被指数 NDVI 进行衡量[38].

1.6 数据来源

表 2 水资源、能源、碳排放指标构成及权重

Table 2 Composition and weights of WEC indicators

类别	指标	获取或测算方法	权重
水资源	用水总量	水资源公报获取	0.456
	用水强度	用水总量/GDP	0.544
能源	能源消费总量	夜间灯光数据反演测算	0.394
	能耗强度	能源消费总量/GDP	0.606
碳排放	碳排放总量	CEADs 数据库获取	0.684
	碳排放强度	碳排放总量/GDP	0.316

注:本文将等权重与熵值法计算得到权重下的耦合协调度结果对比进行权重敏感性分析,结果表明扰动后四类平均耦合协调度变动均小于0.0075,Spearman 等级相关系数均大于0.989(p<0.001),表明权重波动对耦合协调度结果影响微弱,具有稳健性.

本文涵盖了 2006~2019 年长江经济带 95 个地级市及以上行政单位城市的面板数据.用水量数据来源于各省市水资源公报;能源消费数据基于改进后的时间序列类 DMSP-OLS 夜间灯光数据[39],反演测算地级市的能源消费量[40-41];碳排放数据来源于中国碳核算数据库(CEADs);常住人口数据来源于各省市统计年鉴、各城市国民经济和社会发展统计公报;环境规制数据来源于手工搜集 95 个城市各年度的政府工作报告文本进行分词处理后统计相关词汇出现频次占全文词频总数的比例;专利数据来源于国家知识产权局专利数据库;NDVI 数据来源于 NASA 发布的 MOD13A3 数据集处理后的逐年归一化植被指数,分辨率为 1km;其他经济社会数据主要来源于《中国城市统计年鉴》,相关价格指数以 2006 年为基期进行平减折算.部分缺失值采用插值法进行补充.指标权重测算及变量描述统计结果如表 2 和表 3 所示.

表 3 变量描述统计结果

Table 3 Descriptive statistics of variables

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
$D_{水能碳}$	1330	0.913	0.043	0.694	0.991
$D_{水能}$	1330	0.901	0.047	0.716	0.987
$D_{水碳}$	1330	0.915	0.048	0.672	0.991
$D_{能碳}$	1330	0.922	0.049	0.681	0.999
lnPGDP	1330	10.267	0.685	8.504	12.025
IND	1330	2.273	0.134	1.970	2.724
POP	1330	0.052	0.042	0.010	0.383
ER	1330	0.009	0.004	0.001	0.032
lnTEC	1330	7.267	1.772	3.091	11.519
INV	1330	0.131	0.145	0.005	1.407
NDVI	1330	0.750	0.065	0.441	0.866

2 水-能-碳耦合协调度时空演化

2006~2019 年长江经济带 95 个城市水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调度数值分别在 0.6937~0.9907,0.7164~0.9867,0.6724~0.9912,0.6809~0.9987 区间范围内变化;其中,水-能-碳、水-碳、能-碳耦合协调包含初级协调、中级协调、良好协调和优质协调四种类型,而水-能耦合协调仅包含中级协调、良好协调和优质协调三种类型(图 1).从变化趋势来看,水-能-碳、水-能、水-碳耦合协调度均有明显改善,中位数和平均值均呈现显著上升趋势,能-碳耦合协调度中位数和平均值变化幅度相对较小但同样有所提升.从数据分布来看,四类耦合协调箱线图的箱体和须线范围均缩短,2014 年起,75%以上城市的耦合协调度集中分布于优质协调等级区间,表明自 2014 年长江经济带上升为国家战略之后,在区域政策推动下城市间耦合协调度的差异和波动总体减小,但离群值尤其是低值离群的数量有所增加,显示出区域一体化推动多数城市耦合协调度提升且趋同,但少数城市仍然面临较大的资源消费和碳排放压力,区域内城市耦合协调度呈现趋同与极化并存的特征.

从耦合协调等级的变化类别来看(表 4),超过 40%的城市水-能-碳和水-能耦合协调等级由良好协调跃升为优质协调,且分别有 32.63%和 22.11%的城市在研究期内始终保持优质协调等级;而水-碳和能-碳耦合协调中,始终保持优质协调等级的城市占比最高,后者中占比高达 65.26%.然而,除水-能耦合协调之外,其

他三类要素耦合均存在部分城市在 2019 年的耦合协调等级较 2006 年有所下降,重庆市水-碳耦合协调由良好协调降为中级协调,无锡市、成都市由优质协调降为良好协调;宁波市水-能-碳和水-碳耦合协调等级均由优质协调降为良好协调;苏州市能-碳等级由良好协调降为初级协调又回升至中级协调且水-能-碳等级也由良好协调降为中级协调.此外,上海市的四种耦合协调等级始终未达到良好和优质协调等级.

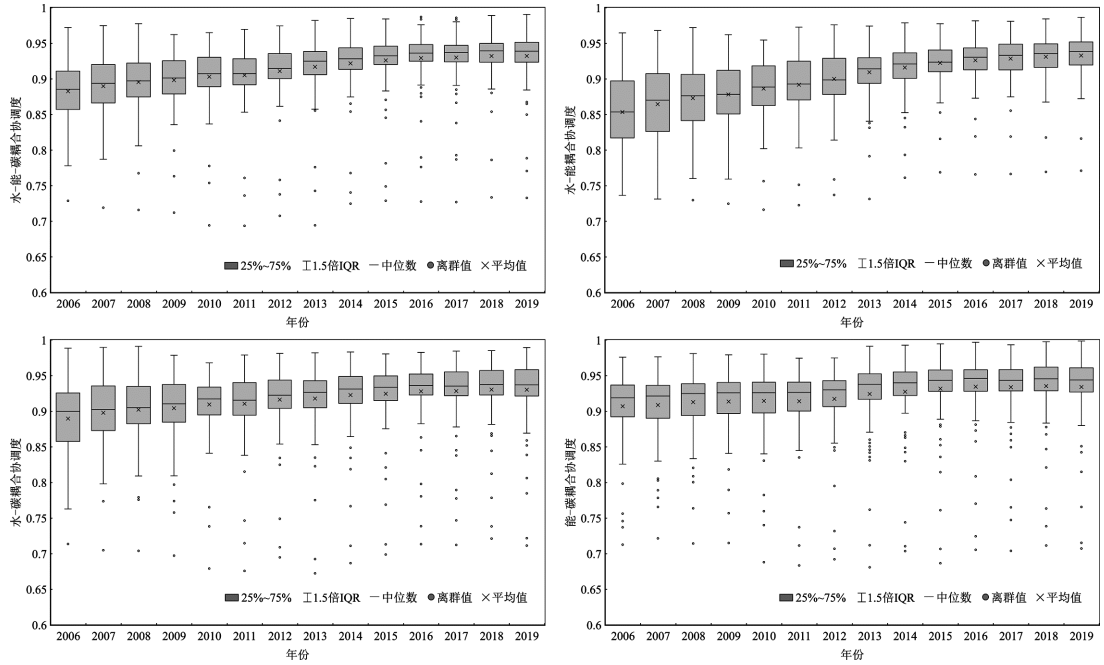


图 1　长江经济带 2006~2019 年 95 个城市四类耦合协调度数值分布变化

Fig.1　Distribution and temporal variation of four categories of CCD in 95 cities across the YREB from 2006 to 2019

表 4　2006~2019 年各耦合协调等级变化类别的城市占比(%)

Table 4　Distribution of cities by coupling coordination level changes from 2006 to 2019 (%)

城市耦合协调度等级变动类别		水-能-碳	水-能	水-碳	能-碳
等级提升	中级协调→良好协调	0.000	3.158	0.000	0.000
	中级协调→优质协调	1.053	9.474	3.158	2.105
	良好协调→优质协调	44.211	46.316	29.474	12.632
等级不变	始终保持中级协调	1.053	1.053	0.000	1.053
	始终保持良好协调	6.316	3.158	4.211	6.316
	始终保持优质协调	32.632	22.105	40.000	65.263
等级降低	良好协调→中级协调	1.053	0.000	1.053	0.000
	优质协调→良好协调	1.053	0.000	0.000	0.000
等级波动	波动但最终提升	6.316	11.579	8.421	3.158
	波动但最终不变	6.316	3.158	10.526	8.421
	波动但最终降低	0.000	0.000	3.158	1.053

从空间分布来看(图 2),长江经济带 95 个城市除能-碳耦合协调在 2006 年就出现较高比例的优质协调等级且在东、中、西部广泛分布之外,其他三类耦合协调处于优质协调等级的城市均由零散分布逐渐演变为大范围连片式的空间分布格局.在水-能-碳耦合协调方面,优质协调等级城市最初集中分布在东部地区尤其是浙江省,随后逐步向中部和西部城市扩散,2010 年起其占比显著攀升,2014 年开始始终保持 85%以上;除攀枝花市在 2006 年处于中级协调等级以及上海市、苏州市、重庆市长期处于初级或中级协调等级,研究期内其他城市均处于良好或优质协调等级.在水-能耦合协调方面,2014 年之前优质协调等级城市数量较少且分布较为分散,主要集中于浙江省;自 2013 年起,优质协调等级城市数量显著增加,空间分布范围由东部向中部和西部不断扩展,到 2015 年重庆市达到良好协调等级后,除上海市一直处于中级协调等级外,其他城市均处于优质协调或良好协调等级.在水-碳耦合协调方面,2010 年之前优质协调等级城市主要集中在东部和西部地区;2010 年起,中部城市也逐渐由良好协调向优质协调过渡,仅上海市、苏州市、重庆市长期处于初级或中级协调等级,以及南京市短暂出现中级协调等级,其他城市均处于优质或良好协调等级.在能-碳耦合协调方面,优质协调等级占比始终领先,且广泛分布在东部和中部地区,东部和中部城市除上海市和苏

州市以外始终处于优质和良好协调状态,西部城市在研究初期良好协调等级城市占比较高,2012 年后仅重庆市低于良好协调等级.上海市、苏州市、重庆市长期低于良好协调等级的现象与其城市特征和发展模式密切相关.上海市作为超大城市,生活用水、用能需求形成刚性约束,但其自身能源禀赋相对较弱,能源主要依赖外部输入,水资源方面也面临水质型缺水;在产业结构方面通信设备、计算机和其他电子设备以及化学产品行业也在需求端产生了显著的水-能-碳耦合协调压力[42].苏州市制造业占 GDP 比重超过 40%,虽然近年在绿色转型方面持续推进,但因基础较高的工业碳排放基底与持续增长的能源需求,其能-碳协调改善进程相对滞后[43];同时,太湖流域水资源季节性波动明显,水资源调配压力加剧了苏州市水-能-碳系统间的协调难度[44].重庆市作为西部超大城市,同样面临巨大用水与用能需求的刚性压力,又受限于特殊自然条件与发展路径的双重约束,水资源开发困难且利用潜力不大[45],长期承担西部重工业转移任务使得碳排放总量持续上升[46],能源结构优化带来的煤行业碳排放占比虽然有所下降但仍超过 65%[47],耦合协调度提升受限于路径依赖与区域产业高碳基底惯性,难以持续改善.



图 2 长江经济带 2006、2010、2014、2019 年 95 个城市四类耦合协调等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of four categories of coupling coordination levels in 95 cities across the YREB(2006, 2010, 2014, 2019)

审图号:GS(2016)1605

总体而言,东部地区耦合协调水平的提升具有明显的先导性,而中部和西部地区的提升则相对滞后,呈现出“东部-中部-西部”的梯度演化趋势.党的十八大以来,特别是 2014 年长江经济带被确立为国家三大战略之一之后,长江经济带在促进水资源和能源高效利用、减少碳排放方面取得显著成效,水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调性得到明显改善.然而,尽管区域总体要素耦合协调性取得了显

著进展,城市间耦合协调度差异逐步缩小,但部分城市在水资源利用、能源效率提升与碳排放控制的协调发展过程中仍面临较大挑战,需要结合城市自身特点,加强水资源调度优化、能源结构调整与碳排放管控之间的统筹协同,制定更具针对性的优化策略.

3　水-能-碳耦合协调影响因素分析

3.1　空间自相关检验

从空间关联性来看(表 5),在经济距离权重矩阵下,从 2006 年到 2019 年,长江经济带城市水-能-碳耦合协调度 Moran's I 值均为正,且除了 2006 年和 2010 年外其他年份的 Moran's I 值均通过了 5%水平下的显著性检验,整体呈波动式上升趋势,表明水-能-碳耦合协调存在空间自相关性且逐渐增强.尤其是在 2013 年之后,Moran's I 值和 P 值表现出更显著的空间正相关性,相似的水-能-碳耦合协调水平在空间上趋于聚集,显示出长江经济带建设的国家战略地位确立以来,在区域协同政策的推动实施下,城市自身水-能-碳耦合协调水平整体得到提升的同时,也能对周边城市的水-能-碳耦合协调产生积极影响.水-能、水-碳和能-碳耦合协调度的 Moran's I 值均为正且分别有超过 85%、85%、78%的年份通过了 5%水平下的显著性检验,后两者变化趋势与水-能-碳相似,但前者呈现下降趋势.

表 5　耦合协调度的 Moran's I 检验

Table 5　Moran's I test results for CCD

年份	水-能-碳	水-能	水-碳	能-碳
2006	0.119*	0.246**	0.062	0.125**
2007	0.131**	0.234**	0.123**	0.123**
2008	0.121**	0.223*	0.108*	0.119*
2009	0.130**	0.216**	0.119*	0.120**
2010	0.110*	0.177*	0.119**	0.110*
2011	0.133**	0.174**	0.159***	0.123**
2012	0.131**	0.156**	0.164***	0.122**
2013	0.155***	0.161**	0.175***	0.155**
2014	0.163***	0.164***	0.180***	0.164***
2015	0.178***	0.187***	0.179***	0.178***
2016	0.174***	0.146***	0.179***	0.181***
2017	0.163***	0.135***	0.167***	0.173***
2018	0.151**	0.134***	0.156**	0.160***
2019	0.158***	0.126***	0.166***	0.165***

注: *** P<0.01, ** P<0.05, * P<0.1.

一方面,水资源管理“三条红线”、能耗双控等政策是我国较早实施的资源管控政策,长江经济带也积极加强了水资源与能源的共享与管理[29],水-能系统的“高-高”和“低-低”集聚特征因区域均衡发展而弱化,导致空间相关性下降;另一方面,碳排放考核目标和管控政策出台晚于水资源和能源消费管控政策,融入碳排放系统后,政策滞后性带来的协同需求以及碳系统复杂性带来的跨区域传导反而强化了空间关联[8],反映了可持续发展进程中资源环境系统耦合关系的动态演变和复杂性,需要加强多要素的协同管理.

3.2　空间计量模型选择

为保证模型设定和变量选取的科学性,本文首先检验各解释变量的方差膨胀系数(VIF),结果均小于 5,说明不存在显著多重共线性.空间计量模型经 LM、LR、Wald 及 Hausman 检验验证,结果显示(表 6),水-能-碳和水-碳模型存在空间误差与空间滞后效应,支持使用双向固定效应的空间杜宾模型.水-能和能-碳模型虽然 Robust LM Error 不显著,但 LR 和 Wald 检验结果支持空间杜宾模型优于空间滞后模型,结合固定效应检验结果亦选择双向固定效应的空间杜宾模型[48].

表 6　空间计量模型检验结果

Table 6　Spatial econometric model diagnostic tests

检验方法	水-能-碳	水-能	水-碳	能-碳
Moran's I	7.295***	14.359***	4.574***	6.121***
LM Error	51.313***	201.923***	19.787***	35.900***
Robust LM Error	10.589***	1.855	14.119***	2.575
LM Lag	117.699***	271.367***	56.259***	56.737***
Robust LM Lag	76.975***	71.299***	50.591***	23.412***
LR-SAR	66.781***	32.040***	37.360***	151.833***
LR-SEM	87.600***	44.581***	37.805***	181.049***
Wald-SAR	67.489***	32.344***	39.651***	157.914***
Wald-SEM	84.138***	42.154***	39.051***	163.579***
Hausman	54.508***	171.530***	18.501***	46.915***
LR-indfixed	53.218***	26.831***	18.873***	95.665***
LR-timefixed	2193.198***	1871.610***	2292.967***	2189.585***

注: *** P<0.01, ** P<0.05, * P<0.1.

3.3　空间杜宾模型回归结果

表 7 报告了公式(11)的空间杜宾模型基准回归的参数估计结果,结果显示:水-能-碳、水-能、能-碳耦合协调的空间自相关系数 ρ 通过了 1%水平的显著性检验,水-碳耦合协调的空间自相关系数 ρ 通过了 5%水平的显著性检验,表明长江经济带水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳的耦合协调均有显著的正向空间溢出效应,本地的水-能-碳、水-能、水-

碳、能-碳耦合协调度提升通过经济或地理联系能够显著改善其他地区耦合协调度,存在一定的互动协同.这种正向的空间溢出效应一方面由于长江作为核心水系贯穿经济带以及资源环境的外部性特征,长江经济带城市在水资源利用、能源跨区调配、污染治理和生态保护方面具有天然的空间关联性[49];另一方面,在“共抓大保护,不搞大开发”的战略要求,国家陆续出台了一系列有关长江经济带生态环境保护的法律法规及政策,促进了区域内的资源节约和环境保护[50],各地方政府在区域高质量一体化发展过程中形成“力争上游”的良性竞争关系[51],从而推动整个区域的水-能-碳耦合协调度提升.

表 7 空间杜宾模型参数估计结果

Table 7 Parameter estimates of the spatial durbin model

变量	(1) 水-能-碳	(2) 水-能	(3) 水-碳	(4) 能-碳
lnPGDP	0.025***	0.030***	0.035***	0.008*
	(0.004)	(0.005)	(0.005)	(0.005)
IND	0.011	0.030**	0.055***	−0.050***
	(0.011)	(0.014)	(0.013)	(0.013)
POP	−0.040	0.092	−0.087	−0.117*
	(0.057)	(0.069)	(0.066)	(0.068)
ER	0.074*	0.114**	0.044	0.061
	(0.043)	(0.053)	(0.051)	(0.052)
lnTEC	0.002***	0.005***	0.004***	−0.001
	(0.001)	(0.001)	(0.001)	(0.001)
INV	−0.060***	−0.039***	−0.077***	−0.061***
	(0.008)	(0.009)	(0.009)	(0.009)
NDVI	0.100***	0.126***	0.092***	0.082**
	(0.029)	(0.035)	(0.033)	(0.034)
wlnPGDP	0.048***	0.032***	0.018*	0.095***
	(0.009)	(0.010)	(0.010)	(0.010)
wIND	−0.076***	−0.107***	−0.097***	−0.022
	(0.018)	(0.022)	(0.021)	(0.022)
wPOP	0.041	0.197	−0.252	0.226
	(0.198)	(0.239)	(0.231)	(0.237)
wER	−0.161	0.106	−0.291	−0.286
	(0.175)	(0.211)	(0.204)	(0.210)
wlnTEC	−0.002	0.001	−0.004*	−0.004*
	(0.002)	(0.002)	(0.002)	(0.002)
wINV	−0.002	−0.001	0.044	−0.059**
	(0.024)	(0.029)	(0.028)	(0.030)
wNDVI	−0.025	−0.069	−0.026	0.009
	(0.044)	(0.053)	(0.051)	(0.053)
ρ	0.126***	0.295***	0.088**	0.155***
	(0.039)	(0.035)	(0.041)	(0.037)
N	95	95	95	95
Obs	1330	1330	1330	1330
R^2	0.659	0.747	0.527	0.433

注:括号内为标准误,*** P<0.01, ** P<0.05, * P<0.1,下同.

3.4 空间杜宾模型效应分解结果

由于空间滞后项反馈效应的存在,仅根据主效应和空间滞后项回归系数并不能直接反映解释变量对被解释变量的实际影响,回归系数显著性大小也不能反映影响是否真实存在,需要借助偏微分方法分解解释变量的直接效应与间接效应进行解释[52-53].其中,直接效应是某地解释变量对本地被解释变量的影响,间接效应是某地解释变量对其他地区被解释变量的影响,进而揭示和刻画本地及空间关联地区水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳的耦合协调影响因素的实际作用效果.表 8 展示了各解释变量的直接效应与间接效应.

经济发展水平对水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调的直接效应和间接效应均显著为正,显示出经济发展水平提升对于本地和空间关联地区的四类耦合协调度提升均具有促进作用.经济发展水平高的地区能够为本地水、能、碳的耦合协调提供更多的资金支持,也往往具有更强的辐射带动作用,其先进的技术和管理经验通过产业转移、技术扩散等方式影响周边地区[54],从而间接提升空间关联地区的耦合协调度.

产业结构升级对本地水-能-碳的直接效应为正但不显著,间接效应为负且在 1%的水平下显著,表明产业结构升级虽然可能对本地的水-能-碳耦合协调有一定的促进作用,但在区域层面一方面可能由于“竞争效应”造成资源虹吸削弱了其他城市的协调能力[55],另一方面被淘汰的高耗水、高耗能以及高排放产业转移到其他城市,加重了其他城市的资源环境负担[56],从而对周边地区的耦合协调产生不利影响.同时,产业结构升级对水-能、水-碳耦合协调直接效应均显著为正、间接效应显著为负,对能-碳的直接效应显著为负、间接效应为负但不显著,也显示出产业结构升级虽然能促进水-能、水-碳耦合协调度提升,但因此而产生的产业集聚带来的规模扩张和能源需求短期内依然可能带来较大的碳排放[57],从而对能-碳耦合协调度呈现负效应;对周边地区的资源竞争和环境压力转移也导致周边地区在水-能、水-碳耦合协调方面面临更大的挑战.

人口密度对水-能-碳、水-能、水-碳耦合协调的直接效应影响方向不一致且统计不显著,仅能-碳的直接效应在 10%水平上显著,表明人口密度增加

对本地能-碳的耦合协调度存在抑制作用.同时,四个间接效应均未通过显著性检验,说明人口密度的空间溢出效应不明显.

环境规制对水-能-碳、水-能耦合协调的直接效应显著为正,表明环境规制强度提升对推动水-能-碳、水-能耦合协调有重要的积极作用,但四个间接效应均未通过显著性检验,表明本地环境规制对经济联系的空间关联城市的溢出效应尚未显现,本地环境治理未能有效带动经济联系城市耦合协调度提升.

技术创新对水-能-碳、水-能、水-碳耦合协调的直接效应显著为正,表明技术进步能够在一定程度上提高水资源利用效率、能源利用效率以及碳减排技术的水平,对本地水-能-碳、水-能、水-碳耦合协调有直接促进作用但不存在空间溢出;同时,对本地能-碳耦合协调影响不显著,可能是由于研究期内能源领域绿色专利占同时期专利数量的比重较低,不足 6% [58],技术创新的碳解锁效应尚不显著.

固定资产投资对水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调的直接效应均显著为负,可能是由于水利、环境和公共设施管理业固定资产投资需要较集中的投入才能发挥作用,因而以基建为主的非低碳化粗放型投资可能通过挤占生态治理资源抑制耦合协调度提升[59],同时对能-碳耦合协调度的间接效应显著为负也提示其可能产生负向外溢,加剧其他城市的能-碳协调压力.

NDVI 指数对水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳的耦合协调的直接效应显著为正,植被覆盖提高通常意味着生态系统更加健康,能够对耦合协调产生正向作用.同时 NDVI 指数的间接效应均不显著,对经济联系的空间关联城市的耦合协调没有显著的溢出效应,可能是因为植被覆盖的改善主要集中在本地,生态效益外溢受地理边界限制,本地生态改善对耦合协调的影响未能显著辐射至其他城市.

表 8　影响因素的直接效应和间接效应估计

Table 8　Direct and indirect effects of determinants in the Spatial Durbin Model

变量	水-能-碳		水-能		水-碳		能-碳	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	直接效应	间接效应	直接效应	间接效应	直接效应	间接效应	直接效应	间接效应
lnPGDP	0.026***	0.056***	0.033***	0.054***	0.035***	0.021**	0.009*	0.097***
	(0.004)	(0.009)	(0.005)	(0.013)	(0.005)	(0.010)	(0.005)	(0.010)
IND	0.009	−0.081***	0.023*	−0.129***	0.053***	−0.096***	−0.050***	−0.021
	(0.011)	(0.020)	(0.013)	(0.029)	(0.013)	(0.022)	(0.013)	(0.022)
POP	−0.039	0.033	0.108*	0.290	−0.090	−0.280	−0.116*	0.218
	(0.054)	(0.213)	(0.064)	(0.307)	(0.063)	(0.236)	(0.065)	(0.237)
ER	0.074*	−0.161	0.130**	0.201	0.046	−0.295	0.065	−0.282
	(0.042)	(0.194)	(0.053)	(0.284)	(0.048)	(0.213)	(0.050)	(0.213)
lnTEC	0.003***	−0.002	0.005***	0.003	0.004***	−0.004	−0.001	−0.004
	(0.001)	(0.003)	(0.001)	(0.003)	(0.001)	(0.003)	(0.001)	(0.003)
INV	−0.060***	−0.011	−0.039***	−0.018	−0.076***	0.040	−0.061***	−0.063**
	(0.007)	(0.026)	(0.009)	(0.037)	(0.009)	(0.028)	(0.009)	(0.028)
NDVI	0.100***	−0.012	0.124***	−0.040	0.092***	−0.019	0.082**	0.014
	(0.029)	(0.046)	(0.035)	(0.064)	(0.034)	(0.052)	(0.036)	(0.052)

3.5　稳健性检验

首先,为检验模型对空间权重设定的敏感性,本文将基准回归中的经济距离矩阵替换为地理邻接矩阵重新估计空间杜宾模型结果,结果如表 9 列(1)~(4)显示,各解释变量的系数方向、量级、显著性与表 7 的基准回归结果基本一致,表明模型结果对矩阵选择不敏感,进一步验证了水-能-碳正向空间溢出的普适性以及影响机制具备稳健的经济与地理逻辑基础.值得注意的是,环境规制和技术创新的负向溢出效应显著性水平分别提升至 5%和 1%,一方面显示出二者的空间溢出效应相比城市之间的经济联系更依赖地理邻近区域的政策传递和要素流动,另一方面也显示出环境规制的污染避难所效应以及技术进步的资源虹吸效应可能会导致邻近地区水-能-碳耦合协调度降低[60].其次,由于上海市和重庆市作为直辖市在政策制度、资源禀赋、经济发展水平、技术创新实力等方

面具有特殊性,与一般地级市存在较大差异,为使研究样本更具可比性,本文进一步剔除这两个城市样本,进行稳健性检验,结果如表 9 列(5)−(8)所示,与基准回归结果高度一致,表明核心结论具有稳健性.

表 9 稳健性检验

Table 9 Robustness tests

变量	替换空间权重矩阵				剔除两个直辖市样本			
	(1)主效应	(2)空间项	(3)直接效应	(4)间接效应	(5)主效应	(6)空间项	(7)直接效应	(8)间接效应
lnPGDP	0.033***	0.019***	0.034***	0.027***	0.025***	0.052***	0.026***	0.061***
	(0.004)	(0.005)	(0.004)	(0.005)	(0.004)	(0.008)	(0.004)	(0.009)
IND	0.012	−0.055***	0.009	−0.057***	0.004	−0.064***	0.002	−0.069***
	(0.012)	(0.018)	(0.012)	(0.019)	(0.011)	(0.018)	(0.011)	(0.020)
POP	−0.0921	0.060	−0.090*	0.0451	−0.025	0.236	−0.018	0.253
	(0.0564)	(0.116)	(0.054)	(0.128)	(0.066)	(0.200)	(0.063)	(0.215)
ER	0.0738*	−0.157**	0.073*	−0.158**	0.072*	−0.129	0.073*	−0.126
	(0.044)	(0.067)	(0.042)	(0.076)	(0.043)	(0.173)	(0.042)	(0.193)
lnTEC	0.005***	−0.010***	0.005***	−0.010***	0.003***	−0.002	0.003***	−0.002
	(0.001)	(0.001)	(0.001)	(0.002)	(0.001)	(0.002)	(0.001)	(0.002)
INV	−0.066***	−0.019	−0.067***	−0.035***	−0.082***	0.010	−0.082***	−0.002
	(0.007)	(0.012)	(0.007)	(0.013)	(0.012)	(0.026)	(0.011)	(0.026)
NDVI	0.090***	−0.019	0.091***	−0.002	0.091***	−0.017	0.091***	−0.004
	(0.034)	(0.048)	(0.034)	(0.049)	(0.029)	(0.044)	(0.029)	(0.046)
ρ	0.177***				0.130***			
	(0.041)				(0.039)			
N	95				93			
Obs	1330				1302			
R^2	0.624				0.671			

3.6 讨论

从耦合协调度结果来看,2006~2019 年长江经济带 95 个地级及以上城市的水−能−碳、水−能、水−碳、能−碳耦合协调度均呈现上升趋势,这与已有研究中呼包鄂榆城市群[6]、海河流域[5]、黄河流域[18]以及长江经济带[29]省级层面结果相似,显示出国家层面最严格水资源管理制度、节能减排政策的实施和推广对不同区域的资源利用和环境治理均产生了积极影响,推动了水、能、碳的协调发展.不同于黄河流域省级工业水−能−碳耦合协调度的 Moran's I 在所有典型年份均未能通过 5%水平的显著性检验,且数值上正负结果交替,没有表现出空间相关性呈随机分布[26],本文城市样本的四类耦合协调度的 Moran's I 数值虽然存在一定波动,但仍呈现较为稳定显著的正向空间自相关性,一定程度上显示出长江经济带区域内的协同发展和示范效应相对黄河流域更加显著.

在影响因素分析方面,本文考虑到水、能、碳的空间关联采用空间杜宾模型进行影响因素探究,在以往经济发展水平、产业结构、人口规模、投资规模等变量的基础上纳入了环境规制、技术创新、生态状况等变量探究其作用影响,验证我国生态环境保护和科技创新成效在促进城市水−能−碳耦合协调关系方面的作用效果,但相比经济联系的关联城市,环境规制和技术创新的提升会对邻近城市存在更显著的负向溢出效应,提示着在促进水−能−碳耦合协调方面,本地环境规制强度提升可能会导致高耗水、高耗能、高碳排放的产业转向邻近环境规制强度低的城市,产生污染避难所效应,出现以邻为壑的局面[61];本地区技术创新水平提升吸引了周边邻近地区资金投入、高端人才、先进设备和理念等创新要素流入本地区,降低了邻近地区的创新活跃性,绿色技术壁垒的存在也在一定程度上加剧了邻近地区的协调难度,限制了技术创新的空间溢出效应[62].

结合具体城市来看,上海市、苏州市、重庆市长期低于良好协调等级并非单一指标异常所致,而是受制于多维因素的共同影响,仅依靠经济增长与产业升级难以显著改善城市协调水平,需同步推进绿色技术创新、环境政策统筹与区域协调治理.上海市

虽然经济发展居全国前列,但长期资源输入型结构、高能耗高碳排压力限制了经济发展带动协调提升的效应释放.苏州市承接了上海市大部分向江苏省的产业转移,其自身产业结构升级也伴随资源要素高度集聚与规模扩张,短期内可能加剧能耗和碳排放,并产生区域负外部性[63].尽管上海市与重庆市均已出台节水、节能、减排专项条例、规划,但目标碎片化和缺乏区域协调机制使其政策效应难以有效辐射周边城市,也影响了区域耦合协调整体提升[64].

3.7　政策启示

系统识别区域内水-能-碳可调控点,在合理设置城市双控目标基础上,推动碳排放政策与既有水资源、能源管控政策协同发力,加强不同环境要素管理部门决策协调,推动各类管控目标在实施周期、约束力度与考核节点上的有效衔接,并结合区域梯度演化规律实施差异化政策,东部考核重点向多元协同优化倾斜,中西部先聚焦水资源和能源高效利用以及碳减排考核指标,再逐步过渡至多元协同.

综合调整区域产业结构、投资引导与技术共享,着力破解负向溢出.增设区域绿色准入与生态补偿机制,明确各产业的资源消耗与排放阈值,制定区域统一的高耗水高耗能以及高排放产业准入清单,遏制盲目无序转移;加强投资项目节水节能审查与碳排放评价,抑制固定资产投资过度扩张;建立区域绿色低碳技术清单、设立联合技术攻关项目,推动区域内节水节能、碳减排等技术共享,打破行政分割与技术壁垒.

发挥优质协调城市示范作用,以耦合协调度提升具有先导性的城市为支点构建区域联动网络,按东部连片核心区-中西部节点城市圈划分协同单元,明确基础指标达标-多元协同试点-全域推广的三阶段任务,形成核心引领-周边跟进的梯度提升模式,推动全域耦合协调水平从点上突破迈向面上共进.

分类施策长期低于良好协调等级的城市,靶向突破耦合协调提升瓶颈.资源输入型城市需发展多元要素绿色协同技术,降低对外源资源依赖;工业聚集型城市需对接区域绿色准入门槛和生态补偿标准,防止污染外溢;高碳基底型城市需加速能源结构转型和绿色投资引导,可设立绿色基础设施专项基金,推动固定资产投资向低碳领域倾斜.

本文也存在一定局限性:第一,目前从政策出发由总量和强度两个维度构建水、能、碳评价指标,未来可以从城市水、能、碳实际相互作用的情况出发扩充指标构建;第二,目前影响因素的探究重点呈现其对本地和空间关联城市的影响差异,未来还可以进一步分析影响因素空间效应的长期和短期作用.

4　结论

4.1　时间趋势方面

长江经济带 2006~2019 年城市水-能-碳、水-能、水-碳、能-碳耦合协调度数值在 0.6724~0.9987 区间范围内变化,呈现初级、中级、良好和优质协调四种等级,中位数和均值整体呈上升趋势,城市间差异逐步缩小,呈现趋同与极化并存的特征.自 2014 年起,每年均有 75%以上的城市达到优质协调等级.

4.2　空间分布方面

四类耦合协调度均存在显著的正向空间聚集(Moran's I>0).除能-碳在初始年份就出现较高比例的优质协调且在东、中、西部广泛分布之外,其他三类耦合协调处于优质协调等级城市均由初始的零散分布逐渐演变为大范围连片式的空间分布格局.

4.3　空间依赖性方面

四类耦合协调的空间自相关系数 ρ 均显著为正,存在显著的正向空间溢出效应,本地自身耦合协调度提升能够对空间关联城市的耦合协调改善产生积极影响,形成区域协同效应.

4.4　影响因素的直接效应方面

经济发展水平和 NDVI 提升能够显著促进本地四类耦合协调;环境规制强度提升能够促进本地水-能-碳、水-能耦合协调;技术创新能够促进本地水-能-碳、水-能、水-碳耦合协调;固定资产投资会显著抑制本地四类耦合协调.

4.5　影响因素的间接效应方面

产业结构升级带来的资源竞争以及环境压力转移对空间关联城市的四类耦合协调产生负面影响;相比经济关联城市,环境规制和技术创新对地理邻近城市水-能-碳耦合协调的负向空间溢出效应更显著,体现污染避难所效应和技术壁垒效应.

参考文献:

[1] Zhang Y Y, Yang Y. Can the resource and environmental dilemma due to water-energy-carbon constraints be solved in the process of new urbanization? [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,114:105748.

[2] Wang X C, Klemeš J J, Ouyang X, et al. Regional embodied Water-Energy-Carbon efficiency of China [J]. Energy, 2021,224:120159.

[3] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等.“四水四定”水资源管控理论研究进展 [J]. 水资源保护, 2023,39(4):111-117.
Wang R Y, Zhao Z X, Huang C S, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023,39(4):111-117.

[4] 姜春海,闫振好,王 敏.“双碳”目标约束下的能耗双控到碳排放双控:规制工具、效应模拟与政策评价 [J]. 中国工业经济, 2024,(11):5-23.
Jiang C H, Yan Z H, Wang M.From dual control of energy consumption to dual control of carbon emissions under the constraints of carbon peaking and carbon neutrality goals: Regulatory tools, effect simulation and policy evaluation [J]. China Industrial Economics, 2024,(11):5-23.

[5] 李情情,曹永强,王 菲,等.海河流域水-能-碳系统耦合协调发展及驱动因素研究 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024,45(6):20-31,40.
Li Q Q, Cao Y Q, Wang F, et al. Study on the coupling coordination development and driving factors of water-energy-carbon system in the Haihe River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024,45(6):20-31,40.

[6] 杨 屹,张园园.呼包鄂榆资源型城市群“水-能-碳”耦合变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6212-6224.
Yang Y, Zhang Y Y. Analysis of the coupling process and the influencing factors of the “water-energy-carbon” relationship in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin resource-based urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):6212-6224.

[7] Xu, Z C, Chen, X Z, Liu, J G, et al. Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO_2 nexus across metacoupled systems [J]. Nature Communications, 2020,11:5837.

[8] 王红瑞,李晓军,张 力,等.水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023,21(1):13-21.
Wang H R, Li X J, Zhang L, et al. Research progress and the prospect of a complex relationship between water-energy-carbon emission [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023,21(1):13-21.

[9] Liu X L, Vu D, Perera S C, et al. Nexus between water-energy-carbon footprint network: Multiregional input-output and coupling coordination degree analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 430:139639.

[10] 赵荣钦,姬宇飞,冯 薇,等.基于土地利用的水—能—碳关联研究:理论框架与关键问题 [J]. 中国土地科学, 2024,38(8):97-108.
Zhao R Q, Ji Y F, Feng W, et al. Research on water-energy-carbon nexus of land use: Theoretical framework and key issues [J]. China Land Science, 2024,38(8):97-108.

[11] Zhao Y H, Shi Q L, Li H, et al. Simulating the economic and environmental effects of integrated policies in energy-carbon-water nexus of China [J]. Energy, 2022,238:121783.

[12] Xiang W Q, Yang X H, Bian D H, et al. Evaluation and prediction of water-energy-carbon nexus efficiency in China based on a new multiregional input-output perspective [J]. Journal of Environmental Management, 2023,339:117786.

[13] Su Q, Dai H C, Xie S Y, et al. Water-energy-carbon nexus: Greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems in China [J]. Environmental Science & Technology, 2023,57(5):2093-2104.

[14] Ma X T, Zhang T Z, Shen X Q, et al. Environmental footprint assessment of China's ceramic tile production from energy-carbon-water nexus insight [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,337:130606.

[15] Ren H R, Liu B, Zhang Z R, et al. A water-energy-food-carbon nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yellow River Basin under uncertainty [J]. Applied Energy, 2022,326:120008.

[16] Zhu R M, Zhao R Q, Li X J, et al. The impact of irrigation modes on agricultural water-energy carbon nexus [J]. Science of the Total Environment, 2023,860:160493.

[17] Wang X C, Klemeš J J, Wang Y T, et al. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: An environmental input-output model-based approach [J]. Applied Energy, 2020,261:114431.

[18] Sun K, Han J M, Wu Q R, et al. The coupling coordination and spatiotemporal evolution of industrial water-energy-CO_2 in the Yellow River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2024,912:169012.

[19] 王志强,姜文桓,卢诗月.基于生态网络分析的新疆“水-能-碳”耦合系统特征研究 [J]. 干旱区地理, 2023,46(12):2005-2016.
Wang Z Q, Jiang W H, Lu S Y. Characteristics of “water-energy-carbon” coupling system in Xinjiang based on the ecological network analysis [J]. Arid Land Geography, 2023,46(12):2005-2016.

[20] 杨传明.中国产业水-能-碳三维全足迹立体关联研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2333-2345.
Yang C M. Research on three-dimensional full footprint stereoscopic correlation of water energy carbon in Chinese industries [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2333-2345.

[21] 彭智敏,吴晗晗.长江经济带能源消费、生态环境污染与产业转型升级 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(8):1694-1704.
Peng Z M, Wu H H.Energy consumption, eco-environmental pollution and industrial restructuring and upgrading in Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8):1694-1704.

[22] 林明裕,崔兴华.碳排放绩效的空间关联网络结构及其形成机制——以长江经济带为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2867-2878.
Lin M Y, Cui X H.The spatial correlation network structure and formation mechanism of carbon emission performance: A case study of the Yangtze River Economic Belt [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2867-2878.

[23] 李海生,王丽婧,张泽乾,等.长江生态环境协同治理的理论思考与实践 [J]. 环境工程技术学报, 2021,11(3):409-417.
Li H S, Wang L J, Zhang Z Q, et al. Theoretical thought and practice of eco-environment synergistic management in the Yangtze River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021,11(3):409-417.

[24] 潘为华,贺正楚,潘红玉.中国数字经济发展的时空演化和分布动态 [J]. 中国软科学, 2021,(10):137-147.
Pan W H, He Z C, Pan H Y.Research on spatiotemporal evolution and distribution dynamics of digital economy development in China [J]. China Soft Science, 2021,(10):137-147.

[25] 肖沁霖,肖黎明.绿色创新效率与生态治理绩效耦合协调的时空分

异及响应——以长江经济带 108 个城市为例 [J]. 世界地理研究, 2022,31(1):96-106.
Xiao Q L, Xiao L M. Spatio-temporal differentiation and response of coupling and coordination between greeninnovation efficiency and ecological governance performance——A case of 108cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. World Regional Studies, 2022,31(1):96-106.

[26] 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.
Wang S J, Kong W, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(3):793-810.

[27] 张中浩,聂甜甜,高　阳,等.长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(5):1086-1100.
Zhang Z H, Nie T T, Gao Y, et al. Study on temporal and spatial characteristics of coupling coordination correlation betweenecosystem services and economic-social development in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(5):1086-1100.

[28] 刘玨玨,刘书芳.长江经济带生态保护与高质量发展耦合协调的时空演变及障碍因子 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2025,58(1):20-32.
Liu H H, Liu S F. Spatio-temporal evolution and obstacle factors of coupling coordination between ecologicalprotection and high-quality development in the Yangtze River Economic Belt [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2025,58(1):20-32.

[29] 袁　亮,程　娟,何伟军,等.长江经济带“水-能-碳”系统适应性评价及空间关联特征 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(6):187-199.
Yuan L, Cheng J, He W J, et al. Evaluation of “water-energy-carbon” system adaptability and characterization of spatial correlation in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Population, Resources and Environment, 2024,34(6):187-199.

[30] 张　桅,胡　艳.长三角地区创新型人力资本对绿色全要素生产率的影响——基于空间杜宾模型的实证分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020,30(9):106-120.
Zhang Z, Hu Y. The effect of innovative human capital on green total factor productivity in the Yangtze RiverDelta: An empirical analysis based on the spatial Durbin model [J]. China Population,Resources and Environment, 2020,30(9):106-120.

[31] Venkatesh G, Chan A, Brattebø H. Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: Comparison of four city case studies and the relevant influencing factors [J]. Energy, 2014, 75:153-166.

[32] 李成宇,张士强.中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020,30(1):120-128.
Li C Y, Zhang S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research [J]. China Population, Resources and Environment, 2020,30(1):120-128.

[33] Zhu B S, Guo R, Tang Y E, et al. Upgrading the industrial structure for optimizing water-energy-carbon nexus in regional trade network [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,469:143231.

[34] 李　成,杨舒慧,吴　芳,等.“双碳”背景下中国能源消费碳排放与植被固碳的时空分异 [J]. 中国环境科学, 2022,42(18):7470-7483.
Li C, Yang S H, Wu F, et al. Spatio-temporal patterns of CO_2 emissions from energy consumption and vegetation carbonsequestration in China under the emission peak and carbon neutrality [J]. China Environmental Science, 2022,42(4):1945-1953.

[35] 宋　洋,贺灿飞,Yeung Godfrey,等.中国资源型城市产业结构升级对土地利用效率的影响 [J]. 地理研究, 2023,42(1):86-105.
Song Y, He C F, Yeung G, et al. Industrial structure upgrading and urban land use efficiency: Evidence from 115resource-based cities in China, 2000~2019 [J]. Geographical Research, 2023,42(1):86-105.

[36] 陈诗一,陈登科.雾霾污染、政府治理与经济高质量发展 [J]. 经济研究, 2018,53(2):20-34.
Chen S Y, Chen D K. Air pollution, government regulations and high-quality economic development [J]. Economic Research Journal, 2018,53(2):20-34.

[37] 李　佳,闵　悦.中欧班列开通是否促进了区域创新——来自中国285 个地级市的经验研究 [J]. 南开经济研究, 2021,(5):219-239.
Li J, Min Y.Has the launching of CR-Express promoted regional innovation? An empirical study based on 285 prefecture level cities in China [J]. Nankai Economic Studies, 2021,(5):219-239.

[38] Jiang L G, Liu Y, Wu S, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107933.

[39] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, et al. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992~2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022,60:4407714.

[40] 吴健生,牛　妍,彭　建,等.基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995~2009 年中国地级市能源消费动态 [J]. 地理研究, 2014,33(4):625-634.
Wu J S, Niu Y, Peng J, et al. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS Nighttime Light [J]. Geographical Research, 2014,33(4):625-634.

[41] 史　丹,李少林.排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证 [J]. 中国工业经济, 2020,(9):5-23.
Shi D, Li S L.Emissions trading system and energy use efficiency——Measurements and empirical evidence for cities at and above the prefecture level. [J]. China Industrial Economics, 2020,(9):5-23.

[42] Yang X C, Yi S J, Qu S, et al. Key transmission sectors of energy-water-carbon nexus pressures in Shanghai, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,225:27-35.

[43] 靳婷婷,段学军,邹　辉.江苏省制造业能源效率与结构高级度耦合分析 [J]. 中国科学院大学学报, 2023,40(1):59-68.
Jin T T, Duan X J, Zou H.Coupling analysis of energy efficiency and structural upgrade of manufacturing in Jiangsu Province [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023,40(1):59-68.

[44] 吴浩云,刘　敏,金　科,等.多目标驱动的太湖调度水位研究 [J]. 湖泊科学, 2023,35(3):1009-1021.
Wu H Y, Liu M, Jin K, et al. Research on multi-objective driven dispatching water level of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(3):1009-1021.

[45] 宋继鹏,程　先,刘秀华.基于水足迹理论的重庆市水资源利用时空分析与评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022,44(11):166-178.
Song J P, Cheng X, Liu X H. Spatio-temporal analysis and evaluation of water resources utilization in Chongqing based onwater footprint theory [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022,44(11):166-178.

[46] 韦彦汀,李思佳,张　华.成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4807-4816.

Wei Y T, Li S J, Zhang H. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4807-4816.

[47] 陈 欢,牟 瑛."双碳"目标下重庆市碳排放影响因素及其预测研究 [J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023,40(2):7-14.
Chen H, Mu Y.Research on the Influencing Factors and Forecasting of Carbon Emissions in Chongqingunder the "Double Carbon" Target [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023,40(2):7-14.

[48] 姜 磊.空间回归模型选择的反思 [J]. 统计与信息论坛, 2016, 31(10):10-16.
Jiang L. The choice of spatial econometric models reconsidered in empirical studies [J]. Journal of Statistics and Information, 2016, 31(10):10-16.

[49] 刘伟明,王 明,吴志军,等.长江经济带环境质量和经济增长的双向互动关系及空间分异 [J]. 经济地理, 2022,42(4):54-64.
Liu W M, Wang M, Wu Z J, et al. Bilateral interaction and spatial differentiation between environmental quality and economic growth in the Yangtze River Economic Belt [J]. Economic Geography, 2022, 42(4):54-64.

[50] 肖芬蓉,王维平.长江经济带生态环境治理政策差异与区域政策协同机制的构建 [J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2020,26(4):27-37.
Xiao F R, Wang W P. The policy difference of environmental governance of the Yangtze River Economic Belt and building a collaborative mechanism among the region [J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2020,26(4):27-37.

[51] 邵 帅,范美婷,杨莉莉.经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察 [J]. 管理世界, 2022,38(2):46-69,4-10.
Shao S, Fan M T, Yang LL.Economic restructuring, green technical progress, and low-carbon transition development in China: An empirical investigation based on the overall technology frontier and spatial spillover effect [J]. Journal of Management World, 2022, 38(2):46-69,4-10.

[52] 伏润得,杨振山.中国城市区域高质量发展时空分异及影响因素 [J]. 地理学报, 2024,79(4):819-836.
Fu R D, Yang Z S. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of high-quality development of cities in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2024,79(4):819-836.

[53] LeSage J, Pace R K. Introduction to spatial econometrics [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.

[54] 邱思远,孙 伟.中国城市群一体化水平测度与辐射能力分析 [J]. 地理研究, 2024,43(2):303-321.
Qiu S Y, Sun W. Measuring integrative level and analysis of radiative capacity in China's urban agglomerations [J]. Geographical Research, 2024,43(2):303-321.

[55] 尹 勇,苏欣怡,谢晓琪.产业结构升级对市域经济韧性的空间效应 [J]. 经济地理, 2023,43(8):86-92,112.
Yin Y, Su X Y, Xie X Q. The spatial effect of industrial structure upgrading on urban economic resilience. [J]. Economic Geography, 2023,43(8):86-92,112.

[56] 侯 建,常青山,陈建成,等.环境规制视角下制造业绿色转型对能源强度的影响 [J]. 中国环境科学, 2020,40(9):4155-4166.
Hou J, Chang Q S, Chen J C, et al. The impact of green transformation of manufacturing industry on energy intensity: The perspective of environmental regulation [J]. China Environmental Science, 2020, 40(9):4155-4166.

[57] 付 奎,张 杰,刘炳荣.产业转型政策能否推动城市低碳转型——来自资源型和老工业城市产业转型升级示范区的证据 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2590-2600.
Fu K, Zhang J, Liu B R.Can industrial transformation policies promote urban low-carbon transformation?——Evidences from demonstration zones of industrial transformation and updating [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2590-2600.

[58] 谢其军,苏 竣,汝 鹏,等.绿色创新合作的技术分布、主要模式及网络演化研究——以 294 个地级市以上城市能源领域为例 [J]. 科学学与科学技术管理, 2024,45(12):74-87.
Xie Q J, Su J, Ru P, et al. Research on technology distribution, main patterns and network evolution of green innovation collaboration: Based on the energy field of 294 cities above the prefecture level [J]. Science of Science and Management of S.& T., 2024,45(12):74-87.

[59] 钟茂初,王玉爽."双碳"目标下固定资产投资的转型方向研究——基于"稳增长"视角 [J]. 上海经济研究, 2022,(12):75-92.
Zhong M C, Wang Y S. Research on the transformation direction of fixed asset investment under the "Dual Carbon" goals——Based on the perspective of "Steady Growth" [J]. Shanghai Journal of Economics, 2022,(12):75-92.

[60] 何寿奎,帅昕言.环境规制赋能长江经济带水资源-社会经济协调发展 [J]. 人民长江, 2024,55(9):44-50.
He S K, Shuai X Y. Research on empowering coordinated development of "water resources-social economy" in Yangtze River Economic Belt through environmental regulation [J]. Yangtze River, 2024,55(9):44-50.

[61] 曾 冰,陈彦均,韩加林.产业转移能否实现经济与低碳协同发展——基于国家级承接产业转移示范区的碳减排效应视角 [J]. 财经科学, 2024,(8):104-115.
Zeng B, Chen Y J, Han J L.Whether industrial transfer can achieve synergistic development of economy and low Carbon —— A perspective based on the carbon emission reduction effect of national-level demonstration zones for receiving industries [J]. Finance & Economics, 2024,(8):104-115.

[62] 王晶晶,程 钰.黄河流域技术创新对 $PM_{2.5}$ 的影响及其空间溢出效应 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(9):108-118.
Wang J J, Cheng Y. Impact of technological innovation on $PM_{2.5}$ and its spatial spillover effect in the Yellow River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(9):108-118.

[63] 黄徐亮,徐海东,倪鹏飞,等.长三角地区产业转移特征及其影响因素 [J]. 经济地理, 2023,43(1):124-132.
Huang X L, Xu H D, Ni P F, et al. Characteristics and influencing factors of industrial transfer in Yangtze River Delta [J]. Economic Geography, 2023,43(1):124-132.

[64] 朱艳丽.长江流域协调机制创新性落实的法律路径研究 [J]. 中国软科学, 2021,(6):91-102.
Zhu Y L. On legal path of the innovative implementation of the coordination mechanism in the Yangtze River Basin [J]. China Soft Science, 2021,(6):91-102.

作者简介: 蒋艺璇(1998-),女,湖北襄阳人,博士研究生,主要从事环境经济与管理研究.发表论文 4 篇.jiangyixuan0423@ruc.edu.cn.