

# 长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调的时空演化及驱动因素分析

刘亦文<sup>1</sup>, 魏萍萍<sup>2</sup>, 文章<sup>3,4\*</sup>

1. 湖南工商大学国际商学院, 湖南长沙 410205
2. 湖南工商大学资源环境学院, 湖南长沙 410205
3. 湖南工商大学法学院, 湖南长沙 410205
4. 湖南师范大学马克思主义学院, 湖南长沙 410081

**摘要:** 长江经济带是我国区域协调发展和生态文明建设的战略核心区,但其人口、土地、水资源与产业发展之间存在突出的结构性矛盾,制约其高质量可持续发展。基于2007—2023年长江经济带108个地级及以上城市的面板数据,构建“人-地-水-业”四位一体的综合评价指标体系,综合运用熵权TOPSIS法、修正的耦合协调度模型、地理探测器及障碍度模型,系统揭示长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调的时空演化特征及驱动因素。结果表明:①2007—2023年长江经济带“人-地-水-业”系统发展水平逐年提高,发展指数年均增长率为4.49%,但各子系统发展水平异质性显著且存在空间分布非均衡性,其中人子系统形成以改善居民生活质量为目标的内生发展动力,且其发展优势高度集聚于长三角区域。②长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调水平稳步提升,但存在明显的区域异质性和群际分化特征。③水子系统发展滞后是制约“人-地-水-业”系统协调演进的关键因素,在剔除水子系统后的“人-地-业”三元系统下,各城市的耦合协调等级概率分布更为聚集且以上升为主,等级上升比例高达95.37%。④社会和经济因素是长江经济带“人-地-水-业”系统协调发展的主要内生驱动力,其中科技创新、经济活跃度和居民可支配收入的解释力分别达40.5234%、38.5958%和34.3657%。此外,50%的内部驱动因子的平均解释能力超过20%。研究显示,长江经济带“人-地-水-业”系统发展水平和耦合协调度均稳定提升,其中,发展指数年均增长率达4.49%。但系统发展和协调提升进程中表现出明显的内部异质性和空间非均衡性,如空间上呈现“上游引领、中游追赶、下游滞后且波动”的分布格局,水子系统的发展滞后且制约效应显著。

**关键词:** 长江经济带;“人-地-水-业”系统;时空演化;驱动因素

中图分类号: X321

文章编号: 1001-6929(2026)05-1051-14

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2026.03.05

## Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of the Coupled Coordination of the 'Population-Land-Water-Industry' System in the Yangtze River Economic Belt

LIU Yiwen<sup>1</sup>, WEI Pingping<sup>2</sup>, WEN Zhang<sup>3,4\*</sup>

1. International Business School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China
2. School of Resource & Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China
3. Law School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China
4. College of Marxism, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

**Abstract:** The Yangtze River Economic Belt (YREB) is a strategic core region for China's regional coordinated development and ecological civilization construction. However, significant structural contradictions among population, land, water resources, and industrial development constrain its high-quality and sustainable development. Based on panel data from 108 prefecture-level and above cities in the

收稿日期: 2026-01-03 修订日期: 2026-03-04

作者简介: 刘亦文(1981-),男,湖南攸县人,教授,博士,主要从事能源与气候政策综合集成分析方法及应用研究, [ewen\\_lau@163.com](mailto:ewen_lau@163.com)

\* 责任作者: 文章(1986-),女,湖南华容人,讲师,硕士,主要从事环境司法与生态文明、高校思想政治教育研究, [844056036@qq.com](mailto:844056036@qq.com)

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目(No.2025JJ50469);长沙市自然科学基金面上项目(No.kq2402104);湖南省教育厅科学研究重点项目(No.25A0446)

Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province, China (No.2025JJ50469); Natural Science Foundation of Changsha City, China (No.kq2402104); Key Scientific Research Project of Hunan Provincial Department of Education, China (No.25A0446)

YREB from 2007 to 2023, this study constructs a comprehensive evaluation index system integrating ‘population-land-water-industry’ (PLWI) subsystems. Using the entropy-weighted TOPSIS method, a modified coupling coordination degree model, the geographical detector, and the obstacle degree model, the study systematically examines the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the coupled coordination of the PLWI system in the YREB. The results indicate that: (1) From 2007 to 2023, the overall development level of the PLWI system in the YREB increased steadily, with an average annual growth rate of 4.49% in the development index. However, the development levels of individual subsystems exhibit significant heterogeneity and spatial imbalance. Among them, the population subsystem forms an endogenous development momentum aimed at improving residents’ quality of life, with its developmental advantages highly concentrated in the Yangtze River Delta region. (2) The coupling coordination level of the PLWI system improved steadily during the study period, but significant regional heterogeneity and intergroup differentiation remain. (3) The lagging development of the water subsystem is the key factor constraining the coordinated evolution of the PLWI system. After removing the water subsystem and analyzing the ‘population-land-industry’ subsystem, the probability distribution of cities across coupling coordination levels becomes more concentrated and generally upward, with 95.37% of cities experiencing an increase in coordination level. (4) Social and economic factors are the main endogenous drivers of coordinated development in the PLWI system. Among them, technological innovation, economic vitality, and residents’ disposable income show explanatory powers of 40.5234%, 38.5958%, and 34.3657%, respectively. In addition, half of the internal driving factors exhibit an average explanatory power exceeding 20%. The study demonstrates that both the development level and coupling coordination degree of the PLWI system in the YREB have steadily improved, with an average annual growth rate of 4.49% in the development index. However, the process of development and coordination improvement shows significant internal heterogeneity and spatial imbalance, characterized by a spatial pattern of ‘upstream leadership, midstream catch-up, and downstream lag with fluctuations.’ In particular, the lagging development of the water subsystem plays a significant constraining role in the overall coordinated development of the system.

**Keywords:** the Yangtze River Economic Belt; ‘population-land-water-industry’ system; spatiotemporal evolution; driving factors

长江经济带作为横贯我国东、中、西部的“黄金水道”，是推动区域协调发展、优化国土空间布局、实现高质量发展的重要支撑。然而，在实现经济社会全面绿色转型、“双碳”目标及新型城镇化等多重目标过程中，该区域发展面临“不协调、不平衡”的突出挑战。例如，长三角地区以不足 4% 的国土面积，集聚了全国约 17% (超过 2.38 亿) 的人口，人地矛盾持续加剧<sup>[1]</sup>；水资源时空演变特征显著，部分地区出现资源型短缺与水质型短缺并存的严峻态势<sup>[2]</sup>；产业发展水平差异较大、区域间结构性矛盾较为突出<sup>[3]</sup>。人口集聚、土地利用、水资源配置与产业布局之间日益凸显的空间结构性冲突，不仅削弱区域整体竞争力，也严重制约长江经济带的可持续发展。在生态环境退化和自然资源约束双重压力下，必须系统审视人口增长、资源消耗与经济发展之间的复合效应，深入揭示各子系统间的内在关联与交互机制。这不仅有助于科学制定统筹人口、资源与环境关系的综合性政策，也能够为优化重大生产力布局、培育重点区域增长极提供理论依据和实践指引。

经济-社会-环境系统 (ESE) 具有复杂性、非线性和不确定性等特征<sup>[4]</sup>。人口、土地、水资源及产业共同构成“人-地-水-业”系统，各要素作为相对独立的子系统，彼此间存在非线性关联。系统整体的协调发展水平及其演变规律难以通过单一子系统全面揭

示。因此，开展长江经济带“人-地-水-业”系统的耦合协调关系研究，旨在探明人口增长与发展、土地开发、水资源约束与产业升级之间的内在反馈逻辑及动态演化规律。学术界对人、地、水、业关系的研究主要从两个层面展开：一是聚焦双系统或三元系统探讨四要素内部的相互作用；二是将四要素中的一个或多个，与气候、能源、碳等广泛的全球性问题要素进行耦合研究。基于双系统的四要素间关系研究，主要聚焦“人-地”系统和“人-水”系统。“人-地”系统方面，人类对土地的开发利用在过去的 1.2 万年持续进行<sup>[5]</sup>；“人-地”系统之间关系显著，产业结构、财政投入、城镇化率等是影响其耦合协调度的主要因素<sup>[6-7]</sup>。在保障自然系统安全稳定的基础上，“人-地”系统的协调发展应该更强调人类社会的公平和福祉<sup>[8-10]</sup>。“人-水”系统方面，认识到水资源管理的系统性和多维度性，更侧重多过程耦合<sup>[11]</sup>；关注到人文系统和水系统间的相互作用，并进一步发现“人-水”系统的高耦合协调水平能够促进绿色流域高质量发展<sup>[12]</sup>；子系统的构建主要涵盖人口、农业、城市建设等方面<sup>[13]</sup>，对土地利用和产业结构的探讨不足。基于三元系统的四要素间关系研究，主要围绕“人-地-业”系统和“人-地-水”系统展开。其中，“人-地-业”系统侧重探讨人口、区域城镇化及经济高质量发展与地子系统之间的耦合协调关系<sup>[14-17]</sup>，且人子系

统主要关注人口规模和结构维度。产业作为高水平城镇化和高质量经济发展的核心引擎<sup>[18]</sup>,其集约型发展离不开水子系统协调发展的有力支撑<sup>[19]</sup>。“人-地-水”系统的耦合协调关系研究发现,产业结构升级对“人-地-水”三元系统的整体耦合协调度提升具有重要影响<sup>[20]</sup>。这表明“人-地-业”或“人-地-水”三元系统的耦合协调研究均无法深刻揭示区域内人、地、水、业四要素整体协调发展的内在演变规律。此外,已有研究普遍选用地和水两大要素与能源、粮食、碳等要素进行耦合研究。研究表明,长江经济带“水-能源-粮食-生态”四元系统 2005—2020 年间脆弱性呈波动上升态势,经济发展水平和人口密度会加快系统脆弱性,而产业结构和技术进步则抑制系统脆弱性<sup>[2]</sup>;“水-能-碳”三元系统耦合协调关系随时间变化明显改善,且呈现正向空间聚集和显著的正向空间溢出效应<sup>[21]</sup>;“水-能-粮”三元系统 2012—2022 年间安全程度由比较安全上升至安全,空间上表现出高值区从上游向下游的扩张趋势<sup>[22]</sup>。

总体而言,将人、地、水、业四要素置于不同的二元或三元系统的研究发现能够为后续的研究奠定良好的基础,但却难以整体审视“人-地-水-业”系统的耦合协调关系及其子系统间的相互作用。基于此,本研究可能的边际贡献在于:①在理论分析上突破将四要素仅置于二元或三元系统研究的局限,构建“人-地-水-业”四元系统综合分析框架。依据分析框架,形成“人-地-水-业”系统指标体系,并根据该指标体系对四元系统的综合发展及耦合协调水平进行评价。②基于城市尺度深入揭示“人-地-水-业”关系的复杂性和作用机理,进一步丰富城市层面四要素关系的研究成果,推动区域协同治理策略的精准应用。现有区域层面的研究多聚焦于省级尺度,对城市层面的研究相对局限,而城市作为新型城镇化和经济发展的基本空间单元,又是土地利用和水资源消耗的集中地域,极易引发“人-地-水-业”系统关系失调和发展失衡问题。将研究视角聚焦于城市,能够更精细地揭示四元系统存在失调的微观驱动因素和空间异质性。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

长江经济带覆盖 11 个省市,总面积约 205.23 万 km<sup>2</sup>。该区域承载着优越的资源禀赋与扎实的产业基础,是我国推动经济高质量发展与生态高水平保护的战略核心区。鉴于我国区域发展的不均衡性及长江经济带内部的异质性特征,依据长江流域自然地理条件与行政区划,将研究区域划分为上游、中游和下游三大

子区域(见表 1),为全面揭示“人-地-水-业”系统及其子系统的发展水平、耦合协调程度和时空演变规律提供分析基础。以长江经济带地级及以上城市为研究对象,由于部分城市数据缺失较为严重,为保障研究的科学性与结论的稳健性,最终保留 108 个地级及以上城市作为有效样本(见图 1)。

表 1 长江经济带研究区域划分及样本统计

Table 1 Division of the study area and sample statistics in the Yangtze River Economic Belt

子区域	包含省市	样本城市占所	样本城市
		属于区域城市	占总有效
		总数比重/%	样本比重/%
上游	四川省、云南省、贵州省、重庆市	65.96	28.70
中游	湖北省、湖南省、江西省	94.74	33.33
下游	安徽省、江苏省、浙江省、上海市	97.62	37.96

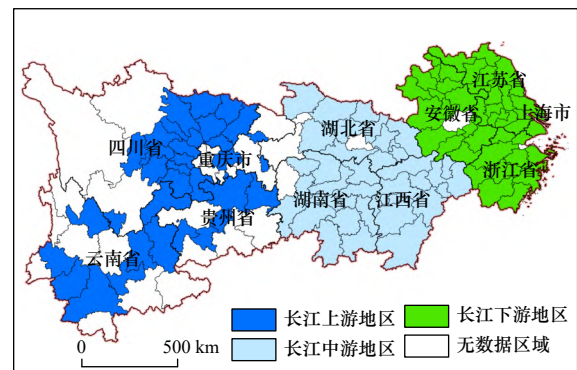


图 1 长江经济带研究区域示意

Fig.1 Schematic diagram of the study area in the Yangtze River Economic Belt

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 指标体系构建

“人-地-水-业”系统庞大且复杂,其中土地和水资源作为自然赋予的基础性生产要素,是生态环境的核心载体;人作为生产活动的主体,通过创造与发展产业构成社会环境的关键代表。四者相互关联、协同作用,其协调程度深刻影响着人类文明的演进轨迹。遵循系统性、科学性、代表性及可操作性的原则,基于 13 个维度共计选取 39 个典型评价指标构建长江经济带“人-地-水-业”系统指标体系(见表 2)。该指标体系旨在深入揭示长江经济带“人-地-水-业”系统的内在逻辑和相互作用机制,为理解其协调发展规律提供科学依据。

#### 1.2.2 熵权 TOPSIS 法

采用熵权 TOPSIS 法测度长江经济带“人-地-水-业”系统及各子系统的发展指数和各指标权重。该方法基于 TOPSIS 模型构建综合评价指标体系,根据

表2 长江经济带“人-地-水-业”系统指标体系

Table 2 Indicator system for the 'human-land-water-industry' system in the Yangtze River Economic Belt

子系统	维度	指标层	测算标准	单位	编号	属性	权重
人	规模	年末总人口	统计数据	万人	$X_1$	-	0.020 0
		人口密度	年末总人口/行政区划土地面积	人/km <sup>2</sup>	$X_2$	-	0.015 9
	结构	常住人口城镇化率	城镇常住人口/总常住人口	%	$X_3$	+	0.109 9
		人口自然增长率	(出生人数-死亡人数)/平均总人口	‰	$X_4$	-	0.039 9
		人口老龄化	65岁及以上人口占比	%	$X_5$	-	0.067 4
		第三产业从业人员比重	第三产业从业人员/总从业人员	%	$X_6$	+	0.105 0
	民生福祉	人均受教育年限	(文盲人数×1+小学学历人数×6+初中学历人数×9+高中和中专学历人数×12+大专及以上学历人数×16)/6岁以上人口总数	年	$X_7$	+	0.115 0
		每万人口卫生技术人员数	执业(助理)医师数/年末总人口	人/万人	$X_8$	+	0.190 2
		城镇居民人均可支配收入	城镇总可支配收入/城镇总人口数	元/人	$X_9$	+	0.336 7
地	利用强度	人均耕地面积	耕地总面积/年末总人口	hm <sup>2</sup> /人	$X_{10}$	+	0.120 8
		人均农作物播种面积	农作物总播种面积/年末总人口	hm <sup>2</sup> /人	$X_{11}$	+	0.498 8
	利用效率	单位面积GDP产出	GDP/建成区面积	万元/km <sup>2</sup>	$X_{12}$	+	0.146 0
		单位耕地面积化肥施用量	化肥施用量(折纯量)/耕地总面积	t/hm <sup>2</sup>	$X_{13}$	-	0.001 3
		建成区绿化覆盖率	绿化投影总面积/建成区面积	%	$X_{14}$	+	0.013 7
		人均公园绿地面积	公园绿地总面积/年末总人口	m <sup>2</sup> /人	$X_{15}$	+	0.055 3
	生态功能	归一化植被指数(NDVI)	(红外波段反射率-红光波段反射率)/(红外波段反射率+红光波段反射率)		$X_{16}$	+	0.043 7
		植被净初级生产力(NPP)	总初级生产力(GPP)-生态系统的自养呼吸(Ra)	kg/(m <sup>2</sup> ·a)	$X_{17}$	+	0.120 4
	水	禀赋	年平均降水量	统计数据	10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	$X_{18}$	+
水资源模数			水资源总量/行政区划土地面积	10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	$X_{19}$	+	0.483 6
人均水资源量			水资源总量/年末总人口	m <sup>3</sup> /人	$X_{20}$	+	0.474 5
结构与效率		水资源开发利用效率	用水总量/水资源总量	%	$X_{21}$	-	0.000 2
		人均用水量	年总用水量/年平均总人口	m <sup>3</sup> /人	$X_{22}$	-	0.000 2
		万元GDP用水量	年总用水量/GDP	m <sup>3</sup> /万元	$X_{23}$	-	0.000 3
		工业用水重复利用率	工业用水重复利用量/(工业用水重复利用量+工业用水新水取用量)	%	$X_{24}$	+	0.019 8
		人均工业废水排放量	工业废水排放总量/年末总人口	t/人	$X_{25}$	-	0.000 4
		环境效应	污水处理率	经过处理的污水量/污水产生总量	%	$X_{26}$	+
	污水处理厂集中处理率	污水处理厂集中处理量/污水产生总量	%	$X_{27}$	+	0.005 5	
业	发展水平	人均GDP	GDP/年末总人口	元/人	$X_{28}$	+	0.060 7
		GDP增长率	(本期GDP-上期GDP)/上期GDP	%	$X_{29}$	+	0.008 2
	规模与结构	粮食总产量	∑(各种粮食作物的种植面积×单位面积产量)	10 <sup>4</sup> t	$X_{30}$	+	0.062 0
		第一产业增加值占GDP比重	第一产业增加值/GDP	%	$X_{31}$	-	0.007 5
		第三产业增加值占GDP比重	第三产业增加值/GDP	%	$X_{32}$	+	0.024 3
		平均工资	城镇非私营单位就业人员年平均工资	元/人	$X_{33}$	+	0.041 8
		区域夜间灯光指数	夜间灯光平均值		$X_{34}$	+	0.193 0
	效益与创新	科学技术水平	科学技术支出/地方一般公共预算支出	%	$X_{35}$	+	0.083 8
		专利授权总量	统计数据	件	$X_{36}$	+	0.264 2
能源利用效率		基于Super-SBM投入导向模型测算		$X_{37}$	+	0.026 0	
全员劳动生产率		GDP/全部从业人员平均人数	元/人	$X_{38}$	+	0.073 2	
开放程度	贸易开放度	进出口总额/GDP	%	$X_{39}$	+	0.155 5	

注：“+”表示该项指标为正向指标，数值越大越好；“-”表示该项指标为负向指标，数值越小越好。

熵权法确定各指标权重, 通过计算评价对象与理想解的相对贴近度实现多维度综合评价; 该方法具有赋权客观性及复杂指标处理能力优势。

### 1.2.3 修正的耦合协调度模型

耦合协调是衡量两个或多个系统之间相互作用与协调发展程度的重要概念<sup>[23]</sup>。其中, 耦合度主要用于表征系统间交互影响的强度, 而协调度则用于衡量系统在发展过程中相互促进的程度。借鉴王淑佳等<sup>[24]</sup>的研究, 采用修正后的耦合协调度模型, 准确刻画人、地、水、业四个子系统之间的相互作用关系。耦合协调度 ( $D$ ) 的计算公式如下:

$$C = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i>j=1}^4 \sqrt{(U_i - U_j)^2}}{\sum_{m=1}^3 m}} \times \left( \prod_{i=1}^4 \frac{U_i}{\max U} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \times U_i, \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1 \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式中:  $C$  为耦合度;  $T$  为协调度;  $D$  为耦合协调度;  $U_i$  和  $U_j$  为人、地、水、业这 4 个子系统中某一子系统运用熵权 TOPSIS 法测度的发展指数;  $\max U$  为这 4 个子系统的发展指数的最大值;  $\alpha_i$  为待定系数, 遵循等权重假设, 令  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1/4$ ;  $D$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。鉴于十等分法阈值的区分度更强, 捕捉城市间差异的敏锐度更高, 能够更切实地反映长江经济带协调发展的梯度和演变特征<sup>[21]</sup>。借鉴 Wang 等<sup>[23]</sup>的研究, 将耦合协调度 ( $D$ ) 划分为 10 个等级 (见表 3)。

表 3 耦合协调度等级划分标准

Table 3 Classification standards for coupling and coordination degree

耦合协调度	等级	耦合协调度	等级
[0,0.1)	极度失调	[0.5,0.6)	勉强协调
[0.1,0.2)	严重失调	[0.6,0.7)	初级协调
[0.2,0.3)	中度失调	[0.7,0.8)	中级协调
[0.3,0.4)	轻度失调	[0.8,0.9)	良好协调
[0.4,0.5)	濒临失调	[0.9,1.0]	优质协调

### 1.2.4 地理探测器模型

地理探测器是一种分析地理要素的空间分层异质性及其受不同因素影响程度的统计方法<sup>[4]</sup>。其中, 因子探测可以进一步分析影响长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调发展的内生驱动因素。解释能力 ( $q$ ) 的计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中:  $q$  为耦合协调度影响因素的解释能力, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $L$  为根据自变量划分的层数;  $N_h$  和  $N$  分别为  $h$  层和整个区域的样本量;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为  $h$  层和整个区域的耦合协调度方差。

### 1.2.5 障碍度模型

障碍度模型是一种在综合评价框架下, 识别目标实现过程中关键阻碍因素的数学模型<sup>[25]</sup>, 障碍度指标值越大, 意味着目标实现过程中受该指标的阻碍越显著。采用该模型有利于对研究目标的实现提出有针对性的改进措施。对长江经济带子系统进行障碍度计算, 能够聚焦导致子系统滞后发展的关键因素, 从而明确其内在的薄弱环节。障碍度  $Q_{ij}$  的计算公式如下:

$$Q_{ij} = \frac{W_j \times (1 - R_{ij})}{\sum_{j=1}^n [W_j \times (1 - R_{ij})]} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $Q_{ij}$  为第  $i$  个样本第  $j$  个指标的障碍度,  $W_j$  为第  $j$  个指标通过 TOPSIS 熵权法计算所得的权重,  $R_{ij}$  为标准化后的指标值。

### 1.3 数据来源

以 2007—2023 年为研究期获取数据。其中, 人口及经济社会指标原始数据主要取自 WIND 数据库。归一化植被指数 (NDVI) 和植被净初级生产力 (NPP) 栅格数据分别来源于 NASA 定期发布的 MOD13A3 数据集<sup>[26]</sup> 以及 NASA-EARTHDATA 的 MOD17A3HGFv061 数据集<sup>[27]</sup>, 空间分辨率分别为 1 km 和 500 m。为得到各城市的 NDVI 和 NPP 数据, 首先, 分别对逐月 NDVI 栅格数据和原始的 NPP 栅格数据取平均值, 得到二者的年度值; 其次, 采用 2024 年省级、市级两级行政区划 Shp 数据分别对研究区域内每个城市的 NDVI 和 NPP 栅格值进行求平均数处理。其中, 由于原始 NPP 栅格数据的比例因子为 0.000 1, 故对其统一乘以 0.000 1, 使逐年 NPP 数值处于  $[-1, 1]$  范围, 在计算省级、市级尺度的逐年平均 NPP 时, 先扣除栅格数据中的特殊值 (包括行政区域范围内经比例因子 0.000 1 转换后的特定设置值), 再对剩余的有效像元进行平均值计算。夜间灯光数据集来源于美国国家海洋和大气管理局的 NPP-VIIRS 和 DMSP-OLS 卫星数据, 空间分辨率 500 m。参考 Chen 等<sup>[28]</sup> 的做法, 按照我国省级行政边界和地级市行政边界对该数据集进行求平均、总和、最大值、最小值处理, 最终得到研究

区域内各城市的夜间灯光指数。此外,对城市个别年份缺失的原始数据综合采用线性填充和多重插补法结合处理,以保证时序数据的完整性和准确性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 “人-地-水-业”系统发展指数时空演进

#### 2.1.1 时序演进特征

长江经济带“人-地-水-业”系统 2007—2023 年的发展指数年均增长率为 4.49%, 呈现持续上升趋势(见图 2)。具体来看,人子系统发展指数从 0.20 提高至 0.50, 年增长率为 6.03% 且呈逐年递增趋势, 远高于其余系统的发展指数, 反映了人子系统在“人-地-水-业”系统中的绝对拉动作用;“民生福祉”维度指标权重高达 64.18%, 表明人子系统内部逐渐形成以人口质量提升和居民生活水平<sup>[29]</sup> 提高为核心的内生动力, 具有较强的发展韧性。

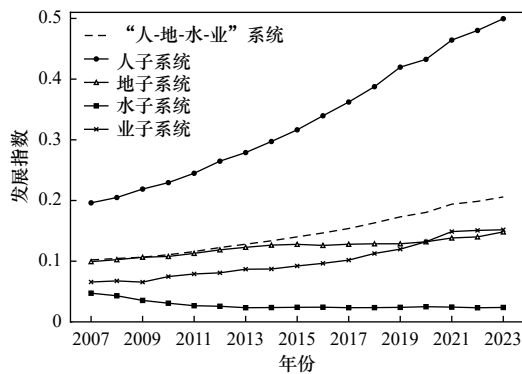


图 2 长江经济带“人-地-水-业”系统及各子系统发展指数

Fig.2 Development indices of the 'human-land-water-industry' system and its subsystems in the Yangtze River Economic Belt

地和业两大子系统发展指数上升趋势相近, 呈现“追赶与反超”的两阶段特征。2007—2019 年间(追赶阶段), 地子系统年均发展指数(0.12) 高于业子系统(0.09), 二者发展指数的平均差异从 0.03 降至 0.02。一方面, 这是由于长江经济带城市发展在该时期更倾向于空间扩张, 其中 2010—2015 年城市扩张速度最快<sup>[30]</sup>, 土地作为城市经济活动的基础性空间载体<sup>[31]</sup>, 既能够借助城市空间扩张提高其发展水平, 还能通过支持产业规模的扩张进一步加快其发展速度。另一方面, 业子系统利用其结构优化及产业竞争力逐渐缩小了与地子系统之间的发展差距, 但由于各城市的产业基础存在显著差异<sup>[32]</sup>, 其平均发展水平仍滞后于地子系统。2020 年, 地和业两子系统发展指数均为 0.13, 且业子系统仅 2020 年的增长率就达 10.20%。这表

明《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》的提出为长江经济带业子系统的发展指明了方向, 使其系统内部产业结构得以优化、产业竞争力逐步提升, 有力增强了系统整体韧性。故在 2021—2023 年间, 业子系统发展指数(年均值为 0.15) 反超地子系统发展指数(年均值为 0.14)。但总体来看, 两个子系统发展指数均低于“人-地-水-业”系统发展指数, 这可能受长江经济带资源约束和产业转型中的结构性问题影响。

水子系统发展指数在研究期内呈下降趋势, 年均下降率为 3.99%, 与其余系统的差距不断扩大。这表明水子系统内部资源禀赋、结构与效率、环境效应三维度之间存在失衡, 不可持续压力剧增, 在“人-地-水-业”系统中属于明显短板。

#### 2.1.2 空间格局演进特征

基于省级层面绘制的多时段雷达图揭示了长江经济带人、地、水、业各子系统的时空异质性(见图 3)。人子系统方面, 雷达图的面积逐年呈较为均匀的扩大趋势, 且轴长在 2015—2019 年出现较为明显增长; 形状以“整体近似圆形、局部出现尖点”为主; 方向向下游区域省市偏转。这表明人子系统在研究期内发展水平稳步提高, 整体协调性得以提升, 省市间发展存在空间非均衡性<sup>[33]</sup> 和异质性。其中, 上海市和浙江省作为人才集聚高地、处于方向性引领地位, 在雷达图中的轴长显著增长且尖锐突出; 云南省的轴线最短且轴长在 2019—2023 年间的增长幅度仅 0.03(平均增长幅度 0.08), 其人子系统发展水平明显落后。

地子系统方面, 雷达图的面积有所增加但逐年变化不显著; 形状上, 上海市处于明显的凹点位置, 云南省和贵州省形成较为突出的尖点, 江西省 2023 年轴长异常增长, 其余省市分布较为均衡。这表明地子系统整体协调性有所提升, 土地利用状况得到一定改善; 但部分省市间发展存在明显的异质性。上海市地子系统内部关乎农业发展的指标(如人均耕地面积) 占比明显偏低, 这反映了城市快速扩张对农业空间的挤压效应<sup>[34]</sup>; 江西省的异常表现可能源于其高标准农田建设的有效推动和“先建后补”项目的高效实施, 促使农业效率和经济密度出现短期共振<sup>[35]</sup>, 从而使得雷达图形状在 2023 年发生扭曲。

水子系统方面, 雷达图的面积以缩小趋势为主且缩小幅度的在 2007—2011 年间最为剧烈, 表明水子系统发展整体呈现逐年不均匀下降态势; 湖北省和四川省的水子系统发展造成雷达图方向和形状上较为严重的扭曲, 这可能揭示出经济社会和水资源可持续发展之间存在的深层次矛盾尚未得以解决。障碍度模

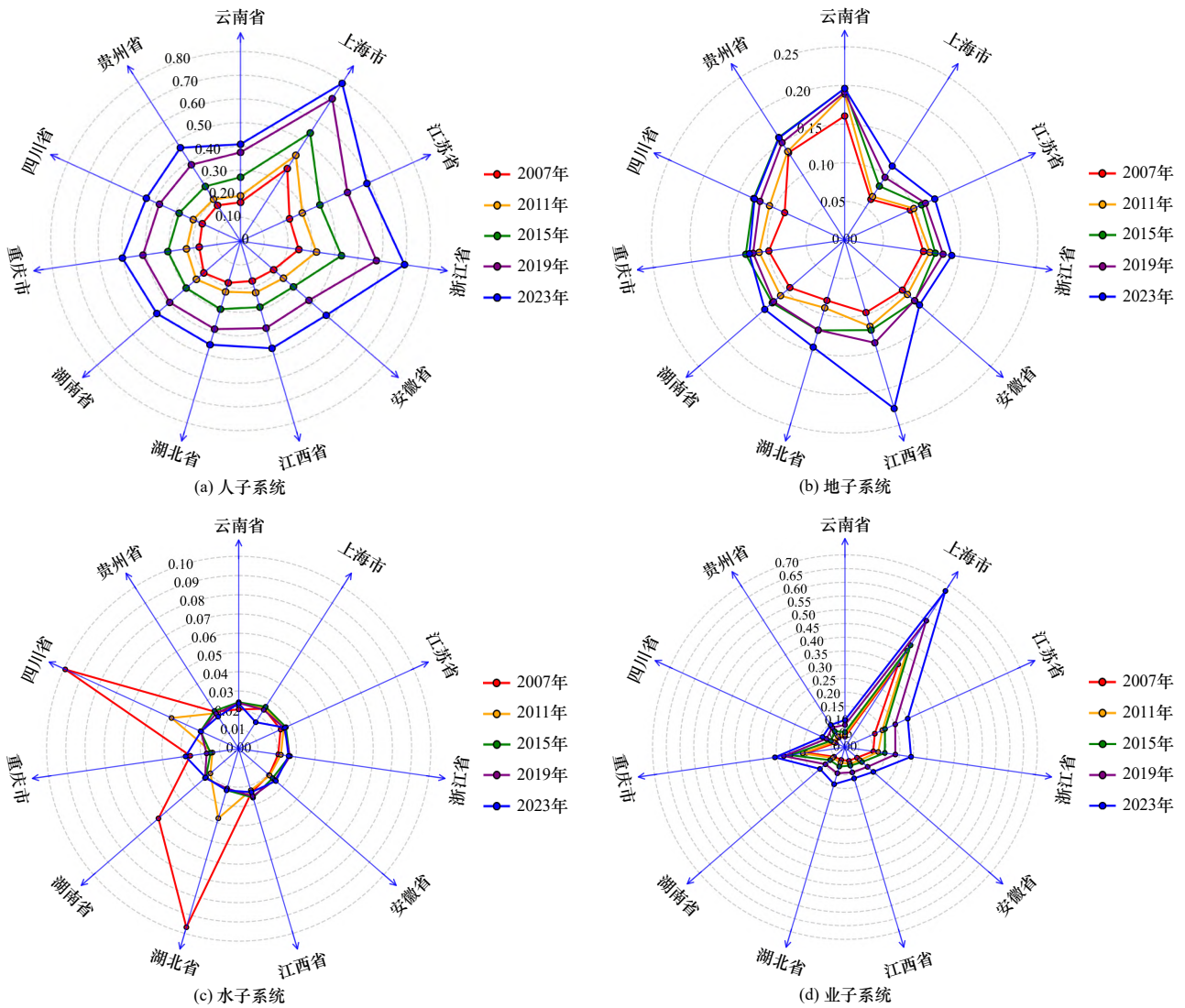


图3 长江经济带人、地、水、业各子系统发展指数雷达图

Fig.3 Radar chart of the development index of the human, land, water, industry subsystems in the Yangtze River Economic Belt

型结果(见表4)表明,水资源模数( $X_{19}$ )和人均水资源量( $X_{20}$ )是核心压力源,即水资源禀赋差异是造成水子系统发展指数不升反降的关键因素。

业子系统方面,雷达图逐年的面积较小但呈现外扩式增加趋势,表明业子系统以“前慢后快”的加速度提升其发展水平。雷达图的形状长期高度相似,上海市形成“绝对尖点”,江苏省和浙江省处于“跟跑”位置,云南省、贵州省和四川省在研究期内变化甚微,表明业子系统发展两极分化问题仍较为严重、产业结构存在同质化。

## 2.2 “人-地-水-业”系统耦合协调时空演化特征

### 2.2.1 时序演化特征

借助空间核密度估计方法绘制长江经济带总体及上游、中游和下游区域“人-地-水-业”系统的三维核密度曲线,以表征其耦合协调水平的时序演变特征

表4 水子系统障碍度模型结果

Table 4 Results of the water subsystem vulnerability model

指标名称	指标编码	平均障碍度/%
水资源模数	$X_{19}$	49.599 1
人均水资源量	$X_{20}$	48.878 2
年平均降水量	$X_{18}$	0.700 9
工业用水重复利用率	$X_{24}$	0.663 5
污水处理厂集中处理率	$X_{27}$	0.105 8
污水处理率	$X_{26}$	0.049 7
人均工业废水排放量	$X_{25}$	0.001 8
万元GDP用水量	$X_{23}$	0.000 3
人均用水量	$X_{22}$	0.000 2
水资源开发利用率	$X_{21}$	0.000 1

(见图4)。从分布位置来看,总体和三个区域的核密度曲线中心均出现右移,表明长江经济带“人-地-水-

业”系统的耦合协调水平在研究期内持续上升。从波峰数量来看,总体核密度曲线以单峰为主,且波峰平缓,表明总体发展较为均衡且呈现梯度上升态势,无明显极化现象;上游区域呈现多个小波峰,表明“人-地-水-业”系统在上游区域发展水平较低,存在较大的不稳定性及复杂性,容易受到不同风险的干扰;中游区域仅在 2015—2019 年间形成陡峭尖峰,其余年份较为平稳,表明该区域“政策窗口期”效益明显,反映了区域发展中典型的“政策驱动型脉冲增长”特

征;下游区域则在 2007—2015 年间出现小波峰且波动平缓,表明下游区域在经历快速发展后逐渐处于成熟期,系统韧性较强。从波峰形态来看,总体和下游区域核密度曲线的波峰高度下降、峰度减弱、峰值逐渐不明显,表明发展逐渐趋于均衡,内部差距有所缩小;中游区域峰值升高、峰度增强,由于该区域受武汉、长沙等都市圈的影响,区域内部发展异质性明显;上游区域峰值呈现波动态势,表明该区域尚未形成稳定的发展模式。

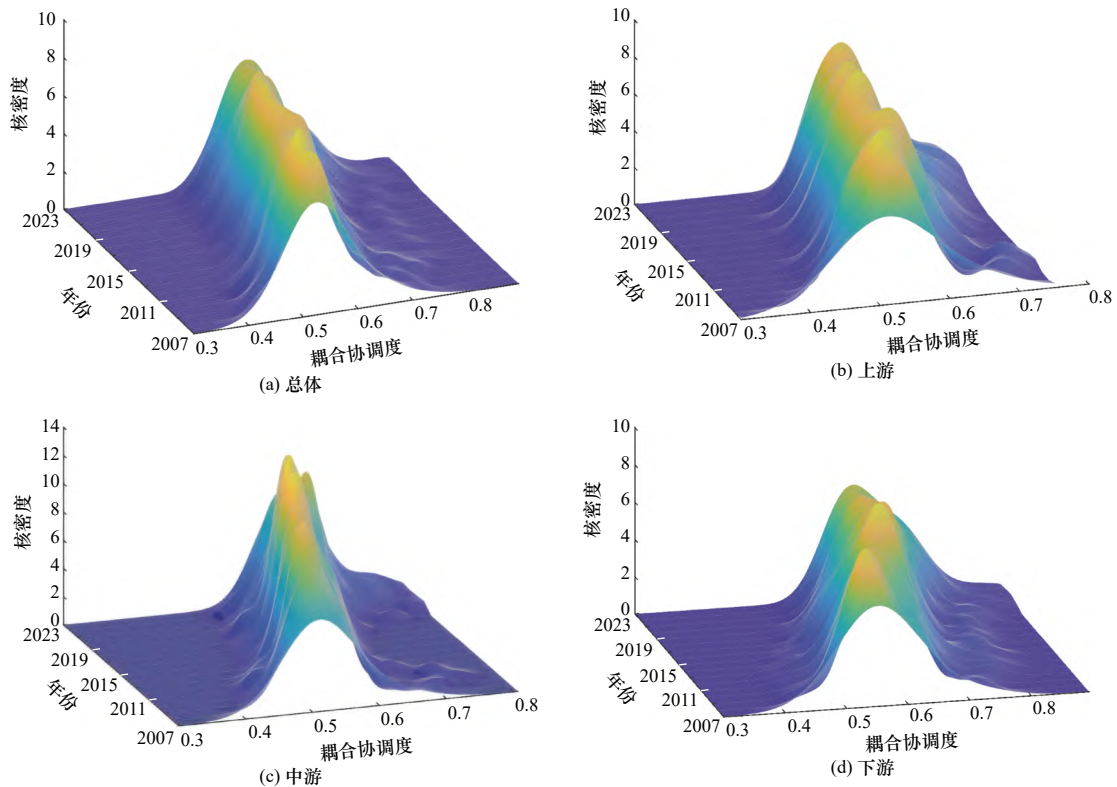


图 4 长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调的核密度估计

Fig.4 Kernel density estimation of the coupling and coordination of the ‘human-land-water-industry’ system in the Yangtze River Economic Belt

### 2.2.2 空间演化特征

在研究期内选取 5 个年份绘制长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调水平的空间分布图(见图 5)。长江经济带“人-地-水-业”系统的耦合协调水平整体提高,呈现“东部高于西部、核心区域高于外围”的空间分布格局。

从城市来看,“人-地-水-业”系统耦合协调水平提高进程中表现出“下游区域城市引领且逐渐向外围扩散,协调等级逐级突破、协调洼地聚集分布”的空间特点。具体来看,2007 年处于濒临失调状态的城市占比为 26.85%;2019 年,所有样本城市均突破濒临失调状态进入勉强协调及以上等级,其中下游区

域 80.49% 的城市已实现初级协调及以上等级,处于引领地位且辐射效应存在空间溢出;2023 年达到初级协调及以上等级的城市占比高达 79.63%,而处于勉强协调状态的城市占比下降 37.96%,各样本城市系统间互动关系趋于优化;但四川省 72.22% 的样本城市持续处于勉强协调状态,发展较为滞后。

从核心城市群来看,“人-地-水-业”系统耦合协调水平稳步提升,但存在明显的“群际分化”特征(见图 6)。长三角城市群率先实现了中级协调等级的跃升,并形成了以上海市和苏州市为首的较高协调等级集聚区;长江中游城市群积极利用政策和区位双重优势,在一定程度上缩小了“群间差距”;成渝城市群虽为

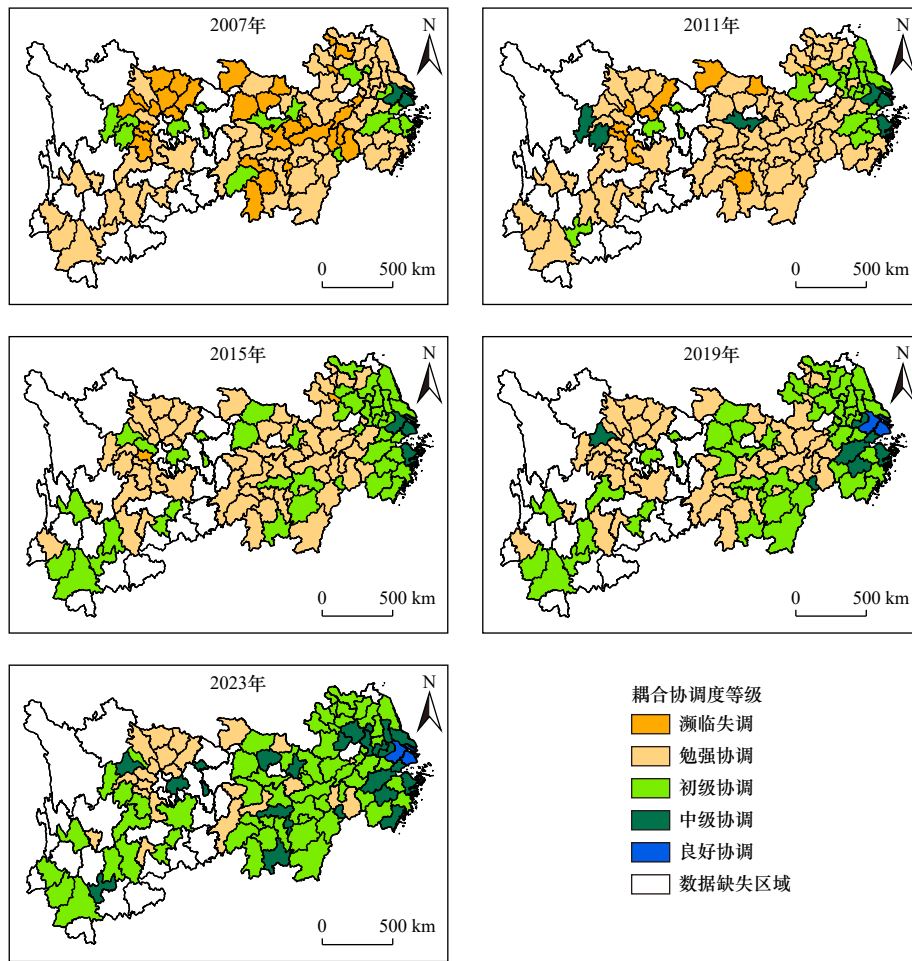


图 5 2007—2023 年长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调空间分布

Fig.5 Spatial distribution of coupling coordination of the ‘human-land-water-industry’ system in the Yangtze River Economic Belt from 2007 to 2023

上游区域的核心增长极,但其平均耦合协调水平长期较低,且内部城市的耦合协调水平波动较大,例如,

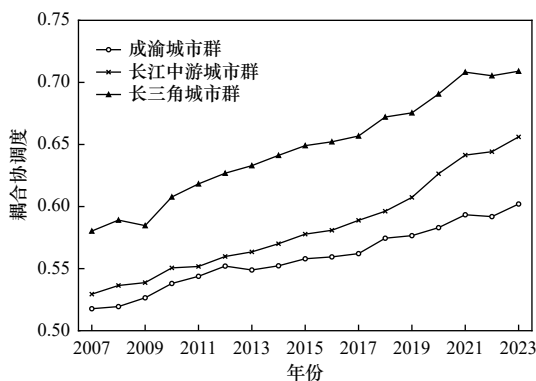


图 6 2007—2023 年长江经济带核心城市群“人-地-水-业”系统耦合协调水平

Fig.6 Spatial distribution of coupling coordination level of the ‘human-land-water-industry’ system in core urban agglomerations of the Yangtze River Economic Belt from 2007 to 2023

乐山市和雅安市的耦合协调状态在勉强协调、初级协调和中级协调之间反复波动,系统较为脆弱。

从区域来看,“人-地-水-业”系统的耦合协调水平呈现“下游持续引领、中游快速追赶、上游边缘突围”的梯度协同和区域间差异缩小的特征,整体耦合协调格局自“单极引领”逐步向“多极协同”迈进。例如,2023 年下游区域实现中级协调及以上等级的城市占比为 36.59%;低耦合协调水平城市主要聚集在上游和中游区域,且范围在研究期内持续缩小,表明区域协调发展要在重视均衡发展的同时充分发挥“空间扩散”效应。

### 2.2.3 耦合协调等级变化

基于 2.1 节中“人-地-水-业”系统发展指数时空演进规律的全面分析,以“是否加入水子系统”为依据,将长江经济带“人-地-水-业”系统进一步划分为“人-地-业”、“人-地-水”、“人-水-业”、“地-水-业”四个三元系统,依次计算其耦合协调度,并划分其耦合协调等级(见表 5),其中,“人-地-业”系统展示了

更为有序的整体协调性和较强的内部结构稳定性。一方面,各城市的耦合协调等级概率分布更为集聚且以上升为主(等级上升比例为 95.37%),表明该系统在发展中具有较强的结构韧性,能在保持协调状态的同时有效抵御干扰。另一方面,52.78%的城市实现了从初级协调向更高级别协调等级的跨越,等级跃升趋势最为显著,表明人、地和业三个子系统间形成了良性互促的发展闭环。在纳入“水”要素的其余系统中,城市的耦合协调等级波动比例显著增加,“人-地-水-业”系统、“人-地-水”系统、“人-水-业”系统、

“地-水-业”系统的耦合协调等级波动比例分别为 21.30%、43.52%、30.56%、22.22%。这表明水子系统的发展滞后在一定程度上增加了系统协调状态的波动性和内部结构的不确定性,进一步可能制约更多城市向高协调等级稳步演进。综合来看,在长江经济带“人-地-水-业”系统协调发展的进程中,需要重视水子系统的失调问题,如 2000—2023 年间中游城市群水生态空间因农业和城镇扩张而持续减少<sup>[36]</sup>;加强水资源的管理和水环境的治理,进一步提升水子系统的服务功能和恢复能力。

表 5 2007—2023 年不同系统各耦合协调等级变化类别的城市占比

Table 5 Percentage of cities in each coupling coordination level change category from 2007 to 2023

城市耦合协调等级变动类别	城市占比/%				
	“人-地-水-业”系统	“人-地-业”系统	“人-地-水”系统	“人-水-业”系统	“地-水-业”系统
等级上升					
濒临失调→勉强协调	9.259 3			0.925 9	1.851 9
濒临失调→初级协调	11.111 1			4.629 6	0.925 9
濒临失调→中级协调	2.777 8	0.925 9	1.851 9	0.925 9	1.851 9
勉强协调→初级协调	39.814 8		2.777 8	10.185 2	9.259 3
勉强协调→中级协调	8.333 3	20.370 4		14.814 8	16.666 7
勉强协调→良好协调		2.777 8		1.851 9	2.777 8
勉强协调→优质协调		0.925 9		0.925 9	
初级协调→中级协调	2.777 8	16.666 7	30.555 6	10.185 2	24.074 1
初级协调→良好协调		31.481 5	1.851 9	12.037 0	14.814 8
初级协调→优质协调		4.629 6		2.777 8	
中级协调→良好协调	1.851 9	5.555 6	3.703 7	0.925 9	0.925 9
中级协调→优质协调		10.185 2	0.925 9	4.629 6	
良好协调→优质协调		1.851 9		1.851 9	
等级不变					
始终保持勉强协调	1.851 9				
始终保持初级协调	0.925 9		1.851 9	0.925 9	0.925 9
始终保持中级协调			7.407 4		3.703 7
始终保持良好协调			0.925 9		
始终保持优质协调		1.851 9	1.851 9	1.851 9	
等级下降					
优质协调→良好协调			0.925 9		
良好协调→中级协调			0.925 9		
中级协调→初级协调			0.925 9		
等级波动					
波动但最终提高	10.185 2	1.851 9	13.888 9	14.814 8	11.111 1
波动但最终不变	10.185 2	0.925 9	24.074 1	14.814 8	9.259 3
波动但最终下降	0.925 9		5.555 6	0.925 9	1.851 9
合计	100	100	100	100	100

### 2.3 “人-地-水-业”系统驱动因素

为进一步探究长江经济带“人-地-水-业”系统的内部构成要素如何影响其整体耦合协调状态及空间分异结构,借助 GeoDetector 分析不同内部驱动因子的解释力。参考 Xu 等<sup>[4,37]</sup>的做法,根据权重大小对长江经济带“人-地-水-业”各子系统指标进行排序,在每个子系统中选取权重较高的 4 个指标,即共计选

取 16 个指标作为内部驱动因子,进行因子探测。其中,人子系统选取的指标为  $X_3$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ ,地子系统选取的指标为  $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{17}$ ,水子系统选取的指标为  $X_{18}$ 、 $X_{19}$ 、 $X_{20}$ 、 $X_{24}$ ,业子系统选取的指标为  $X_{34}$ 、 $X_{35}$ 、 $X_{36}$ 、 $X_{39}$ 。在进行地理加权回归之前,采用方差膨胀因子(VIF)对选取因子进行多重共线性检验<sup>[38]</sup>(见表 6),结果显示,除  $X_3$ (VIF 值=5.341 7)和  $X_{34}$ (VIF 值=5.082 6)

外,其余因子 VIF 值均小于 5,考虑到二者分别是人和业两大子系统“结构”维度的核心表征,故予以保留。

因子探测结果(见表 6)表明,14 个内部驱动因子在 1% 水平下显著,其余 2 个( $X_{17}$ 、 $X_{18}$ )在 5% 水平下显著。根据  $q$  统计量的均值对内部驱动因子的解

释能力以降序的形式排序可知,前五大内部驱动因子的平均解释能力均超过 32%,分别为  $X_{36}$ (专利授权总量,40.523 4%)、 $X_{39}$ (贸易开放度,38.595 8%)、 $X_9$ (城镇居民人均可支配收入,34.365 7%)、 $X_{34}$ (区域夜间灯光指数,33.928 5%)、 $X_{35}$ (科学技术水平,32.620 7%)。

表 6 2007—2023 年“人-地-水-业”系统耦合协调度驱动因素分析结果

Table 6 Results of driving factors for the coupling coordination degree of the ‘human-land-water-industry’ system from 2007 to 2023

指标名称	指标编号	VIF 值	显著性	$q$ 值/%					
				2007 年	2011 年	2015 年	2019 年	2023 年	平均值
常住人口城镇化率	$X_3$	5.341 7	***	16.164 3	10.051 8	27.074 4	38.800 6	44.561 1	25.483 9
人均受教育年限	$X_7$	3.457 1	***	4.813 5	4.844 6	16.008 0	24.675 5	18.242 9	15.082 4
每万人口卫生技术人员数	$X_8$	3.601 5	***	14.004 8	11.775 5	20.045 8	29.611 9	23.641 6	20.346 1
城镇居民人均可支配收入	$X_9$	4.721 0	***	20.270 0	24.375 9	40.397 4	45.492 8	39.618 7	34.365 7
人均耕地面积	$X_{10}$	1.862 0	***	11.261 6	6.681 2	15.333 6	26.703 3	23.175 4	16.464 1
人均农作物播种面积	$X_{11}$	1.042 6	***	10.365 7	14.736 8	28.051 6	28.664 1	19.480 5	20.836 4
单位面积 GDP 产出	$X_{12}$	1.566 1	***	5.365 2	11.300 5	22.080 3	21.493 2	22.671 5	17.015 1
植被净初级生产力(NPP)	$X_{17}$	1.707 2	**	1.518 7	0.410 6	7.208 9	5.183 7	11.372 1	5.272 1
年平均降水量	$X_{18}$	1.349 5	**	7.915 9	7.981 4	9.748 5	2.491 8	2.980 9	4.965 8
水资源模数	$X_{19}$	1.759 2	***	6.637 1	5.660 0	4.586 1	11.610 8	11.431 3	9.474 3
人均水资源量	$X_{20}$	1.768 6	***	1.932 9	3.256 1	4.979 9	5.915 5	12.890 9	6.302 7
工业用水重复利用率	$X_{24}$	1.142 1	***	8.388 8	19.318 2	20.416 0	21.668 0	14.040 1	19.067 5
区域夜间灯光指数	$X_{34}$	5.082 6	***	17.483 9	23.712 3	41.254 7	41.748 6	42.046 5	33.928 5
科学技术水平	$X_{35}$	2.187 3	***	18.168 8	23.113 6	43.458 9	39.735 2	33.988 7	32.620 7
专利授权总量	$X_{36}$	3.541 2	***	24.762 2	29.449 1	54.385 3	47.026 1	42.301 1	40.523 4
贸易开放度	$X_{39}$	2.294 6	***	21.777 2	27.957 3	44.838 0	50.318 0	41.465 2	38.595 8

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在 1%、5%、10% 统计水平上显著。

综合来看,社会和经济因素是影响长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调水平的主要内部驱动因素。从业子系统来看,科学技术水平的提升和发明专利授权总量的增加从技术创新的投入和赋能产出两大维度综合反映了当地政府对基础科学研究的支持和城市创新能力的整体提升,进一步体现了产业结构的优化升级,从而揭示了城市实现经济社会全面绿色转型的潜力。贸易开放度的提高有利于当地融入全球经济体系<sup>[39]</sup>,优化本地资源配置效率。区域夜间灯光亮度在夜间经济<sup>[40]</sup>中可用于衡量其经济活动强度,夜间灯光越亮,表明该地区的夜间消费活动较为丰富,夜间经济相对繁荣<sup>[41]</sup>,这不仅有利于重塑以服务业为核心的产业结构,还有利于创造就业机会<sup>[42]</sup>,改善居民生活质量。从人子系统来看,提高城镇居民人均可支配收入,有助于优化人口结构和家庭发展能力,激发消费活力。常住人口城镇化率的提高反映了居民生活水平和公共服务的提升。提高每万人口卫生技术人员数量,能够提高公共卫生服务质量,进一步保障人口健康水平。此外,水和地两大子系统自然

环境因素也从正面推动长江经济带“人-地-水-业”系统耦合协调性的提升<sup>[43-44]</sup>。

### 3 结论

a) 2007—2023 年长江经济带“人-地-水-业”系统发展水平逐年提高,发展指数年均增长率为 4.49%;但各子系统发展水平异质性显著且存在空间分布非均衡性。其中,人子系统形成以居民生活质量改善为目标导向的内生发展动力,且其发展优势高度集聚于长三角区域,对“人-地-水-业”系统发展具有绝对拉动作用;水子系统发展水平滞后,由于水资源模数等禀赋差异,在湖北省、四川省和湖南省造成较为严重的空间扭曲,是“人-地-水-业”系统发展的突出短板。地和业两大子系统发展指数形成的“追赶与反超”揭示了土地利用和产业布局之间的结构性转变;但二者空间格局差异显著,业子系统省市间发展两极分化较为严重,地子系统空间分布相对均衡。

b) 长江经济带“人-地-水-业”系统的耦合协调水平在稳步提升的同时表现出了明显的区域异质性和群际分化特征。从时序特征来看,下游区域率先进入

中高级协调状态,2023年实现中级协调及以上等级的城市占比为36.59%;中游区域受政策驱动影响较大;上游区域的耦合协调水平较低且波动明显,尚未形成稳定的发展模式。从空间演化特征来看,长三角城市群形成高值集聚区,方向性引领作用突出;长江中游城市群在中部崛起等国家战略带动下快速追赶,群际差距不断缩小;成渝城市群长期滞后且内部波动大,系统发展韧性不足。此外,低协调水平的城市范围逐步缩小,例如,处于濒临失调状态的城市在2019年消失;处于勉强协调状态的城市占比下降37.96%,但四川省的“协调洼地”仍持续存在;“空间扩散”效应较为显著,下游区域发挥着主要的辐射作用。

c) 耦合协调等级变化分析表明,水子系统的发展滞后是增加长江经济带“人-地-水-业”系统波动和不确定的关键因素。“人-地-业”三元系统下,各城市的耦合协调等级概率分布更为聚集且以上升为主,等级上升比例高达95.37%。进一步证实了缓解水资源约束、加强水环境治理是推动长江经济带“人-地-水-业”系统实现更高质量和可持续发展的关键环节。

d) 社会和经济因素主要驱动长江经济带“人-地-水-业”系统的协调发展。因子探测结果表明,科技创新、经济活跃度、居民可支配收入的解释力分别为40.523 4%、38.595 8%、34.365 7%。此外,50%的内部驱动因子的平均解释能力均超过20%。这表明推动长江经济带“人-地-水-业”系统的协调发展,一方面离不开自然环境因素的重要支撑作用,另一方面更依赖于产业升级、技术创新、城市新型城镇化水平及居民福祉改善的发展进程。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 朱思瑜,于冰.长三角减污降碳政策的协同效应和作用机制研究[J].*环境科学研究*,2024,37(2):256-265.  
ZHU S Y,YU B.Synergistic effects and mechanisms involved in pollution reduction and carbon emission reduction policies in the Yangtze River Delta Region[J].*Research of Environmental Sciences*,2024,37(2):256-265.
- [ 2 ] 刘黎明,陈军飞,王春宝.长江经济带水-能源-粮食-生态脆弱性时空特征及影响机制[J].*长江流域资源与环境*,2023,32(8):1628-1640.  
LIU L M,CHEN J F,WANG C B.Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of water-energy-food-ecology vulnerability:a case study of Yangtze River Economic Belt,China[J].*Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2023,32(8):1628-1640.
- [ 3 ] 甘畅,王凯.长江经济带服务业生态效率时空格局演化与组态提升路径研究[J].*环境科学研究*,2024,37(4):835-848.  
GAN C,WANG K.Research on spatiotemporal pattern evolution and configuration improvement of ecological efficiency of service industry in Yangtze River Economic Belt[J].*Research of Environmental Sciences*,2024,37(4):835-848.
- [ 4 ] XU J,LIU H.Spatiotemporal evolution and driving factors of the coupling coordination of the population-land-water-industry system in the lower Yellow River[J].*Scientific Reports*,2024,14:23067.
- [ 5 ] ELLIS E C,GAUTHIER N,KLEIN GOLDEWIJK K,et al.People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years[J].*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2021,118(17):e2023483118.
- [ 6 ] 李智礼,匡文慧,赵丹丹.京津冀城市群人口城镇化与土地利用耦合机理[J].*经济地理*,2020,40(8):67-75.  
LI Z L,KUANG W H,ZHAO D D.Coupled mechanism of population urbanization and land use in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration areas[J].*Economic Geography*,2020,40(8):67-75.
- [ 7 ] 童海燕,董晓,刘加平.县域人地关系认知与评价:以黄河中上游地区为例[J].*生态学报*,2025,45(24):12484-12500.  
TONG H Y,DONG X,LIU J P.Cognition and evaluation of human-land relationships in county areas:a case study of the upper and middle reaches of the Yellow River[J].*Acta Ecologica Sinica*,2025,45(24):12484-12500.
- [ 8 ] KEELER B L,HAMEL P,McPHEARSON T,et al.Social-ecological and technological factors moderate the value of urban nature[J].*Nature Sustainability*,2019,2(1):29-38.
- [ 9 ] SHARIFI A.Resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS):a review[J].*Sustainable Cities and Society*,2023,99:104910.
- [ 10 ] ROCKSTRÖM J,GUPTA J,QIN D H,et al.Safe and just earth system boundaries[J].*Nature*,2023,619(7968):102-111.
- [ 11 ] SANTOS E,CARVALHO M,MARTINS S.Sustainable water management:understanding the socioeconomic and cultural dimensions[J].*Sustainability*,2023,15(17):13074.
- [ 12 ] 方婷婷,王磊,段学军,等.人水关系视角下长江经济带绿色流域发展水平时空演变[J].*资源科学*,2025,47(3):543-557.  
FANG T T,WANG L,DUAN X J,et al.Spatiotemporal change of green watershed development level of the Yangtze River Economic Belt from the perspective of human-water relationship[J].*Resources Science*,2025,47(3):543-557.
- [ 13 ] 左其亭.人水关系研究的理论、方法及实践需求[J].*资源科学*,2025,47(3):433-444.  
ZUO Q T.Theories,methods,and practical needs of human-water relationship research[J].*Resources Science*,2025,47(3):433-444.
- [ 14 ] 张传华,张凤太,王钟书,等.生态敏感区村域尺度土地生态经济系统的耦合协调发展研究:以重庆市江津区为例[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(7):1547-1558.  
ZHANG C H,ZHANG F T,WANG Z S,et al.Study on the coupling and coordinated development of land eco-economic system in village scale in the ecologically sensitive area:a case of Jiangjin District,Chongqing,China[J].*Resources and Environment*

- in the Yangtze Basin,2021,30(7):1547-1558.
- [15] 聂雷,王圆圆,邵子南,等.城市土地利用效率测度及其影响因素:基于中国十大城市群的实证分析[J].经济问题探索,2022(2):82-93.  
NIE L,WANG Y Y,SHAO Z N,et al.Measurement and influencing factors of urban land use efficiency:an empirical analysis based on ten Chinese urban agglomerations[J].Inquiry into Economic Issues,2022(2):82-93.
- [16] 陶倩,兰安军,范泽孟,等.长三角城市群城市韧性与城市土地利用效益的耦合协调性分析[J].水土保持研究,2023,30(4):373-383.  
TAO Q,LAN A J,FAN Z M,et al.Coupling coordination analysis of urban resilience and urban land use efficiency in urban agglomeration of Yangtze River Delta[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(4):373-383.
- [17] 孙燕,吴莉莉,金晓斌,等.长三角区域一体化对城市群土地利用效率的空间协同效应[J].地理研究,2024,43(8):2104-2120.  
SUN Y,WU L L,JIN X B,et al.Spatial synergistic effect of regional integration on urban land use efficiency in Yangtze River Delta urban agglomeration[J].Geographical Research,2024,43(8):2104-2120.
- [18] HONG M Y,ZHANG W J.Industrial structure upgrading,urbanization and urban-rural income disparity:evidence from China[J].Applied Economics Letters,2021,28(15):1321-1326.
- [19] 冯仲恺,杨晓静,牛文静,等.水网互联下长江-黄河跨流域水资源系统复杂网络特征[J/OL].水资源保护,(2026-01-20)[2026-02-10].  
<https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20260120.1340.036>.  
FENG Z K,YANG X J,NIU W J,et al.Complex network characteristics of the Yangtze Rive-Yellow River inter-basin water transfer system under interconnected water networks[J/OL].Water Resources Protection,(2026-01-20)[2026-02-10].  
<https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20260120.1340.036>.
- [20] 方宁,杨东旭,向延平,等.湖南省人-地-水系统耦合协调度时空演进与影响因素[J].地域研究与开发,2023,42(1):32-37.  
FANG N,YANG D X,XIANG Y P,et al.Spatio-temporal evolution and influencing factors of coupling coordination degree of man-land-water system in Hunan Province[J].Areal Research and Development,2023,42(1):32-37.
- [21] 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.
- [22] 何伟军,覃晴,袁亮.场域视角下的长江经济带水-能-粮系统安全评价及预测研究[J].长江流域资源与环境,2025,34(9):1958-1971.  
HE W J,QIN Q,YUAN L.Safety evaluation and prediction of the water-energy-food system in the Yangtze River Economic Belt from a field perspective[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2025,34(9):1958-1971.
- [23] WANG K W,FANG C L.Revealing the synergy between carbon reduction and pollution control in the process of new-type urbanization:evidence from China's five major urban agglomerations[J].Sustainable Cities and Society,2025,120:106154.
- [24] 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 L,et al.Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J].Journal of Natural Resources,2021,36(3):793-810.
- [25] 刘虹珏,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 ecological protection and high-quality development in the Yangtze River Economic Belt[J].Engineering Journal of Wuhan University,2025,58(1):20-32.
- [26] DIDAN K.MOD13A3 MODIS/Terra vegetation indices monthly L3 global 1 km SIN Grid V006 [EB/OL].Maryland:NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center,(2021-02-16)[2026-02-10].  
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.061>.
- [27] RUNNING S,ZHAO M.MODIS/Terra net primary production gap-filled yearly L4 global 500 m SIN grid V061 [EB/OL].Maryland:NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center,(2021-03-15)[2026-02-10].  
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061>.
- [28] CHEN Z Q,YU B L,YANG C S,et al.An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J].Earth System Science Data,2021,13(3):889-906.
- [29] 周兵,李玉凤.长江经济带经济高质量发展:测度、时空演变与障碍因子诊断[J].长江流域资源与环境,2025,34(6):1149-1166.  
ZHOU B,LI Y F.High-quality economic development of the Yangtze River Economic Belt:assessment,spatiotemporal evolution,and identification of impediments[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2025,34(6):1149-1166.
- [30] 张敏,杨励雅,胡卓玮,等.长江经济带城市扩张的时空分异特征及影响机制[J].地理学报,2024,79(2):439-461.  
ZHANG M,YANG L Y,HU Z W,et al.Spatiotemporal differentiation and influencing mechanism of urban expansion in the Yangtze River Economic Belt,China[J].Acta Geographica Sinica,2024,79(2):439-461.
- [31] GUO C Y.The impact of land finance dependence on green economic efficiency:evidence from China[J].Frontiers in Environmental Science,2025,13:1659821.
- [32] 何家军,赵祎明,章陈智,等.要素禀赋对战略性新兴产业发展质量的影响:基于长江经济带的实证分析[J].华东经济管理,2026,40(1):21-31.  
HE J J,ZHAO Y M,ZHANG C Z,et al.The impact of factor endowment on the development quality of strategic emerging

- industries:an empirical analysis based on the Yangtze River economic belt[J].*East China Economic Management*,2026,40(1): 21-31.
- [ 33 ] 杨仁发,陆瑶.长江经济带发展战略对共同富裕的影响机制及空间效应 [J].*南通大学学报(社会科学版)*,2024,40(6):103-120.  
YANG R F,LU Y.The impact mechanism and spatial effects of the Yangtze River Economic Belt development strategy on common prosperity[J].*Journal of Nantong University (Social Sciences Edition)*,2024,40(6):103-120.
- [ 34 ] 暴欣怡,郭庆彪,李彦旻,等.未来气候变化情景下资源型城市生态系统服务预测及权衡协同分析 [J/OL].*环境科学*,(2026-02-02) [2026-02-10].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202510107>.  
BAO X Y,GUO Q B,LI Y M,et al.Prediction and trade-off synergy analysis of ecosystem services in resource-based cities under future climate change scenarios[J/OL].*Environmental Science*,(2026-02-02) [2026-02-10].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202510107>.
- [ 35 ] 窦丽霞,徐丽婷,李文紫怡,等.基于 SD-PLUS-InVEST 模型的江西省土地利用与生境质量演变及模拟 [J].*环境科学*,2026, 47(2):903-915.  
DOU L X,XU L T,LI W Z Y,et al.Land use and habitat quality changes and simulations in Jiangxi Province based on SD-PLUS-InVEST model[J].*Environmental Science*,2026,47(2):903-915.
- [ 36 ] 薄立明,赵浪,尹力,等.长江中游城市群水生态空间时空演化模式与影响因素:基于 2000—2023 年长时序遥感数据的实证分析 [J].*长江流域资源与环境*,2025,34(11):2526-2540.  
BO L M,ZHAO L,YIN L,et al.Spatial-temporal evolution patterns and influencing factors of hydro-ecological space in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River:an empirical analysis based on long-term remote sensing data from 2000 to 2023 [J].*Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025,34(11):2526-2540.
- [ 37 ] YANG S,ZHANG Z W,ZHANG J Y,et al.The coupling relationship and driving mechanism between ecological environment and high-quality economic development in the Middle Yellow River Basin[J].*Scientific Reports*,2025,15:10688.
- [ 38 ] ABADIE A,ATHEY S,IMBENS G W,et al.When should you adjust standard errors for clustering?[J].*The Quarterly Journal of Economics*,2022,138(1):1-35.
- [ 39 ] ANGELIDIS G,VARSAKELIS N C.Economic shock transmission through global value chains:an assessment using network analysis[J].*International Advances in Economic Research*,2023,29(3):111-128.
- [ 40 ] SHAW R.The Nocturnal City[M].London:Routledge,2018.
- [ 41 ] GIBSON J,OLIVIA S,BOE-GIBSON G.Night lights in economics: sources and USES[J].*Journal of Economic Surveys*,2020,34(5): 955-980.
- [ 42 ] 晏玲玲.城市夜间经济释放消费潜力评价及影响因素研究:基于 TOPSIS 和动态面板模型 [J].*商业经济研究*,2024(9):65-68.
- [ 43 ] 刘亦文,李桢泉,陈娟.近二十年长江中游城市群生态修复效果及社会经济效益评估 [J].*环境科学研究*,2025,38(7):1450-1461.  
LIU Y W,LI Z X,CHEN J.Evaluation of ecological restoration effect and its socioeconomic benefits in the middle reaches of the Yangtze River from 2004 to 2023 [J].*Research of Environmental Sciences*,2025,38(7):1450-1461.
- [ 44 ] 黄颖利,孙晨,乔振华.生态保护修复视角下京津冀地区社会经济-生态环境系统耦合关系及影响机制 [J].*环境科学研究*,2024, 37(12):2824-2835.  
HUANG Y L,SUN C,QIAO Z H.Coupling relationship and influence mechanism of socio-economic and eco-environment system in Beijing-Tianjin-Hebei Region under the perspective of ecological protection and restoration[J].*Research of Environmental Sciences*,2024,37(12):2824-2835.

(责任编辑:周巧富)