

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.03.028

CSTR:32310.14.stbxb.2026.03.028

袁菊红,黄思宇,张梦娜,等.长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调的XGBoost-SHAP解析[J].水土保持学报,2026,40(3):447-465.

YUAN Juhong, HUANG Siyu, ZHANG Mengna, et al. XGBoost-SHAP analysis of coupling coordination between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 447-465.

## 长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调的 XGBoost-SHAP解析

袁菊红<sup>1</sup>, 黄思宇<sup>2</sup>, 张梦娜<sup>2</sup>, 黎浩<sup>2</sup>, 胡绵好<sup>2</sup>

(1. 江西财经大学省级生态环境实验教学示范中心, 南昌 330032; 2. 江西财经大学经济学院, 南昌 330013)

**摘要:** [目的] 探明长江经济带新型城镇化与水安全韧性间的耦合协调发展水平与作用机理, 为韧性城市建设与水安全差异化治理的协同推进提供科学支撑。[方法] 以长江经济带为研究区域, 以2006—2023年为研究时段, 分别构建新型城镇化与水安全韧性的综合评价指标体系, 并采用博弈论组合赋权-TOPSIS方法、耦合协调度模型、Dagum基尼系数、探索性空间数据分析及XGBoost-SHAP模型, 系统分析二者耦合协调发展的时空演变特征、空间关联格局及其内在驱动机理。[结果] 1) 长江经济带新型城镇化与水安全韧性间的耦合协调度呈现稳步提升与空间收敛趋势, 并形成“下游>中游>上游”的梯度格局; 2) 其空间关联模式从集聚走向均衡, 局部尺度上演化为“核心引领、梯度过渡、低值突破”的协同网络结构; 3) 驱动机理具有非线性与交互性特征, 基础设施与城乡收入差距是核心驱动力, 各因子普遍存在阈值效应及复杂交互作用, 且该机制表现出显著的流域异质性。[结论] 长江经济带应通过实施差异化治理策略、推行精准阈值调控与空间引导、构建多因子协同治理体系、健全动态监测与适应管理机制, 提升新型城镇化与水安全韧性的耦合协调水平, 以推动流域高质量发展。

**关键词:** 新型城镇化; 水安全韧性; 耦合协调; XGBoost-SHAP模型; 长江经济带

中图分类号: X821; X321

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0447-19

## XGBoost-SHAP Analysis of Coupling Coordination between New-Type Urbanization and Water Security Resilience in Yangtze River Economic Belt

YUAN Juhong<sup>1</sup>, HUANG Siyu<sup>2</sup>, ZHANG Mengna<sup>2</sup>, LI Hao<sup>2</sup>, HU Mianhao<sup>2</sup>

(1. Provincial Experimental Teaching Demonstration Center of Ecological Environment, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China; 2. School of Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the coupling coordination development level and interaction mechanisms between new-type urbanization and water security resilience in the Yangtze River economic belt, thereby providing scientific support for the synergistic advancement of resilient city construction and differentiated water security governance. [Methods] Taking the Yangtze River economic belt as the study area and the period from 2006 to 2023 as the study interval, comprehensive evaluation indicator systems for new-type urbanization and water security resilience were constructed. The spatiotemporal evolution characteristics, spatial correlation patterns, and driving mechanisms of their coupled and coordinated development were systematically analyzed using the game-theoretic combination weighting-TOPSIS method, coupling coordination degree model, Dagum Gini coefficient, exploratory spatial data analysis, and XGBoost-SHAP model. [Results] 1) The coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in the Yangtze River economic belt exhibited a steady increasing trend and spatial convergence, forming a gradient pattern of "downstream >

收稿日期: 2025-12-05

修回日期: 2026-01-11

录用日期: 2026-01-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-12

资助项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200518); 教育部人文社会科学研究规划项目(20YJAZH037)

第一作者: 袁菊红(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事人居环境可持续发展研究。E-mail: yuanjuhong@sina.com

通信作者: 胡绵好(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事资源环境经济与可持续发展研究。E-mail: yankeu1@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

midstream > upstream". 2) Its spatial correlation pattern shifted from agglomeration towards equilibrium, evolving into a synergistic network structure characterized by "core leadership, gradient transition, and low-value breakthrough" at the local scale. 3) The driving mechanisms showed nonlinear and interactive characteristics. Infrastructure and the urban-rural income gap were the core driving forces. Various factors exhibited widespread threshold effects and complex interactions, and this mechanism demonstrated significant heterogeneity across the river basin. [Conclusion] The Yangtze River economic belt should enhance the coupling coordination level between new-type urbanization and water security resilience by implementing differentiated governance strategies, promoting precise threshold regulation and spatial guidance, developing a multi-factor synergistic governance system, and improving dynamic monitoring and adaptive management mechanisms, thereby advancing high-quality development in the river basin.

**Keywords:** new-type urbanization; water security resilience; coupling coordination; XGBoost-SHAP model; Yangtze River economic belt

**Received:** 2025-12-05

**Revised:** 2026-01-11

**Accepted:** 2026-01-25

**Online**(www.cnki.net): 2026-03-12

城市化与水安全是支撑国家与区域可持续发展的关键系统,二者耦合协调程度直接关系到经济社会高质量发展与“人地关系地域系统”的动态平衡<sup>[1]</sup>。当前,我国正处于新型城镇化纵深推进阶段,人口与产业的空间集聚不断加剧水资源供需矛盾。与此同时,城镇化导致的下垫面变化与水循环扰动,叠加全球气候变化下极端水文事件频发,共同推动水安全问题从传统的资源供给保障,演进为涵盖水资源、水生态与水灾害的综合韧性治理议题<sup>[2-3]</sup>。长江经济带作为我国人口最密集、经济最活跃的流域区域<sup>[4]</sup>,其城镇化进程与水安全系统的交互作用日趋复杂,已有研究<sup>[2,5]</sup>表明此类关系呈现显著的非线性、多因子耦合及空间异质性特征<sup>[6]</sup>。因此,系统揭示二者的互馈机制与驱动规律,对完善流域治理体系、推动区域可持续发展具有重要理论价值与实践意义。

学界围绕城镇化与水安全韧性互动关系已开展多维度探索,并在理论机制、评价方法与驱动因素等方面形成一定共识。一是作用机制识别上,学界普遍认识到二者存在复杂非线性关联,如胡庆芳等<sup>[1]</sup>系统阐释城镇化对区域水循环的多维扰动过程,并提出“以水定城、量水发展”的韧性提升路径;李明鸿等<sup>[5]</sup>在淮河生态经济带的实证研究中揭示城镇化与水环境质量之间的非线性阈值效应;KAN等<sup>[2]</sup>则发现,中部地区新型城镇化与水生态韧性呈“U”形曲线关系。二是评价体系构建上,形成多维度、多模型的测度路径。水安全韧性评价常围绕“抵抗-适应-恢复”等维度展开,并融合PSIR、DPSIR等框架以纳入社会经济与管理要素<sup>[7-8]</sup>。新型城镇化的评价体系则普遍涵盖人口、经济、空间、社会等多维指标<sup>[9]</sup>,通过熵权法、TOPSIS法、CRITIC加权法等客观赋权或简单组合赋权法进

行测算<sup>[10-12]</sup>,并借助耦合协调度模型和系统动力学模型探讨2个系统的协同演进关系<sup>[3,13]</sup>。三是驱动机制解析方面,研究方法呈现互补与发展态势,如基于空间异质性的分析多采用地理加权回归、地理探测器等方法识别影响因素<sup>[5,14-17]</sup>。近年来,为有效捕捉变量间复杂非线性关系与交互效应,随机森林、梯度提升机、贝叶斯网络等机器学习方法逐渐被应用于实证研究<sup>[18-19]</sup>,为机制挖掘提供新路径,但其在特定区域研究中的适用性与结果可解释性仍需深入探索。

尽管已有研究<sup>[20]</sup>对城镇化与水安全的关系进行有益探索,但其耦合协调机制的解析仍有不足,如现有指标赋权多依赖单一或简单组合模型,在复杂系统中难以兼顾主客观信息,影响测度结果的稳健性;多数学者侧重于时空格局的静态刻画,对驱动因素的阈值效应、交互协同等深层机理挖掘不足<sup>[21]</sup>;传统计量模型难以精准捕捉系统的复杂非线性关系,而机器学习方法在本领域,尤其在中国典型流域的应用深度与可解释性均有待提升<sup>[22]</sup>。鉴于此,本研究以长江经济带为研究对象,基于2006—2023年面板数据,引入博弈论组合赋权-TOPSIS方法,融合主客观信息提升评价体系的稳健性与精准度,并集成耦合协调度模型与XGBoost-SHAP可解释机器学习方法,从“格局-关联-机理”3个层面系统解析新型城镇化与水安全韧性耦合协调的驱动机制,重点挖掘其核心驱动因素的非线性影响路径、阈值效应及多因子交互机制,揭示其驱动逻辑的时空异质性。本研究的意义在于:一是通过构建“主客观融合评价-多尺度时空分析-可解释机器学习解析”的研究框架,为长江经济带新型城镇化与水安全韧性的耦合协调关系提供系统、深入的实证依据;二是通过识别关键驱动

因子及其非线性路径、阈值效应与空间分异,为流域内差异化制定韧性提升策略、优化城镇化发展模式提供直接的科学支撑,服务于长江经济带生态优先、绿色发展的国家战略。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长江经济带(Yangtze River economic belt, YREB)横跨我国东、中、西三大地理阶梯,涵盖上海市、江苏省、浙江省、安徽省、湖北省、湖南省、江西省、重庆市、四川省、贵州省、云南省共11个省市(图1),区域总面积约205.23万 $\text{km}^2$ ,占全国陆地总面积的21.40%<sup>[23]</sup>。该区域人口密集、经济活跃,在全国发展格局中具有举足轻重的地位。长江经济带可划分为上游(重庆市、四川省、贵州省、云南省)、中游(江西省、湖北省、湖南省)和下游(上海市、江苏省、浙江省、安徽省)三大区段。作为国家重大战略区域,长江经济带在持续政策推动下,已成为带动全国经济高质量发展的重要引擎。截至2024年末,区域内常住人口约6.08亿人,占全国43.2%;地区生产总值超过63万亿元,约占全国46.7%,充分凸显其在全国经济社会发展中的核心功能。然而,伴随城镇化快速推进与人口持续集聚,水土资源开发强度不断加大,生态环境压力日益加剧,城乡建设与生态保护之间的矛盾逐步凸显<sup>[6]</sup>。作为全国重要的生态屏障与经济动脉,长江经济带正面临城镇化加速与水资源约束趋紧的双重压力,人水关系日趋紧张。在此现实背景下,系统解析新型城镇化与水安全韧性之间的耦合协调机制,对于推动长江经济带可持续发展具有重要的理论价值与实践意义。



图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

### 1.2 指标体系构建

新型城镇化(new-type urbanization, NTU)战略的核心之一是实现可持续发展的城镇化。就可持续发展这一议题,2015年联合国可持续发展峰会通过了《变革我们的世界:2030年可持续发展议程》,制定

了17项可持续发展目标(SDGs),以期彻底解决社会、经济和环境3个维度的发展问题。受制于发展的不充分、不平衡性,各个国家和地区实施SDGs面临的主要问题和关注的重点也不同。因此各国学者均希望通过构建本土化的SDGs指标体系,努力将SDGs纳入他们国家的发展计划和监测评估体系之中。因此,参考邵超峰等<sup>[24]</sup>总结的中国可持续发展指标库,结合我国《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》和《“十四五”新型城镇化实施方案》的战略目标,本研究从人口、经济、空间、社会和环境5个方面选取18个指标<sup>[25-26]</sup>,按照全面性和典型性的原则构建了新型城镇化的综合评价体系(表1)。

水安全韧性(water security resilience, WSR)是指水安全系统能够在受到风险事件干扰时进行有效抵抗,形成动态平衡机制并逐渐恢复其原有功能,并在受到冲击后获得一定适应性提升的能力。因此,参考相关研究<sup>[27]</sup>,本研究从抵抗性、恢复性和适应性3个方面构建水安全韧性的评价指标体系(表1)。

### 1.3 数据来源与处理

本研究基于2006—2023年长江经济带11省市的面板数据展开分析,基础数据来源于2007—2024年的《中国统计年鉴》<sup>[28]</sup>《中国城市统计年鉴》<sup>[29]</sup>《中国环境统计年鉴》<sup>[30]</sup>及各省市统计年鉴和社会发展公报。为确保数据连续与完整,对个别缺失值进行了严谨处理:对于具有时间趋势的指标,采用线性插值法进行估计;对在空间上关联密切的截面数据,则借鉴地理相邻省份的平均值予以填补(如2022年部分省市的城镇登记失业率)。在纳入模型前,所有数据均已完成量纲统一与标准化处理,保障分析过程的严谨性与结论的科学性。

## 2 研究方法

### 2.1 博弈论组合赋权-TOPSIS法

由于主观与客观赋权方法各具局限性,为避免单一赋权结果出现偏差,本文基于博弈论思想,将G1法所得主观权重与熵权法所得客观权重进行组合优化。设原始数据矩阵为 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。式中: $x_{ij}$ 为第 $j$ 年第 $i$ 个指标; $m$ 为指标总数; $n$ 为年份总数。经指标类型(成本型、效益型)标准化处理后,得到标准化矩阵 $Q_{ij}=(q_{ij})_{m \times n}$ 。式中: $q_{ij}$ 为 $x_{ij}$ 标准化后的结果。

1)采用G1法确定主观权重。首先,由专家对各项评价指标按重要性进行排序;其次,依次为相邻指标间的相对重要程度赋值( $r_k$ );随后,计算最末位指标的权重( $w_m$ );最后,依次递推求得其余各指标的权重( $w_{m-1}$ ),最终形成权重向量 $w_g=(w_{1g}, w_{2g}, \dots, w_{mg})^T$ 。

表 1 长江经济带新型城镇化与水安全韧性综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation indicator system for new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt

目标层	准则层	指标层	单位	属性	SDGs
新型城镇化指标	人口城镇化	城镇人口比重	%	正	SDG11
		二、三产业就业人员比重	%	正	SDG9
		每十万人高等学校平均在校生数	人	正	SDG4
	经济城镇化	第二、第三产业占 GDP 的比重	%	正	SDG9
		城镇居民人均可支配收入	元	正	SDG2
		人均 GDP	元	正	SDG8
	社会城镇化	年末城镇登记失业率	%	负	SDG8
		每千人卫生技术人员数	人	正	SDG3
		每千人医疗卫生机构床位数	张	正	SDG3
		每万人拥有公共交通工具	标台	正	SDG11
		人均教育经费	元	正	SDG4
		城市用水普及率	%	正	SDG6
	空间城镇化	人均城市道路面积	m <sup>2</sup>	正	SDG9
		建成区面积比重	%	正	SDG11
		房地产开发投资额	万元	正	SDG11
	环境城镇化	人均公园绿地面积	m <sup>2</sup>	正	SDG11
		建成区绿化覆盖率	%	正	SDG11
		生活垃圾无害化处理率	%	正	SDG11
水安全韧性指标	抵抗性	人口密度	人/km <sup>2</sup>	负	SDG11
		水旱灾害受灾积占比	%	负	SDG13
		万元 GDP 用水量	m <sup>3</sup>	负	SDG6
		水资源负载指数	—	负	SDG6
	恢复性	产水模数	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	正	SDG6
		人均水资源量	m <sup>3</sup>	正	SDG6
		有效灌溉面积占比	%	正	SDG2
		第三产业占比	%	正	SDG9
	适应性	污水处理率	%	正	SDG6
		生态用水占比	%	正	SDG6
		森林覆盖率	%	正	SDG15
		河流水质达标率	%	正	SDG6

2) 运用熵权法确定客观权重。首先,根据数据特征测算各评价指标的熵值( $e_i$ );其次,依据熵值计算各评价指标的客观权重( $w_i^e$ );最终构建权重向量  $w_e=(w_{1e}, w_{2e}, \dots, w_{me})^T$ ,确保权重分配充分体现数据本身的离散特征。

3) 博弈论确定组合权重。首先,构建基础权重向量集( $p_k$ )。假设采用  $L$  种赋权方法对  $n$  个评价指标进行赋权,则基础权重向量集可表示为: $p_k=[p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn}]$  ( $k=1, 2, \dots, L$ )。其次,建立权重向量的线性组合( $p$ )。

$$p = \sum_{k=1}^L \gamma_k q_k^T, k = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

式中: $\gamma_k$ 为线性组合系数。再次,优化线性组合系数( $\gamma$ )。利用多目标博弈集结模型,优化  $L$  个系数( $\gamma=[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k]$ ),使得组合权重  $p$  与各  $p_k$  的总体离差最小,即:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \gamma_k p_k^T - p^T \right\|, k = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

对公式(1)目标函数求一阶导数,可得等价线性方程组:

$$\begin{bmatrix} p_1 p_1^T & p_1 p_2^T & \dots & p_1 p_L^T \\ p_2 p_1^T & & & p_2 p_L^T \\ \vdots & & & \vdots \\ p_L p_1^T & p_L p_2^T & \dots & p_L p_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 p_1^T \\ p_2 p_2^T \\ \vdots \\ p_L p_L^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

求解公式(2)方程组,得到最优线性组合系数( $\zeta=[\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_L]$ )。随后对  $\zeta$  进行归一化处理,并计算综合权重( $w$ ),计算公式为:

$$\zeta_k = \gamma_k / \sum_{l=1}^L \gamma_l \quad (4)$$

$$w = \sum_{k=1}^L \zeta_k p_k^T, k = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

$$Z_{ij} = w \times Q_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 \times q_{11} & w_2 \times q_{12} & \dots & w_n \times q_{1n} \\ w_1 \times q_{21} & w_2 \times q_{22} & \dots & w_n \times q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 \times q_{m1} & w_2 \times q_{m2} & \dots & w_n \times q_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据方程(4)矩阵,分别确定各评价指标的正理想解  $Z_i^+$  和负理想解  $Z_i^-$ ,公式为:

$$z_i^+ = (z_{i1}^+, z_{i2}^+, \dots, z_{in}^+) = \{ \max z_{ij} | i = 1, 2, \dots, n \} \quad (7)$$

$$z_i^- = (z_{i1}^-, z_{i2}^-, \dots, z_{in}^-) = \{ \min z_{ij} | i = 1, 2, \dots, n \} \quad (8)$$

随后,利用欧氏距离公式,计算每一评价对象  $j$  与正、负理想解之间的距离,即:

$$D_j^+ = \| z_{ij} - z_i^+ \| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - z_i^+)^2} \quad (9)$$

$$[D_j^- = \| z_{ij} - z_i^- \| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - z_i^-)^2}$$

进一步求得各评价对象  $j$  与理想解的相对贴近,即:

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (10)$$

最后,基于  $C_j^*$  值进行排序,其值越大,表示评价对象越优。

### 2.2 耦合协调度模型

借鉴容量耦合系数模型构建 NTU 和 WSR 的耦合协调度模型,具体公式为:

$$C = \left[ (U_1 \times U_2) / \left( \frac{U_1 + U_2}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2, D = \sqrt{C \times T}$$

式中: $C$ 为耦合度值( $0 < C < 1$ ); $U_1$ 、和  $U_2$  分别为 NTU 和 WSR 的综合发展得分; $T$ 为 NTU 与 WSR 的综合发展得分; $\alpha$ 、 $\beta$ 为各子系统权重系数,一般认为 2 个系统同等重要,因此, $\alpha = \beta = 0.5$ <sup>[31]</sup>。 $D$ 为耦合协调度值,反映 NTU 和 WSR 之间交互耦合的协调程度; $D$ 值越低,表明 NTU 和 WSR 之间协调性越低,相互间的冲突越大。参照相关研究<sup>[31-32]</sup>成果,将  $D$  划分为 4 大类和 10 个亚类;同时借鉴相关方法<sup>[31-32]</sup>,将耦合协调类型分为相应的发展类型,具体见表 2。

4) TOPSIS 法。TOPSIS 法(逼近理想解排序法)能够充分利用原始数据信息,具有操作简便、实用性强的特点,尤其适用于多属性、多目标的综合评价问题。因此,本文采用 TOPSIS 模型对长江经济带 NTU 与 WSR 系统耦合协调度进行测度。具体步骤:

首先,通过组合权重与标准化矩阵相乘,构建加权判断矩阵  $Z_{ij} = (z_{ij})_{m \times n}$ ,即:

### 2.3 Dagum 基尼系数

为深入解析 NTU 与 WSR 系统耦合协调度的空间差异来源,本文采用 Dagum 基尼系数( $G$ ),将总体差异分解为区域内( $G_w$ )、区域间( $G_{nb}$ )及超变密度( $G_t$ ) 3 个组成部分。计算公式为:

$$G = G_w + G_{nb} + G_t = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |a_{ji} - a_{hr}|}{2n^2 \sigma} \quad (12)$$

$$G_w = \sum_{i=1}^k \eta_i f_i G_{ii}, G_{ii} = \frac{1}{2n_i^2 \sigma_i} \sum_{h=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} |a_{ih} - a_{ir}| \quad (13)$$

$$G_{ij} = \frac{1}{n_i n_j (\sigma_i + \sigma_j)} \sum_{h=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_j} |a_{ih} - a_{jr}|$$

$$G_{nb} = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} (\eta_j f_i + \eta_i f_j) G_{ij} D_{ij}, \quad (14)$$

$$G_t = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} (\eta_j f_i + \eta_i f_j) G_{ij} (1 - D_{ij})$$

式中: $G$ 为总体差异; $a_{ji}$ 和  $a_{hr}$ 分别为  $i(j)$  区域内任意地区的耦合协调水平; $\sigma$ 为平均值; $n$ 为地区的个数; $G_w$ 为区域内差异; $G_{nb}$ 为区域间差异; $G_t$ 为超变密度差异; $\eta_i = n_i/n$ ;  $f_i = \eta_i \times \sigma_i/\sigma$ ;  $D_{ij} = (d_{ij} - p_{ij})/(d_{ij} + p_{ij})$ ,表示  $i, j$  的相对距离,  $d_{ij}$  为  $a_{ji} > a_{hr}$  条件下的差值,  $p_{ij}$  为  $a_{ji} < a_{hr}$  条件下的差值。

### 2.4 探索性空间数据分析

1) 全局 Moran's  $I$  指数。为识别新型城镇化与水资源韧性耦合协调度可能存在的空间关联特征,本文采用全局 Moran's  $I$  指数对其进行空间自相关性检验,具体计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha\beta} (x_\alpha - \bar{x})(x_\beta - \bar{x})}{\rho^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (15)$$

$$\rho^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中: $I$ 为全局 Moran's  $I$  值; $\rho^2$ 为方差; $x_i$ 、 $x_j$ 为研

究区域  $i, j$  的观测值 ( $i \neq j$ );  $n$  为研究区域内地区的数量;  $\bar{x}$  为观测平均值;  $w_{ij}$  为 Queen 邻接空间权重矩阵 (邻接为 1, 否则为 0); 全局 Moran's  $I$  指数的取值范围为  $[-1, 1]$ 。若 Moran's  $I$  值显著  $> 0$ , 说明区域内耦合协调水平呈正向空间依赖, 表现

出“高-高”或“低-低”的空间集聚特征; 反之, 若显著  $< 0$ , 则显示为负向空间关联, 即高值与低值相邻交错; 若 Moran's  $I$  值趋近于 0, 则表明空间分布呈现随机状态, 不具备显著的空间自相关性。

表 2 新型城镇化与水安全韧性耦合协调度等级分类及其子系统发展类型辨别标准

Table 2 Classification of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience and identification criteria of its subsystems' development types

协调程度	$D$	耦合协调类型	等级	NTU 和 WSR 发展关系	发展类型
高度协调	[0.9, 1.0)	优质协调型	I	$S(ntu) > S(wsr)$	I - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	I - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	I - NTU 滞后型
	[0.8, 0.9)	高度协调型	II	$S(ntu) > S(wsr)$	II - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	II - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	II - NTU 滞后型
基本协调	[0.7, 0.8)	中级协调型	III	$S(ntu) > S(wsr)$	III - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	III - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	III - NTU 滞后型
	[0.6, 0.7)	初级协调型	IV	$S(ntu) > S(wsr)$	IV - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	IV - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	IV - NTU 滞后型
过度类型	[0.5, 0.6)	勉强协调型	V	$S(ntu) > S(wsr)$	V - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	V - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	V - NTU 滞后型
	[0.4, 0.5)	濒临失调型	VI	$S(ntu) > S(wsr)$	VI - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	VI - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	VI - NTU 滞后型
失调衰退	[0.3, 0.4)	轻度失衡型	VII	$S(ntu) > S(wsr)$	VII - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	VII - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	VII - NTU 滞后型
	[0.2, 0.3)	中度失衡型	VIII	$S(ntu) > S(wsr)$	VIII - WSR 滞后型
				$S(ntu) = S(wsr)$	VIII - 同步发展型
				$S(ntu) < S(wsr)$	VIII - NTU 滞后型
[0.1, 0.2)	严重失衡型	IX	$S(ntu) > S(wsr)$	IX - WSR 滞后型	
			$S(ntu) = S(wsr)$	IX - 同步发展型	
			$S(ntu) < S(wsr)$	IX - NTU 滞后型	
[0, 0.1)	极度失衡型	X	$S(ntu) > S(wsr)$	X - WSR 滞后型	
			$S(ntu) < S(wsr)$	X - NTU 滞后型	

2) 局部 Moran's  $I$  指数。为进一步揭示新型城镇与水安全韧性耦合协调度可能存在的空间异质性, 本文借助局部 Moran's  $I$  指数识别其局部空间集聚特征。具体计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\rho^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (16)$$

式中:  $I_i$  为研究单元  $i$  的局部 Moran's  $I$  值,  $I_i > 0$  说明某研究地区的耦合协调度与周边单元的耦合协调度呈

正相关(相似值聚类);  $I_i < 0$  则说明呈现负相关(相异值异常);  $I_i$  不显著, 则说明随机分布。

### 2.5 XGBoost-SHAP 模型

为系统解析城镇化与水安全韧性耦合协调度 (CCD) 的复杂驱动机理, 本研究集成 XGBoost 机器学习模型与 SHAP 可解释性框架进行分析。XGBoost 作为一种基于梯度提升决策树的集成学习算法, 通过迭代生成弱学习器并不断修正预测残差

以实现模型优化,其目标函数中的正则化项能在保证预测精度的同时有效提升泛化能力,尤其擅长处理高维特征间的非线性关系与交互效应<sup>[22]</sup>,因而非常适用于模拟社会经济与自然要素交互作用下的人地系统耦合过程。然而,机器学习模型普遍存在“黑箱”问题,为此本研究进一步引入基于合作博弈论 Shapley 值的 SHAP 解释框架<sup>[33]</sup>,该框架通过公平量化不同特征组合对模型输出的边际贡献,为每个特征分配具解释性的 SHAP 值,从而不仅能够全局评估驱动因素的重要性,还可揭示单一因素的非线性作用路径与因素间的交互机制。XGBoost 与 SHAP 的结合实现从“高精度预测”到“机理解析”的跨越,为辨识核心驱动因子、探测非线性阈值及揭示交互效应提供可靠的方法支撑。

### 3 结果与分析

#### 3.1 NTU 与 WSR 耦合协调度的时空演变特征分析

##### 3.1.1 区域(上、中、下游)尺度耦合协调度的时空演变特征

1) 耦合协调度的时空演化特征 由表 3 可知,

表 3 2006—2023 年长江经济带新型城镇化与水安全韧性的综合指数及耦合协调度

Table 3 Comprehensive indices and their coupling coordination degree of new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt (2006-2023)

年份	NTU 指数	WSR 指数	上游 D 值	中游 D 值	下游 D 值	总体 D 值	发展类型 (总体)
2006	0.326	0.492	0.537	0.602	0.705	0.616	IV-NTU 滞后型
2007	0.329	0.485	0.564	0.587	0.694	0.618	IV-NTU 滞后型
2008	0.340	0.491	0.573	0.591	0.702	0.625	IV-NTU 滞后型
2009	0.350	0.492	0.583	0.609	0.695	0.631	IV-NTU 滞后型
2010	0.358	0.516	0.596	0.618	0.713	0.644	IV-NTU 滞后型
2011	0.401	0.543	0.633	0.652	0.732	0.674	IV-NTU 滞后型
2012	0.384	0.504	0.606	0.639	0.707	0.652	IV-NTU 滞后型
2013	0.385	0.568	0.645	0.653	0.720	0.674	IV-NTU 滞后型
2014	0.392	0.511	0.626	0.641	0.706	0.659	IV-NTU 滞后型
2015	0.391	0.514	0.614	0.651	0.711	0.659	IV-NTU 滞后型
2016	0.391	0.529	0.621	0.658	0.717	0.666	IV-NTU 滞后型
2017	0.390	0.539	0.635	0.650	0.716	0.669	IV-NTU 滞后型
2018	0.387	0.519	0.631	0.637	0.707	0.660	IV-NTU 滞后型
2019	0.394	0.520	0.632	0.649	0.714	0.666	IV-NTU 滞后型
2020	0.411	0.553	0.654	0.687	0.712	0.684	IV-NTU 滞后型
2021	0.403	0.526	0.633	0.669	0.712	0.671	IV-NTU 滞后型
2022	0.406	0.526	0.640	0.654	0.721	0.674	IV-NTU 滞后型
2023	0.406	0.509	0.626	0.668	0.709	0.667	IV-NTU 滞后型

空间格局上,三大区域核心指标始终保持“下游>中游>上游”的稳定排序,未出现位序逆转,呈现强“路径依赖”特征。NTU 指数下游平均值(0.398)较上游高 7.0%,WSR 指数下游平均值(0.532)较上游高 6.2%,

2006—2023 年,NTU 指数长期处于 0.326~0.411 的低位波动区间,累计增长 23.4%,2020 年达峰值 0.411 后小幅回落;WSR 指数持续维持 0.485~0.568 的较高水平,累计增长 8.5%,2013 年长江经济带战略实施后跃升至研究期峰值 0.568,此后稳定在 0.510 以上,凸显政策引导与基础设施支撑对水安全韧性的“高值稳定”效应。因二者增速差异显著,NTU 指数长期滞后于 WSR 指数,研究期内系统发展类型均为“IV-NTU 滞后型”,未突破中级协调阶段。

耦合协调度(D 值)总体呈稳步提升但波动明显的态势,由 2006 年 0.616 升至 2023 年 0.667,累计增幅 6.9%,演化过程可划分为 2 个阶段:2006—2010 年为“平缓爬升”阶段,年平均增幅 0.33%,受早期城镇化质量偏低与水安全投入不足制约;2011—2023 年进入“波动提升”阶段,年平均增长 0.28%,2011 年水利政策推动、2013 年长江经济带启动、2020 年生态文明建设攻坚 3 个关键节点,D 值分别达 0.674、0.674、0.684 的高点,但受极端水文事件与区域发展不均衡影响,高点后均出现回落(如 2012 年 D 值降至 0.652),反映系统协同状态对外部干扰的敏感性。

耦合协调度(D 值)下游平均值(0.712)较上游高出 18.3%。下游依托坚实经济基础、完善水利设施与高水平城镇化长期领跑;上游受生态保护与经济滞后双重约束,各项指标持续垫底;中游在缩小区域差距中发挥

枢纽作用,其 NTU 指数累计增长 23.8%,高于下游 (20.1%)与上游(19.4%),2013年后 WSR 指数跃升 7.3%,带动 D 值从 0.597 增至 0.668,累计增长 11.9%。上游 D 值波动最为剧烈,变幅达 21.8%,2006 年受西南大旱影响降至 0.537,2020 年随防汛投入加大回升至 0.654;下游 D 值累计增长仅 1.8%,但长期稳定在 0.700 以上高值区间,步入“高值低增”的协同均衡阶段。

2)空间差异分解及可视化验证 基于 Dagum 基

尼系数及其分解方法的分析结果(图 2、表 4)显示,2006—2023 年长江经济带 NTU 与 WSR 耦合协调度总体差异持续收窄,呈现均衡化发展趋势。研究期内总体基尼系数从 0.082 降至 0.050,累计降幅 39.0%,2020 年达研究期最低值 0.035,反映区域间耦合协调水平差距整体收敛、局部小幅波动的特征,与长江经济带跨区域协同政策的实施密切相关,水资源统筹调度与城镇化试点等举措有效抑制区域差异扩大。

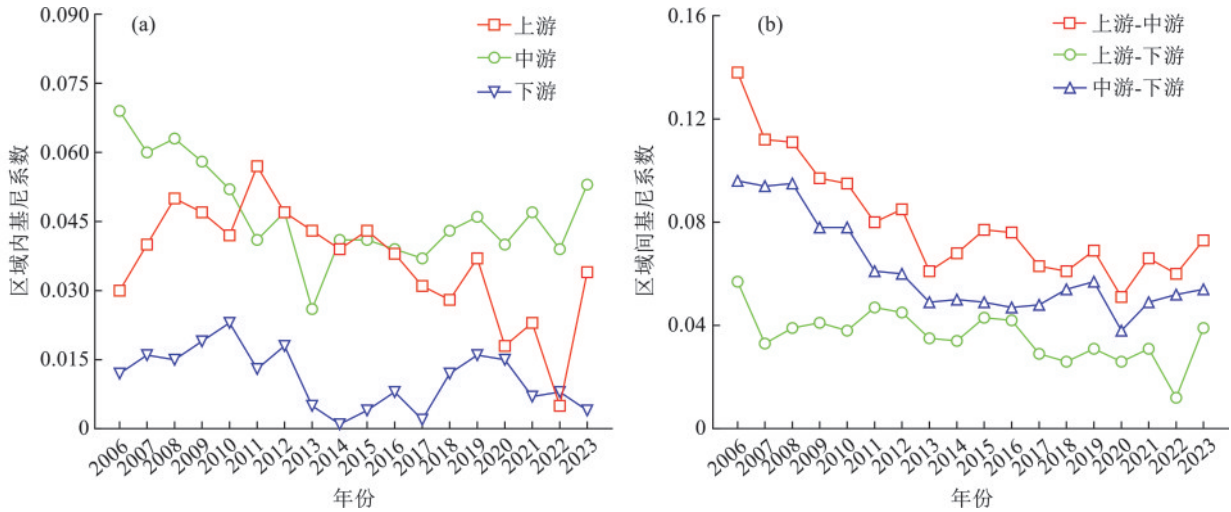


图 2 2006—2023 年长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的空间差异

Fig.2 Spatial differences of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt (2006-2023)

表 4 2006—2023 年长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的 Dagum 基尼系数及贡献率

Table 4 Dagum Gini coefficient and contribution rate of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt (2006-2023)

年份	基尼系数				贡献率/%		
	总体	区域内	区域间	超变密度	区域内	区域间	超变密度
2006	0.082	0.015	0.063	0.004	18.074	76.776	5.150
2007	0.071	0.015	0.049	0.007	21.161	69.232	9.607
2008	0.073	0.016	0.048	0.009	22.497	65.143	12.360
2009	0.065	0.016	0.041	0.009	23.810	62.465	13.725
2010	0.063	0.014	0.042	0.006	22.815	67.055	10.130
2011	0.056	0.014	0.034	0.009	24.523	59.852	15.625
2012	0.057	0.014	0.036	0.008	24.136	62.522	13.342
2013	0.042	0.009	0.026	0.007	22.174	61.478	16.348
2014	0.046	0.011	0.028	0.007	23.584	61.573	14.843
2015	0.050	0.012	0.034	0.005	22.881	67.348	9.771
2016	0.049	0.011	0.033	0.004	22.222	68.817	8.961
2017	0.041	0.009	0.028	0.004	22.225	67.035	10.740
2018	0.043	0.011	0.026	0.006	24.576	61.572	13.852
2019	0.048	0.012	0.028	0.008	25.552	58.783	15.665
2020	0.035	0.009	0.020	0.007	25.431	55.961	18.608
2021	0.043	0.010	0.027	0.006	23.024	63.275	13.701
2022	0.036	0.007	0.028	0.001	18.746	78.153	3.101
2023	0.050	0.012	0.029	0.009	23.721	57.899	18.380

从差异构成来看,区域间差异始终是总体差异的主导来源,贡献率为55.96%~78.15%,平均值为64.32%,显著高于区域内差异(平均值为22.68%)与超变密度(平均值为13.00%)。2022年区域间贡献率达峰值78.15%,同期区域内贡献率降至18.74%,进一步表明下游与中上游在经济基础、设施配套方面的差距是空间分异的核心成因。超变密度贡献率在2020年、2023年分别达18.61%、18.38%,反映区域间交叉重叠效应增强,部分省份发展定位模糊引发一定的“协同干扰”。

梯度演进层面,2006—2023年三大区域曲线逐步趋近,印证整体差异缩小趋势,但下游与上游曲线间距始终存在(2006年0.168,2023年0.083),未出现交叉融合,直观验证区域间差异的主导地位,凸显长

江经济带梯度发展格局的刚性约束特征。

### 3.1.2 省域尺度耦合协调度的时空演变特征

1) 耦合协调度的时空演化特征 2006—2023年,长江经济带各省(市)NTU与WSR耦合协调度呈现显著时空分异与动态收敛特征(图3)。时序上,2006年区域差距显著,协调度最高值(上海市0.789)与最低值(贵州省0.504)极差达0.285,呈“东高西低”阶梯式分布;2010—2011年为系统性跃升关键阶段,浙江省协调度达研究期峰值0.802,重庆市(0.709)、安徽省(0.649)等中西部省份同步显著提升,推动全域多数省份进入0.60~0.80协调区间;2012年后进入波动优化阶段,区域差距持续收窄,2023年全域极差[0.771(上海市)-0.596(云南省)=0.175]较2006年收窄38.6%,协同发展取得实质性进展。

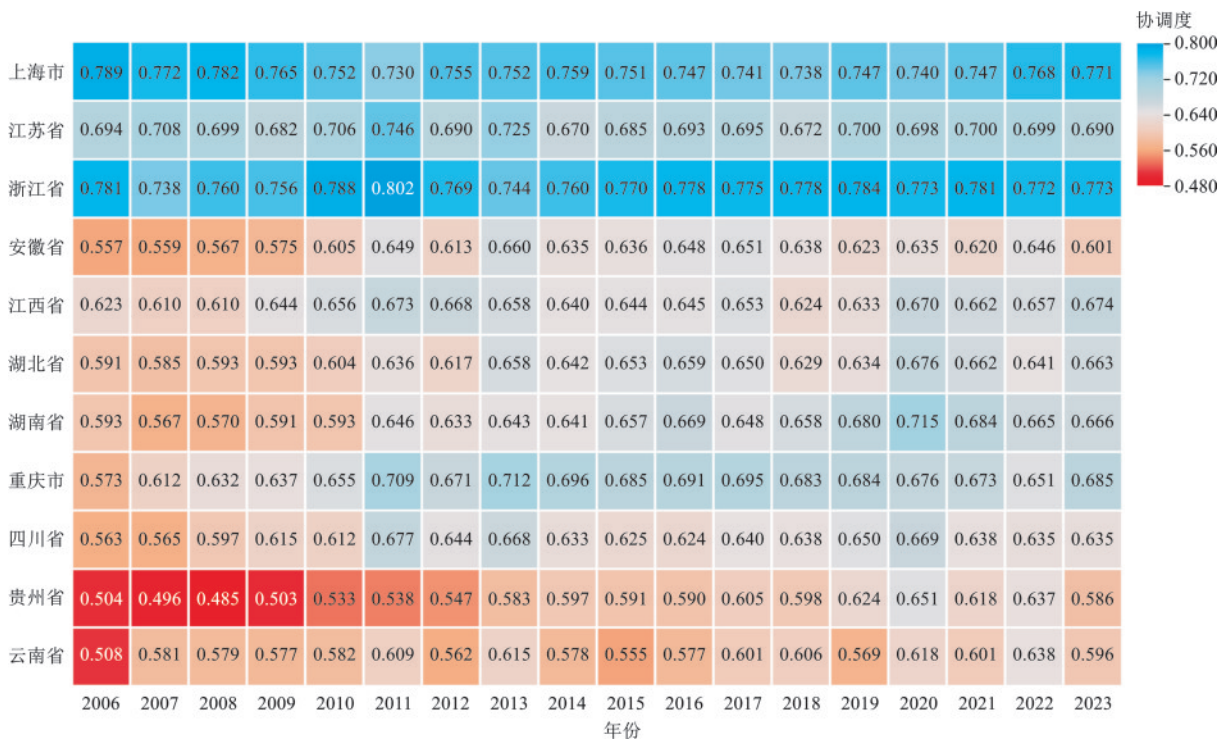


图3 2006—2023年长江经济带各地区新型城镇化与水安全韧性耦合协调度变化热点图

Fig.3 Heatmap of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in various regions of Yangtze River economic belt (2006–2023)

各省(市)演化轨迹各具特色,上海市、江苏省始终保持高值稳定,协调度长期高于0.700,上海市2006年达0.789,2023年仍维持0.771的高位,江苏省则稳定在0.720~0.750,彰显其坚实的经济基础与完善的水利设施支撑;浙江省2011年达峰值0.802后小幅波动,始终处于0.750以上高协调水平,水安全韧性建设与城镇化发展的适配性持续优化;安徽省从2006年0.557稳步增长至2017年0.651,此后维持在0.650左右,作为过渡省份实现稳步追赶;江西省、湖北省、湖南省三省同步提升,从2006年0.550~0.600逐步升至

2023年0.630~0.670,中游省份的协同发展动能持续释放;重庆市波动上升,2011年、2013年2次突破0.700,2023年稳定在0.680左右,成渝城市群建设与水安全补短板举措成效显著;四川省整体呈缓慢上升趋势,从2006年0.580左右升至2023年0.640,受生态保护与经济发展平衡约束,增速相对平缓;贵州省表现最为突出,从2008年谷底0.485持续攀升至2020年0.651,成为上游地区增幅最大省份,2023年维持在0.620以上,成功摆脱低协调水平;云南省虽基数较低,但稳步提升,从2006年0.520左右升至2023年

0.596,与高值区的绝对差距持续缩小。

空间格局上,下游地区内部异质性显著,上海市、江苏省、浙江省构成高值稳定区,形成核心引领带;安徽省与中游省份(江西省、湖北省、湖南省)构成持续提升的过渡带,协调度区间从0.550~0.620拓展至0.600~0.670;上游地区(重庆市、四川省、贵州省、云南省)为潜力增长带,基数偏低但增幅显著,与高值区绝对差距持续缩小。

2)耦合协调类型的时空演变特征 2006—2023年,长江经济带各省(市)NTU-WSR耦合协调类型呈现“滞后类型优化、协调等级提升”的演进趋势(表5)。2006—2009年为类型分化阶段:上海市、江苏省始终为Ⅲ-WSR滞后型,城镇化进程对水安全韧性系统持续形成压力;浙江省稳定为Ⅲ-NTU滞后型,水安全韧性建设适度超前;中西部省份多为Ⅴ-NTU滞后型,贵州省2007—2008年出现全域唯一的Ⅵ-NTU滞后型,凸显上游地区系统协同能力薄弱。

2010—2016年进入协调等级稳步提升期:安徽省、江西省、湖北省、湖南省由Ⅴ-NTU滞后型转为Ⅳ-NTU滞后型;重庆市2011年、2013年短暂进入Ⅲ-NTU滞后型,协同进程存在波动;四川省、云南省维持Ⅳ-NTU滞后型,协调水平稳步提升。

2017—2023年类型格局趋于稳定:贵州省、云南省多数年份转型为Ⅳ-NTU滞后型,仅2018年、2023年出现短暂回落;湖南省2020年首次进入Ⅲ-NTU滞后型,实现中游地区协调等级突破;上海市、江苏省、浙江省仍维持原有Ⅲ级协调类型,发展路径成熟;安徽省与江西省、湖北省稳定在Ⅳ-NTU滞后型,新型城镇化与水安全韧性适配性持续增强;重庆市稳定为Ⅳ-NTU滞后型,协同发展稳定性显著提升。

空间演化上,下游核心区(上海市、江苏省、浙江省)类型高度稳定,始终维持Ⅲ级协调;安徽省与中游省份协调等级从Ⅴ级演进至Ⅳ级,适配性持续增强;上游4省(重庆市、四川省、贵州省、云南省)类型在波动中优化,贵州省、云南省成功摆脱Ⅵ级滞后状态,但可持续发展基础仍需巩固。

### 3.2 NTU与WSR耦合协调度的空间关联特征分析

3.2.1 全局空间自相关分析 全局空间自相关分析结果(表6)显示,2006—2023年长江经济带NTU与WSR耦合协调度的Moran's *I*指数持续为正但呈波动下降趋势,从0.517 6降至0.246 2,累计降幅52.4%,反映空间集聚性系统性减弱,印证“新型城镇化均衡推进”与“水安全协同治理”的政策成效<sup>[9]</sup>。2014年为关键节点,空间相关性由显著转为不显著,标志“共抓大保护、不搞大开发”战略引导下,上游地区发展有效

打破原有空间集聚格局。2022年指数短暂回升至0.431 3,归因于《长江流域水安全保障规划》<sup>[4]</sup>等政策密集实施;2023年再度回落,表明空间依赖性格局被进一步打破,空间分布持续向随机化、均衡化演进。此过程证实政策干预是驱动空间格局阶段性演变的关键外力,而市场与区域系统内在协调力量主导长期均衡化方向,与周密等<sup>[34]</sup>研究结论相符。

3.2.2 局部空间自相关分析 全局Moran's *I*指数下降反映整体均衡化趋势,但潜藏局部尺度复杂空间异质性。基于2006—2010年、2011—2015年、2016—2023年3个时段的局部空间自相关分析(图4)显示,耦合协调度空间呈现“核心引领、梯度过渡、低值突破”的典型特征,且随时间持续优化。

2006—2010年,浙江省率先形成“高-高”集聚区,成为首个协调发展高地;安徽省为“低-高”异常区,承接核心区外溢但自身协调水平未同步提升;重庆市为“低-低”集聚区,上游协同发展薄弱。2011—2015年,上海市加入“高-高”集聚区,形成“双核联动”,核心区优势进一步增强;中游(湖北省、江西省)开始出现交互效应,人文机制向内陆延伸,区域联动初步形成;安徽省仍为“低-高”异常区,重庆维持“低-低”集聚区。2016—2023年,高值集聚扩散至江苏省、安徽省等地,核心区辐射效应显现;安徽省“低-高”异常区消失,实现从“被动接收”向“主动融入”转变;重庆市“低-低”集聚区彻底消失,上游通过成渝城市群建设与水安全补短板实现低值突破。

综上,长江经济带耦合协调度空间格局未走向“两极分化”,而是在核心区辐射强化、过渡区融入加速与低值区局部突破的复合机制下,逐步构建“全域协同、梯度衔接、均衡提升”的网络化空间结构,实证长江经济带发展战略在区域协同与均衡发展中的双重成效<sup>[9]</sup>。

### 3.3 NTU与WSR耦合协调驱动机理解析:基于XGBoost-SHAP模型

#### 3.3.1 驱动变量选取与统计描述

为系统解析耦合协调度(CCD)驱动机制,借鉴既有研究<sup>[35-36]</sup>,遵循“外部环境-内部系统”框架,选取2类驱动因子(表7),外部环境维度含气温(Temp)、降水量(Precip)、环保投资力度(EPII)、城乡居民收入差距(URIG);内部系统维度通过障碍度模型筛选基础设施水平(InfraL)、建成区面积比重(BAP)、水旱灾害受灾面积占比(PFDAA)、产水模数(WYM)、生态用水占比(PEWU)5类核心因子。描述性统计显示,2006—2023年研究区CCD平均值为0.652,标准差为0.070,区域差异明显;各驱动因子取值分布范围较广,为探测非线性影响提供良好基础。

表 5 2006—2023 年长江经济带各地区新型城镇化与水安全韧性耦合协调类型演化  
Table 5 Evolution of coupling coordination types of new-type urbanization and water security resilience in various regions of Yangtze River economic belt (2006-2023)

年份	上海市	江苏省	浙江省	安徽省	江西省	湖北省	湖南省	重庆市	四川省	贵州省	云南省
2006	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2007	III - WSR 滞后	III - WSR 滞后	III - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	VI - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2008	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	VI - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2009	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2010	III - WSR 滞后	III - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2011	III - WSR 滞后	III - WSR 滞后	II - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2012	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2013	III - WSR 滞后	III - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2014	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2015	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2016	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2017	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2018	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2019	III - WSR 滞后	III - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后
2020	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2021	III - WSR 滞后	III - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2022	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后
2023	III - WSR 滞后	IV - WSR 滞后	III - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	IV - NTU 滞后	V - NTU 滞后	V - NTU 滞后

注: II、III、IV、V、VI 分别为 NTU-WSR 耦合协调等级。

表 6 2006—2023 年长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的全局 Moran's  $I$  指数  
Table 6 Global Moran's  $I$  of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt (2006-2023)

年份	Moran's $I$	方差	$Z$	$p$
2006	0.517 556	0.046 401	2.866 914	0.004 145
2007	0.414 660	0.046 745	2.380 422	0.017 293
2008	0.399 518	0.045 578	2.339 781	0.019 295
2009	0.391 696	0.045 532	2.304 289	0.021 206
2010	0.443 686	0.046 244	2.528 247	0.011 463
2011	0.369 670	0.043 537	2.250 941	0.024 389
2012	0.434 442	0.046 675	2.473 754	0.013 370
2013	0.430 280	0.048 254	2.414 000	0.015 778
2014	0.293 311	0.045 573	1.842 391	0.065 418
2015	0.361 911	0.044 948	2.178 718	0.029 353
2016	0.349 496	0.045 587	2.105 253	0.035 269
2017	0.357 966	0.044 661	2.167 055	0.030 231
2018	0.250 246	0.042 088	1.707 235	0.087 778
2019	0.248 406	0.044 604	1.649 671	0.099 010
2020	0.161 519	0.044 742	1.236 365	0.216 323
2021	0.267 921	0.044 752	1.739 203	0.081 999
2022	0.431 310	0.042 400	2.580 282	0.009 872
2023	0.246 204	0.046 780	1.600 665	0.109 451
2006—2010	0.454 221	0.046 286	2.576 080	0.009 993
2011—2015	0.419 741	0.046 737	2.404 134	0.016 211
2016—2023	0.309 673	0.044 154	1.949 632	0.051 220

### 3.3.2 基于 SHAP 模型的解释性分析

1) 核心驱动因素的识别与贡献度解析 SHAP 模型特征重要性排序结果(图 5a)显示,各驱动因子对 CCD 的贡献率差异显著。基础设施水平(InfraL)与城乡居民收入差距(URIG)为核心驱动力,贡献率分别为 36.78%、28.74%,共同解释系统约 65.52% 的变异,凸显社会经济要素的主导作用。其余因子贡献率均低于 7%,可分为 2 类:关键环境约束因子(水旱灾害受灾面积占比 PFDA、降水量 Precip),贡献率均为 6.90%;次要影响因子(产水模数 WYM、建成区面积比重 BAP,均为 5.75%;气温 Temp、生态用水占比 PEWU,均为 3.45%;环保投资力度 EPII,2.30%)。

从 SHAP 依赖分布(图 5b)来看,各因子作用模式存在明显分异,InfraL 的 SHAP 值密集分布于零轴右侧且绝对值较高,为 CCD 提升的稳健促进因子;PFDA 点集多集中于零轴左侧,构成刚性约束;二者

散点分布集中、趋势一致,影响具有区域普适性,政策干预预期效果明确。URIG 呈现复杂非线性关系,高值多对应正向影响,低值多表现为抑制作用,与 EPII 类似,散点广泛分布于正负区间,作用方向与强度高度依赖地方发展实际。Temp、Precip、WYM 的 SHAP 值分布离散,自然要素影响存在显著空间异质性,需与人文社会因素协同发挥作用。PEWU 与 BAP 影响范围有限,多数样本中 SHAP 值趋近于 0,整体贡献较低但可能在特定局部情境下发挥调节功能。

2) 单因素非线性影响路径与阈值效应 SHAP 依赖关系图(图 6)解析显示,社会经济与环境约束类因子主导 CCD 基本演化方向。社会经济类因子呈现典型“适度区间”特征,InfraL 在 40~60 区间对 CCD 促进作用最显著,偏离则效应减弱或转为抑制;URIG 以 3 为临界点,低于该阈值促进 CCD 发展,超过后因资源环境压力加剧转为抑制。环境约束类因子整体表现为稳定负向影响:PFDA 抑制作用随数值升高而增强;WYM 以负向影响为主,仅在极低值( $<0.05$ )时因“资源冗余”呈现微弱正向波动;PEWU 表现为持续负向约束。

自然本底与城镇政策类因子塑造 CCD 空间分异格局,自然本底类因子存在明确适宜范围,Precip 在 1 000~1 500 mm 对 CCD 有正向贡献,偏离则转为抑制;Temp 以 15 °C 为关键阈值,高于此值促进协调发展,低于则产生抑制。城镇与政策类因子影响凸显复杂性,BAP 在 0.1 以下时促进 CCD,超过后因热岛效应与资源压力转而抑制;EPII 未呈现一致影响方向,效果高度依赖投资效率与结构,仅精准投向绿色基建与水安全领域方能实现促进作用。上述结果揭示各驱动因子对 CCD 影响的复杂非线性特征,为理解城镇化与水安全韧性耦合关系提供新认知。

3) 多因素交互协同与拮抗机制 为深入探究多因子间的协同与拮抗机制,本研究在单因素分析基础上,进一步采用 SHAP 交互作用模型进行解析。SHAP 交互作用模型分析(图 7)显示,6 组交互强度最高的特征组合均通过显著性检验( $p < 0.05$ ),且多组呈现“线性与非线性双显著”特征,构成影响 CCD 的复杂驱动网络。社会经济要素交互中,URIG 与 InfraL (线性显著)呈典型协同特征:URIG $<3$  与 InfraL $>40$  同时满足时产生显著正向协同效应,URIG $>3$  与 InfraL $<20$  组合时表现为协同抑制;URIG $\times$ PFDA (非线性显著)展现拮抗效应,URIG $>3$  与 PFDA $>0.1$  共同作用形成“社会-自然”双重压力,强烈抑制 CCD。

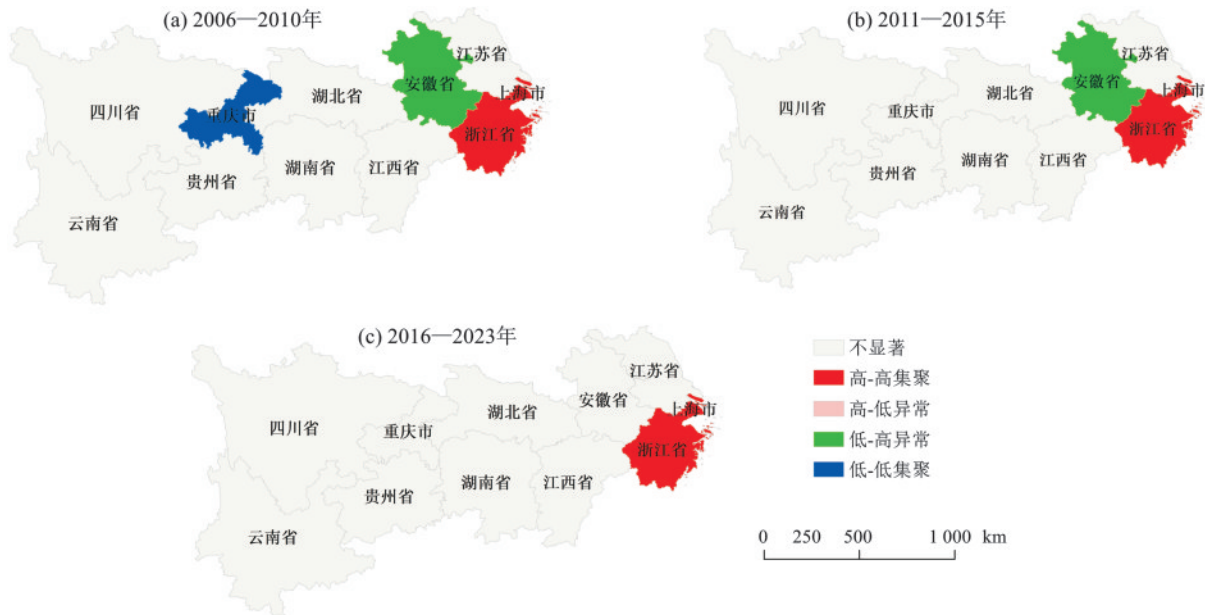


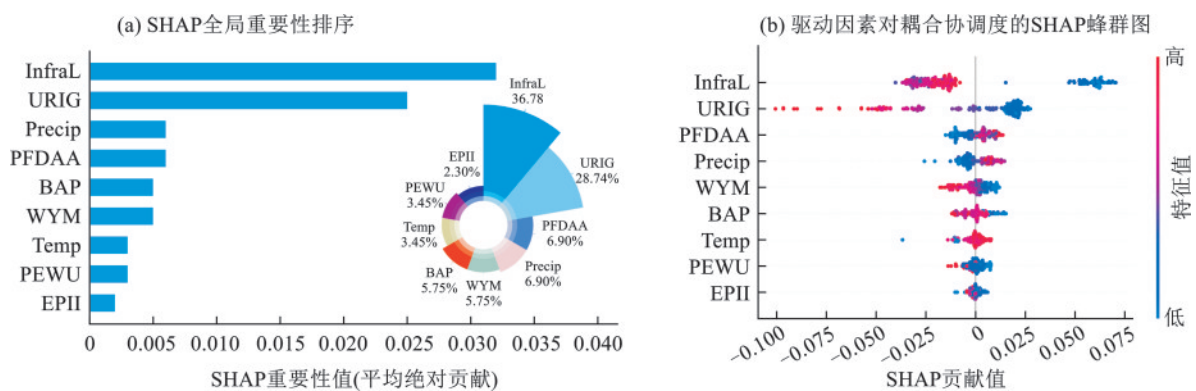
图 4 2006—2023 年长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的 LISA 聚类图

Fig.4 LISA cluster maps of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt (2006-2023)

表 7 驱动变量描述性统计

Table 7 Descriptive statistics of driving variables

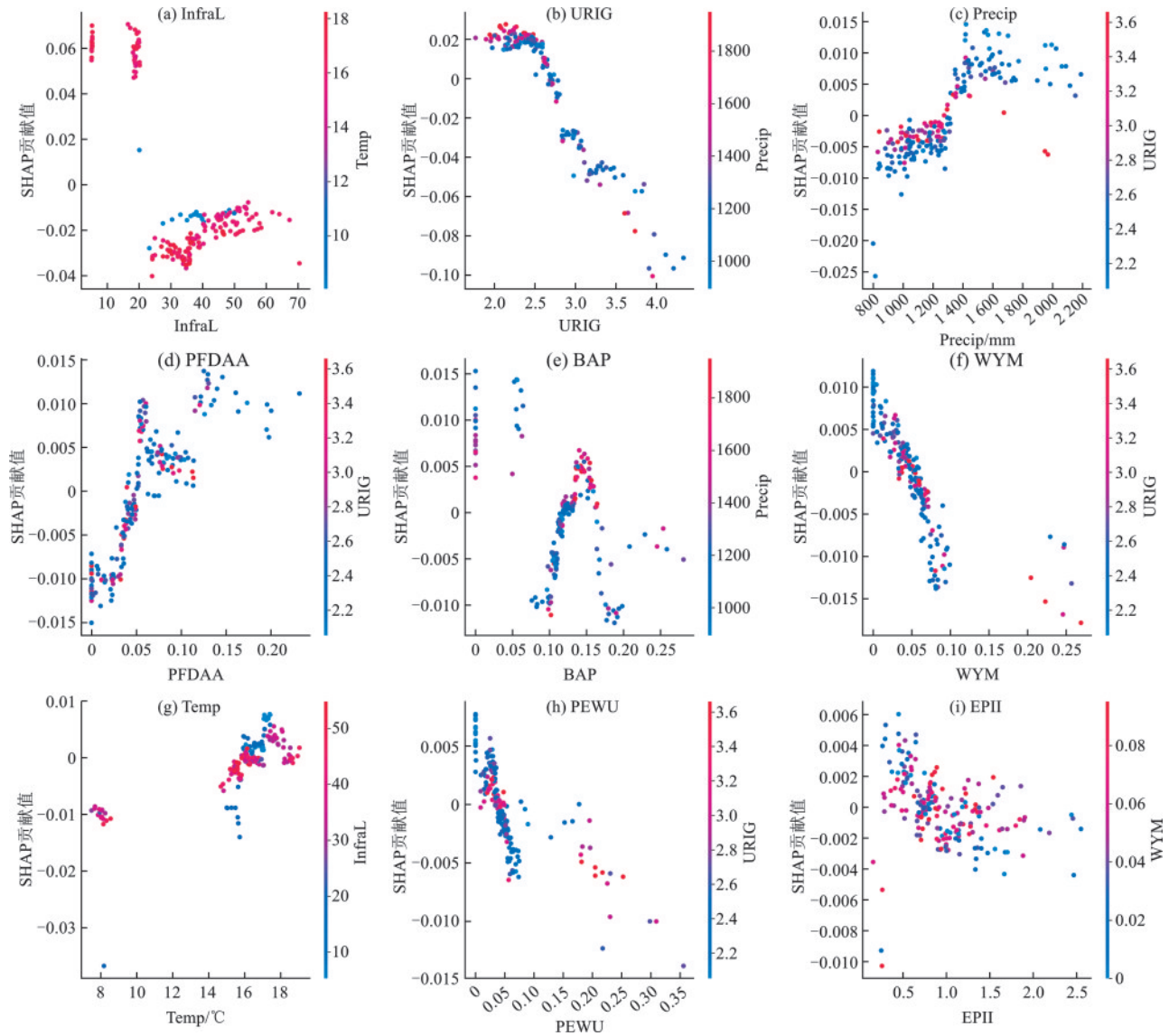
指标	缩写	观测数	平均值	标准差	最小值	最大值
耦合协调度	CCD	209	0.652 0	0.069 7	0.485 0	0.802 0
气温/℃	Temp	209	15.728 9	2.595 7	7.490 0	19.050 0
降水量/mm	Precip	209	1 284.868 0	298.687 7	798.500 0	2 189.000 0
环保投资力度	EPII	209	0.956 1	0.453 4	0.157 0	2.551 0
城乡居民收入差距	URIG	209	2.645 6	0.503 9	1.768 0	4.333 0
基础设施水平	InfraL	209	32.623 6	15.114 8	4.291 0	70.478 0
建成区面积比重	BAP	209	0.115 1	0.050 1	0	0.280 8
水旱灾害受灾面积占比	PFDA	209	0.061 4	0.044 9	0	0.231 8
产水模数	WYM	209	0.050 8	0.046 0	0	0.269 3
生态用水占比	PEWU	209	0.054 5	0.058 5	0	0.355 8



注:Temp、Precip、EPII、URIG、InfraL、BAP、PFDA、WYM、PEWU 分别为气温、降水、环保投资力度、城乡居民收入差距、基础设施水平、建成区面积比重、水旱灾害受灾面积占比、产水模数、生态用水占比。

图 5 长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的驱动因子分析

Fig.5 Driving factors analysis of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt



注: InfraL、URIG、Precip、PFDAAs、BAP、WYM、Temp、PEWU、EPII分别为基础设施水平、城乡居民收入差距、降水、水旱灾害受灾面积占比、建成区面积比重、产水模数、气温、生态用水占比、环保投资力度。

图 6 长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的单因素 SHAP 依赖关系

Fig.6 Single-factor SHAP dependence plots of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt

自然条件与基础设施交互中, Precip×InfraL(双显著)与 Temp×InfraL(线性显著)揭示环境与人为建设耦合机制; Precip处于1 000~1 500 mm适宜区间或 Temp高于15 ℃时,配合 InfraL>40的基础设施条件,可最大程度促进 CCD发展;自然条件偏离适宜区间与基础设施不足的组合则产生双重抑制。Precip×URIG(双显著)表明,适度降水与较小城乡差距(URIG<3)的组合能形成关键正向协同。

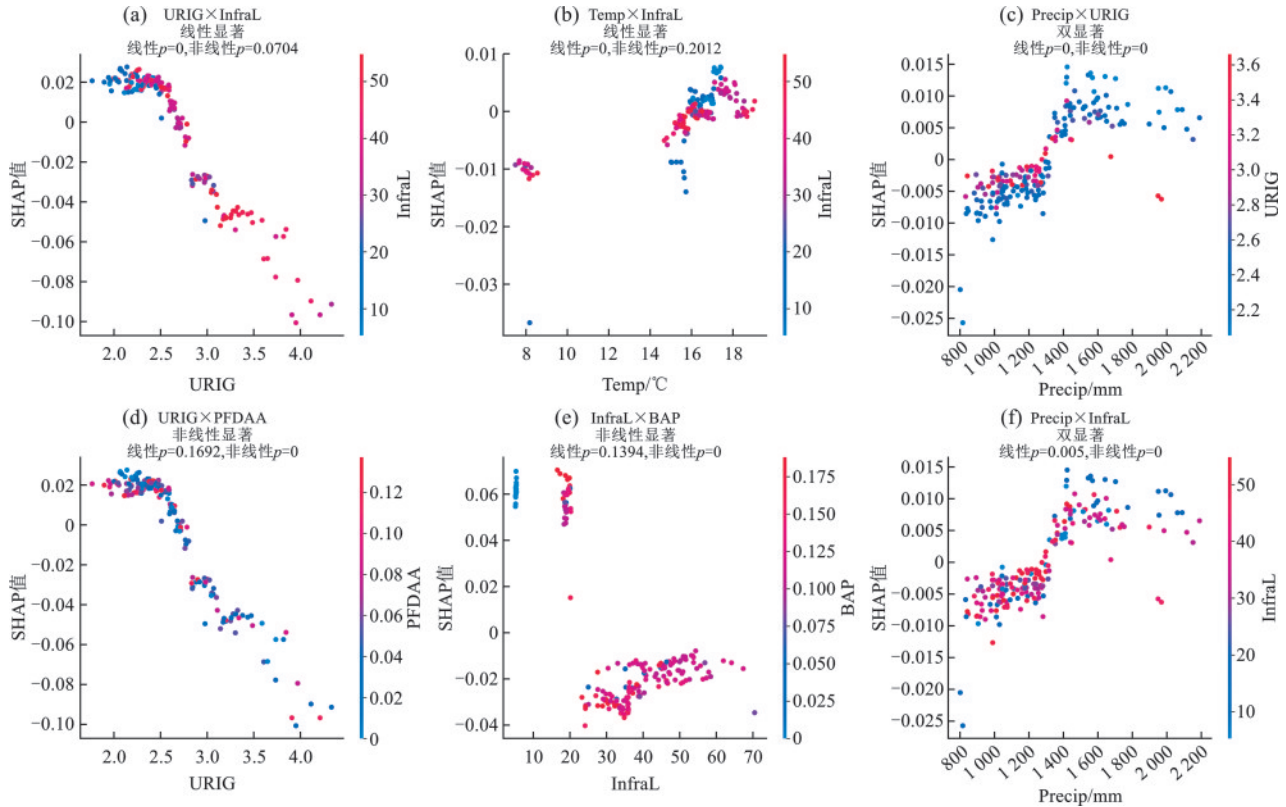
城镇内部要素匹配中, InfraL×BAP(非线性显著)反映基础设施建设与城市空间扩张的交互影响: InfraL处于40~60适度区间与 BAP<0.1合理扩张相结合,体现精明增长模式的正向协同;过度基础设施

建设配合建成区蔓延则导致资源压力加剧,形成负向协同效应。上述分析表明, CCD提升不仅取决于各因素独立作用,更受社会经济与自然要素、城镇内部子系统间复杂交互关系的共同制约。

4)驱动机制的时空异质性特征 为揭示核心交互作用的空间影响机制,本研究聚焦“气候-基建-城乡收入差距-灾害”传导链的3组关键交互项(Precip×InfraL、Precip×URIG、URIG×PFDAAs),空间显著性热点分析(图8)显示,驱动机制呈现“时间上由局部激活趋向全域协同,空间上由离散分布转为流域适配”的典型异质性。时序上分为3阶段: ①局部化阶段(2006—2010年),显著区集中分布于下游(安徽省、江苏省)、中游(湖北省、江西省)与上

游(重庆市、贵州省),交互作用彼此孤立,反映自然因子主导、协同性弱的初期特征;②扩散化阶段(2011—2015年),中游(湖北省、江西省)出现交互效应,人文机制向内陆延伸,区域联动初步形成但协同

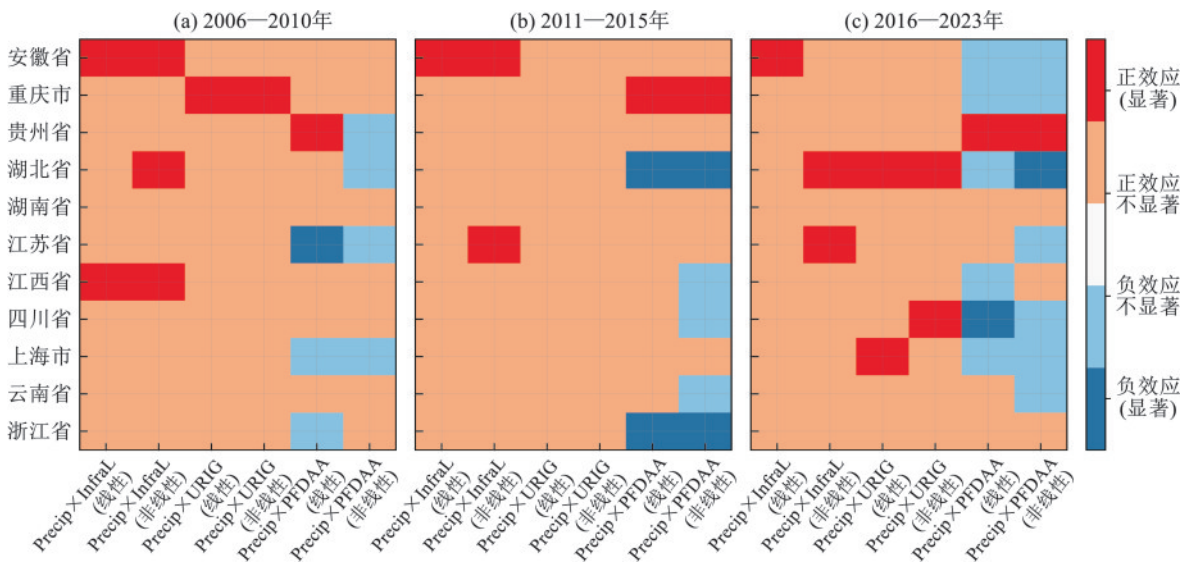
不充分;③全域化阶段(2016—2023年),交互作用覆盖 8/11 省份,上游贵州省与下游浙江省分别出现 URIG×PFDA A 正、负效应区,“自然-社会-灾害”,机制协同实现从“量扩”到“质提”的转变。



注:URIG×InfraL、Temp×InfraL、Precip×URIG、URIG×PFDA A、InfraL×BAP、Precip×InfraL 分别为城乡居民收入差距与基础设施水平、气温与基础设施水平、降水与城乡居民收入差距、城乡居民收入差距与水旱灾害受灾面积占比、基础设施水平与建成区面积比重、降水与基础设施水平这 6 组交互项。

图 7 长江经济带新型城镇化与水安全韧性耦合协调度的 SHAP 特征交互依赖关系

Fig.7 SHAP interaction dependence plots of coupling coordination degree between new-type urbanization and water security resilience in Yangtze River economic belt



注:线性Precip×InfraL项和非线性Precip×InfraL项分别反映了一次交互项(稳定的)和二次交互项(随变量取值变化的)的交互效应;所有效应的显著性水平为 $p < 0.05$ 。

图 8 2006—2023 年长江经济带分阶段 3 类核心交互作用热点图

Fig.8 Spatial heatmaps of three core interaction types in Yangtze River economic belt (2006-2023)

空间上,驱动机制与流域功能高度契合:①上游以 Precip $\times$ URIG(重庆市)与 URIG $\times$ PFDA(贵州省)为主,体现“自然冲击经人文分化传导并加剧灾害”,契合其生态脆弱、基建滞后的本底;②中游以 Precip $\times$ InfraL(江西省、湖北省)与 Precip $\times$ URIG(湖北省)为核心,呈现“自然-人文双驱动+社会传导”的均衡模式,呼应其过渡区位与发展阶段;③下游则以 Precip $\times$ InfraL(安徽省)持续驱动与 URIG $\times$ PFDA(江苏省、浙江省)为特征,反映其设施完善、城乡均衡与强抗灾能力。

## 4 讨论

### 4.1 时空演化的政策驱动与系统响应

耦合协调度“稳步提升、波动收敛”的演化特征,是政策干预与系统自组织共同作用的结果。时序上, $D$ 值在2011年水利政策、2013年长江经济带战略、2020年生态文明建设攻坚等关键节点形成高峰,印证宏观战略作为外部驱动力对系统耦合的显著调控作用<sup>[4]</sup>。而NTU指数的长期滞后,揭示新型城镇化从“规模扩张”向“质量提升”转型的艰巨性,与吕连菊等<sup>[13]</sup>的研究结论一致,表明水资源约束下的内涵式发展是当前核心瓶颈。

省域层面,上海市、江苏省凭借雄厚经济实力与完善水利基础设施,长期维持高耦合协调水平,其城镇化进程中注重水安全韧性协同建设,为流域提供“高值稳定”的发展范例;浙江省则通过超前的水安全韧性建设,形成“Ⅲ-NTU滞后型”协调模式,凸显水安全保障对城镇化高质量发展的支撑作用;江西省、湖北省、湖南省中游省份和下游安徽省持续发力,实现协调等级从V级向IV级的跨越,成为区域均衡发展的关键枢纽;重庆市、贵州省、云南省等上游省份虽基数较低,但通过成渝城市群建设、水安全补短板、生态补偿等举措,成功摆脱低水平协调状态,尤其是贵州省从谷底大幅攀升,彰显后发地区的发展潜力;四川省受生态保护与经济发展平衡的双重约束,协调水平提升相对平缓,反映生态优先背景下上游省份的发展困境。

空间上,“下游 $>$ 中游 $>$ 上游”的梯度格局虽具路径依赖特征,但Dagum基尼系数的收敛及中游地区的枢纽作用,标志区域均衡化趋势,此“核心-网络”式演进与周密等<sup>[34]</sup>提出的“区域协调网络传导机制”相契合,验证流域协同战略的实践成效。

### 4.2 空间关联的重构与政策效应的交织

全局空间相关性的减弱,标志传统地理集聚模式被打破,反映“共抓大保护”战略引导下的区域发

展格局重构。2014年后空间关联性由显著转为不显著,与张宁等<sup>[15]</sup>的观察相符,证实上游地区的治理有效突破“核心-边缘”结构。

局部格局的“核心引领-梯度过渡-低值突破”路径,生动刻画空间重构过程。浙江省、上海市形成的“高-高”集聚区及其辐射范围的扩大,体现中心城市的带动效应<sup>[37]</sup>;安徽省从“低-高”异常区融入协同网络,反映过渡省份承接外溢、实现自身提升的发展路径;重庆市摆脱“低-低”集聚,标志上游地区通过能力建设实现协同跃升,最终推动空间结构向全域协同的网络化体系演进。此空间重构过程,本质上是政策干预与市场机制共同作用的结果,为流域内各省份协同发展提供更广阔的空间载体。

### 4.3 复杂驱动机理与差异化治理启示

XGBoost-SHAP模型揭示,基础设施水平(InfraL)与城乡居民收入差距(URIG)是主导驱动力,凸显社会经济要素的核心地位。URIG以3为阈值的“双刃剑”效应,深刻揭示社会公平与系统协同的复杂关系,与WANG等<sup>[36]</sup>关于发展失衡负面影响的研究形成逻辑呼应。系列阈值(如InfraL:40-60, URIG:3)的识别,为“精准调控”提供了量化依据。

多因子间存在的复杂协同与拮抗交互(如URIG与PFDA的负向叠加),表明孤立政策可能失效,必须推行系统性协同治理。省域层面,下游省份应聚焦InfraL的智能化、绿色化升级与URIG的进一步缩小,巩固高协调水平;中游省份需强化Precip $\times$ InfraL、Precip $\times$ URIG的正向协同效应,筑牢水安全屏障;上游省份则应重点补齐InfraL短板,缓解URIG $\times$ PFDA的负向效应,坚守生态保护底线。

驱动机制在上、中、下游呈显著异质性,从根本上论证“一刀切”策略的局限性。各省份应基于自身驱动因子特征,制定差异化治理方案:上海市、江苏省、浙江省需优化协同机制,提升发展质量;安徽省、江西省、湖北省、湖南省应强化枢纽功能,促进区域联动;重庆市、四川省、贵州省、云南省需夯实基础,破解生态与发展的矛盾,为构建因地制宜的流域治理体系提供科学依据。

## 5 结论

1) 耦合协调度呈现显著的时空异质性与动态收敛性。从时序看,研究期内协调水平总体稳步提升,但新型城镇化(NTU)的系统性滞后是制约协同水平跃升的关键短板,表明城镇化进程已从速度规模导向转入亟需质量提升的新阶段。从空间看,严格的“下游 $\rightarrow$ 中游 $\rightarrow$ 上游”梯度分异格局凸显地理本底与经济发展水平的刚性约束,但Dagum基尼系数揭示

的区域差异收敛,以及中游地区的枢纽与过渡作用,共同印证区域协调发展战略在推动空间均衡上的积极成效。

2) 空间关联模式经历从集聚走向均衡的深刻重构。全局莫兰指数的持续下降,标志着依赖地理邻接的传统空间依赖格局被打破,空间分布趋于随机化与网络化。局部空间分析则清晰展现“核心区巩固引领、过渡区成功融入、边缘区有效突破”的动态图景,标志着流域正从单一的“核心-边缘”结构,向多中心、网络化的协同发展体系演进。

3) 系统驱动机理具有典型的非线性、交互性与异质性特征。基础设施水平与城乡居民收入差距是主导耦合协调度的两大核心驱动力。各驱动因子普遍存在明确的阈值效应(如URIG=3,InfraL=40-60),其影响并非简单的线性关系。更为关键的是,多因子间构成复杂的协同与拮抗交互网络,且该驱动机制在流域上、中、下游表现出与区域功能定位和发展阶段高度适配的异质性规律,从根本上揭示“一刀切”治理策略的失效。

本研究系统揭示长江经济带新型城镇化与水资源韧性的耦合协调机制,但仍存在一些合理拓展方向:在指标体系构建上,受省域面板数据可得性限制,“抵抗性-恢复性-适应性”三维框架中部分指标(如河流水质达标率、有效灌溉面积占比)的时空分辨率尚有提升空间,且未能充分纳入水利工程应急调度、水资源动态配置等反映系统运行过程的动态指标;在研究尺度上,当前分析聚焦区域与省域层面,对城市群、县域等微观尺度的空间异质性及其内在传导机制挖掘不足;在研究内容上,本研究侧重系统间整体耦合关系解析,对水资源韧性内部各子系统之间、及其与外部驱动因子的复杂交互逻辑探讨不够深入,也未量化各维度对系统协调状态的具体贡献。未来研究可整合多源数据,构建更具动态性与过程性的评价体系,开展多尺度、多情景比较分析,并运用系统动力学、结构方程模型等方法,揭示驱动因素的传导路径与反馈机制,定量评估政策干预效果及各维度贡献率,为长江经济带水安全与城镇化协同治理提供更具针对性、可操作性的决策支持。

基于上述结论,为推动长江经济带实现高水平的人水协调与可持续发展,本文提出政策建议为:1) 实施与区域禀赋精准适配的差异化治理策略。下游地区应聚焦系统优化,着力于城乡收入的进一步均衡与基础设施的智能化、绿色化升级。中游地区需强化其“承东启西”的传导功能,在承接产业转移的同时,筑牢水安全屏障,加强省际水利基础设施的互

联互通与灾害联防联控。上游地区则应坚守生态保护底线,将水资源承载力作为刚性约束,重点通过生态补偿与转移支付,补齐水利环保基础设施短板。

2) 推行基于阈值管理的精准调控与空间引导。政策制定应高度重视关键驱动因子的非线性规律。建议将“城乡居民收入比控制在3.0以内”“基础设施投入追求40~60的适度有效区间”等量化阈值作为区域发展规划的预警线与调控目标,实施前瞻性的政策干预,避免系统发展偏离协调轨道。同时,应强化国土空间规划的战略引领与刚性约束作用,确保城镇空间扩张与水资源分布、环境容量相匹配。3) 构建面向多因子交互效应的协同治理体系。必须破除行政与部门壁垒,建立跨领域、跨区域的协同治理机制。尤其在制定城乡统筹、产业布局、基础设施投资与灾害风险管理政策时,需系统评估其可能引发的连锁交互效应,推动政策工具从“单兵突进”转向“系统集成”。建议建立覆盖全域的“城镇化-水安全”智慧决策支持平台,实现数据共享与联动响应,最大化政策协同红利。4) 建立健全动态监测与适应性管理长效机制。面对气候变化与经济社会发展的不确定性,应构建耦合协调度的动态监测与风险评估体系。利用大数据与智能模型,对关键驱动因子和风险组合进行实时追踪与情景模拟,实现从静态规划向动态适应性管理的转变,从而持续提升长江经济带整体的发展韧性。

#### 参考文献:

- [1] 胡庆芳,张建云,金君良,等.城镇化水平效应与城市水安全韧性提升研究[J].中国工程科学,2024,26(6):131-139. HU Q F, ZHANG J Y, JIN J L, et al. Water balance effect of urbanization and countermeasures for enhancing urban water security resilience[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2024, 26(6): 131-139.
- [2] KAN D X, LÜ L. The impact of new urbanization on water ecological resilience: An empirical study from central China[J]. PLoS One, 2024, 19(12): e0313865.
- [3] WANG L, ZENG X, HUANG X Z. Dynamic coupling analysis of new-type urbanization and water resources security: A system dynamics-based empirical study from China[J]. Land Degradation & Development, 2026, 37(1): 81-103.
- [4] 秦尊文, 聂夏清. 长江经济带城镇化效率与水资源效率协调发展时空演变及驱动因素[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2237-2253. QIN Z W, NIE X Q. Spatial and temporal evolution and drivers of coordinated development of urbanization efficiency and water resources efficiency in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yang-

- tze Basin, 2023, 32(11):2237-2253.
- [5] 李明鸿, 卢辞. 淮河生态经济带新型城镇化、经济发展与水生态环境耦合协调关系及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6):282-293.  
LI M H, LU C. Coupling and coordination relationship between new urbanization, economic development, and ecological water environment in Huaihe River economic belt, and their driving factors[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6):282-293.
- [6] 黄烈佳, 鲁昭, 胡伟艳. 长江经济带城市空间“三生”功能耦合协调时空演化特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(4):687-698.  
HUANG L J, LU Z, HU W Y. Spatio-temporal coupling characteristics and influencing factors of "production-living-ecological" Functions of urban space in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(4):687-698.
- [7] 张恒, 林灏, 曹静茹. 基于PSIR模型的城市水生态韧性评价研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2025, 27(2):161-168.  
ZHANG H, LIN H, CAO J R. Research on urban water ecological resilience evaluation based on PSIR model[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Social Science), 2025, 27(2):161-168.
- [8] 李阳力, 陈天, 王高远. 基于DPSIR模型的水生态韧性评价与提升策略: 以天津市为例[J]. 城市学报, 2024, 2(3):36-51.  
LI Y L, CHEN T, WANG G Y. Water ecosystem resilience evaluation and promotion based on DPSIR model: Taking Tianjin as an example[J]. Journal of Urban Sciences, 2024, 2(3):36-51.
- [9] 李燕凌, 李民梁. 长江经济带新型城镇化与生态韧性: 耦合协调、时空格局及动态影响[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(11):2329-2341.  
LI Y L, LI M L. Coupling coordination, spatial-temporal patterns and dynamic impact of the new urbanization and ecological resilience in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(11):2329-2341.
- [10] 杨力, 徐悦, 朱俊奇, 等. 长江中游城市群水生态韧性及影响因素分析[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1):335-347.  
YANG L, XU Y, ZHU J Q, et al. Assessment of water ecological resilience and influencing factors in urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1):335-347.
- [11] MA X X, LI N, YANG H, et al. Exploring the relationship between urbanization and water environment based on coupling analysis in Nanjing, east China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(3):4654-4667.
- [12] CHANG Q L, SHA Y Y, CHEN Y. The coupling coordination and influencing factors of urbanization and ecological resilience in the Yangtze River delta urban agglomeration, China[J]. Land, 2024, 13(1):e111.
- [13] 吕连菊, 阚大学. 新型城镇化与水生态韧性的交互耦合及驱动因素: 基于中部地区研究[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(2):103-116.  
LYU L J, KAN D X. Interactive coupling and driving factors of new urbanization and water ecological resilience based on a study in central China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(2):103-116.
- [14] LU C P, JI W, HOU M C, et al. Evaluation of efficiency and resilience of agricultural water resources system in the Yellow River basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266:e107605.
- [15] 张宁, 王昱倩. 长江经济带新型城镇化与水环境耦合协调及其驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(3):572-583.  
ZHANG N, WANG Y Q. Coupling coordination and driving factors of new urbanization and water environment in Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(3):572-583.
- [16] LIU W X, HAOD Q, XUR F. Will new-type urbanization enhance sustainable potential of rural water resources in China? Based on an improved water poverty framework[J]. Agricultural Water Management, 2025, 307:e109256.
- [17] 辛晨宁, 汪勇政, 余浩然, 等. 安徽省新型城镇化与生态韧性耦合协调发展及影响因素研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学版), 2025, 19(1):76-85.  
XIN C N, WANG Y Z, YU H R, et al. The coupling and coordinated development of new-type urbanization and ecological resilience in Anhui Province and influencing factors[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2025, 19(1):76-85.
- [18] HANAFI A N, AZLI N A N, KADIR A F A, et al. Comparative study of machine learning models for load prediction and energy management[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2025, 13(8):293-306.
- [19] SOHAIL A, ARSHAD A, ALI NAQVI R, et al. Regional probabilistic threats: Assessing the impact of glacier melting on mental health using dynamic Bayesian networks[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2025, 11(2):e153.
- [20] SUN J, XU M J, SUO C, et al. Exploring socioeconomic and environmental coordination in the Yangtze River delta region using a game theory stepwise-cluster factorial coupling coordination model[J]. Scientific Reports, 2024, 14:e27420.
- [21] 刘同超, 吴丹. 黄河流域城市经济韧性与生态韧性的耦合协调关系研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(3):6-11.  
LIU T C, WU D. Study on the coupled coordination rela-

- tionship between economic resilience and ecological resilience of cities in the Yellow River basin[J]. *Yellow River*, 2024, 46(3):6-11.
- [22] CAI A Z, WANG L Y, ZHANG Y H, et al. Uncovering the multiple socio-economic driving factors of carbon emissions in nine urban agglomerations of China based on machine learning[J]. *Energy*, 2025, 319: e134859.
- [23] 贺艳华, 刘聪, 周国华, 等. 长江经济带城乡居民福祉测度及其差异[J]. *热带地理*, 2021, 41(2):327-339.
- HE Y H, LIU C, ZHOU G H, et al. The gap between the well-being of urban and rural residents in the Yangtze River economic belt [J]. *Tropical Geography*, 2021, 41(2):327-339.
- [24] 邵超峰, 陈思含, 高俊丽, 等. 基于SDGs的中国可持续发展评价指标体系设计[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4):1-12.
- SHAO C F, CHEN S H, GAO J L, et al. Design of China's sustainable development evaluation index system based on the SDGs[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(4):1-12.
- [25] 后含玉, 康亚梨, 兰海. 新型城镇化与水资源承载力耦合协调的空间联系: 基于长江经济带的实证[J]. *人民长江*, 2023, 54(9):1-10.
- HOU H Y, KANG Y L, LAN H. Spatial relationship between coupling and coordination development of new urbanization and water resource carrying capacity: Case of Changjiang River economic belt [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(9):1-10.
- [26] 詹成, 郭明晶, 周文潇, 等. 长江经济带新型城镇化与空气污染的脱钩分析[J]. *生态经济*, 2025, 41(1):140-148.
- ZHAN C, GUO M J, ZHOU W X, et al. Decoupling analysis of new urbanization and air pollution in the Yangtze River economic belt [J]. *Ecological Economy*, 2025, 41(1):140-148.
- [27] 杨亚锋, 王红瑞, 曹永强, 等. 可变TOPSIS水安全韧性三支决策方法及应用[J]. *水科学进展*, 2024, 35(4):595-605.
- YANG Y F, WANG H R, CAO Y Q, et al. Variable TOPSIS three-way decision approach for water security resilience and its application [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(4):595-605.
- [28] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2024.
- National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2024.
- [29] 国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2024.
- National Bureau of Statistics. *China urban statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007—2024.
- [30] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2024.
- National Bureau of Statistics, Ministry of Ecology and Environment. *China environment statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007—2024.
- [31] 谢海浪, 赵伟, 江雅婷, 等. 城镇生态化视角下三峡库区人口-经济-环境(PEE)耦合协调发展[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4):209-221.
- XIE H L, ZHAO W, JIANG Y T, et al. Coupling coordination of population-economic-environmental (PEE) in the Three Gorges Reservoir area from the perspective of urban ecologicalization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4):209-221.
- [32] 唐晓灵, 林敏, 刘雷磊. 基于博弈论组合赋权-TOPSIS法的采矿方案优选模型及应用[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(5):5-10.
- TANG X L, LIN M, LIU L L. Mining method optimization model and application based on game theory combined with weighting-TOPSIS method [J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(5):5-10.
- [33] 叶淼, 朱琳, 刘旭东, 等. 基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演[J]. *环境科学*, 2024, 45(4):2280-2291.
- YE M, ZHU L, LIU X D, et al. Hyperspectral inversion of soil organic matter content based on continuous wavelet transform, SHAP, and XGBoost [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4):2280-2291.
- [34] 周密, 张心贝, 郭佳宏. 区域协调网络的特征、传导机制与发展路径优化[J]. *经济地理*, 2024, 44(5):12-21.
- ZHOU M, ZHANG X B, GUO JIA H. Characteristics, transmission mechanisms and development path optimization of the regional coordination network [J]. *Economic Geography*, 2024, 44(5):12-21.
- [35] DU X W. Can environmental regulation promote high-quality economic development? Evidence from China [J]. *Economic Analysis and Policy*, 2023, 80:1762-1771.
- [36] WANG S, WU C, FU B Y. The dual effects of digital inclusive finance on the urban-rural income gap: An empirical investigation in China's Yangtze River delta region [J]. *Finance Research Letters*, 2024, 69: e106049.
- [37] 肖圣, 多玲花, 邹自力. 城镇化与水生态环境耦合协调时空演变及驱动因素: 以长江中下游城市群为例[J]. *上海国土资源*, 2022, 43(3):61-68.
- XIAO S, DUO L H, ZOU Z L. Spatio-temporal evolution and driving factors of the coupling coordination between urbanization and water ecological environment: Take the urban agglomeration in the middle and lower reaches of the Yangtze River as an example [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2022, 43(3):61-68.