珠江流域城市群水资源生态韧性与数字经济耦合测度及跃迁路径

孟彦菊[1], 郭朔彤[1], 郑瑞杰[2], 何函芮[3], 侯 威[1]
(1.云南财经大学 统计与数学学院, 云南 昆明 650221;
2.首都经济贸易大学 经济学院, 北京 100070; 3.玉溪师范学院 数理学院, 云南 玉溪 653100)

摘 要: [目的]探究2011—2023年珠江流域城市群水资源生态韧性与数字经济耦合协调发展的时空演进特征及其跃迁路径,为该区域统筹生态保护与高质量发展提供差异化治理策略与决策依据。[方法]通过构建指标体系,运用投影寻踪模型、耦合协调模型、马尔可夫链模型开展研究。[结果]①珠江流域城市群水资源生态韧性和数字经济两个系统均呈现上升趋势,全流域耦合协调度介于0.2~0.7,呈现"数字经济越发达,协调度越高"的梯度特征。②从空间分布上看,珠江流域耦合协调度呈现"东南高,西北低"的空间分布和演变格局,主要从东南部向四周扩散。③从跃迁路径上看,珠江流域耦合协调度呈稳态递增,其跃迁轨迹显著受制于邻域状态,即高耦合协调状态施加正向辐射,低耦合协调状态则产生负向抑制。[结论]珠江流域城市群应在发展数字经济的同时,关注水资源生态韧性,实行差异化政策,确保两系统耦合协调度良性发展,以满足生态环境高水平保护和经济高质量发展的需求。

关键词: 水资源生态韧性; 数字经济; 耦合协调模型; 马尔可夫链模型; 珠江流域城市群
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0178-11 **中图分类号:** X24,F127, TV882.4

文献参数: 孟彦菊, 郭朔彤, 郑瑞杰, 等.珠江流域城市群水资源生态韧性与数字经济耦合测度及跃迁路径[J].水土保持通报,2026,46(5):178-188. Meng Yanju, Guo Shuotong, Zheng Ruijie, et al. Coupling measurement and transition path of water resources ecological resilience and digital economy in urban agglomerations of Pearl River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):178-188.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.011 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.011**

Coupling measurement and transition path of water resources ecological resilience and digital economy in urban agglomerations of Pearl River basin

Meng Yanju[1], Guo Shuotong[1], Zheng Ruijie[2], He Hanrui[3], Hou Wei[1]
(1.*School of Statistics and Mathematics, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming, Yunnan* 650221, *China*; 2.*School of Economics, Capital University of Economics and Business, Beijing* 100070, *China*; 3.*Department of Mathematics, Yuxi Normal University, Yuxi, Yunnan* 653100, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics and transition paths of the coupled coordination between water resources ecological resilience and the digital economy in the Pearl River basin urban agglomerations from 2011 to 2023 were explored in order to provide differentiated governance strategies and a decision-making basis for coordinating ecological protection and high-quality development in this region. [Methods] An index system was constructed, and the projection pursuit model, coupling coordination model and Markov chain model were applied. [Results] ① Both water resources ecological resilience and the digital economy in Pearl River basin urban agglomerations showed upward trends, and the coupling coordination degree across the basin ranged from 0.2 to 0.7, showing a gradient characteristic in which more developed digital economies had

收稿日期:2025-04-29 **修回日期:**2026-03-20 **采用日期:**2026-03-21
资助项目:国家社会科学基金项目"基于多区域投入产出模型的珠江流域城市群生态补偿研究"(20BTJ001);云南省教育厅科学基金(教师类)项目(2023J0665);云南财经大学2025年科学研究基金新进人才项目(2025D44);云南省基础研究计划专项青年项目(202401AU070111);云南省教育厅科学研究基金项目(2024J0599)
第一作者:孟彦菊(1979—),女(汉族),河南省原阳县人,博士,教授,主要从事宏观经济统计与投入产出等方面研究。Email:myj@ynufe.edu.cn。
通信作者:郑瑞杰(1998—),男(汉族),广东省珠海市人,博士研究生,研究方向为复杂网络与经济统计。Email:13318492345@163.com。

higher coordination degrees. ② From the perspective of spatial distribution, the Pearl River basin coupling coordination degree showed a spatial distribution and evolution pattern of "high in the southeast and low in the northwest", mainly spreading from the southeast to the surrounding areas. ③ From the perspective of the transition path, the coupling coordination degree in the Pearl River basin showed a stable upward growth trend and was significantly constrained by the neighborhood state. This was manifested as the positive radiation effect of the high coupled and coordinated state and the negative inhibitory effect of the low coupled and coordinated state. [Conclusion] While developing the digital economy, Pearl River basin urban agglomerations should pay attention to water resources ecological resilience and implement differentiated policies to ensure the benign coupling and coordinated development of the two systems, so as to meet the demands of high-level ecological environment protection and high-quality economic development.

Keywords: water resources ecological resilience; digital economy; coupling coordination model; Markov chain model; Pearl River basin urban agglomerations

水生态系统对于人类生活环境、经济增长等可持续发展目标至关重要。然而,全球环境危机持续、叠加气候变化引发的水生态质量退化,对水生态系统形成双重胁迫。在此背景下,水资源生态韧性作为水生态系统抵御外界干扰、实现自我重组与恢复的核心能力,提升该能力对于维系流域生态安全具有关键意义。珠江流域作为国家重点保护水域之一,其生态系统服务价值与战略地位已形成广泛学术共识。该流域横贯云南、贵州、广西、广东等省区级行政区,多年平均径流量居全国水系第二位,蕴藏丰富的水能、矿产及水生物资源。然而,流域存在高强度取水、废水排放总量攀升及地下水超采等人类扰动,已对水资源系统健康构成现实威胁。数字经济通过技术创新与产业升级优化流域用水效率、削减污染负荷,并依托数字基础设施强化区域信息传递效率,推动水环境治理范式从"末端治理"向"源头防控"转型,进而为提升水资源生态韧性提供技术支撑[1]。基于此,科学探析数字经济与水资源生态韧性的耦合关系,对于筑牢珠江流域生态安全屏障,实现区域高质量发展具有重要的现实价值。

国内外学者围绕水资源生态韧性与数字经济已开展了大量研究,但因研究视角的不同,韧性的概念界定存在较大差异。主流文献将其界定为,流域水资源系统在面对自然灾害与人为污染双重胁迫时,所呈现的抵御冲击,吸收干扰,重组结构并恢复核心生态功能的动态适应能力[2]。该定义深度融合韧性的多维属性,涵盖抵抗力、适应力与转型力3个递进层次,并整合政策干预、技术创新与制度优化等多重路径,系统阐释水资源系统通过"状态—响应—治理"循环机制实现动态演化过程[3]。水资源生态韧性测度是评估流域生态稳定性,实现可持续发展目标的重要环节。鉴于水资源生态韧性与数字经济耦合系统受自然禀赋、社会经济等多重因素交互作用[4],构建科学系统的评价指标体系成为精准测度二者协调水平的前提基础。当前,相关研究主要基于"水资源-社会-经济"复合系统分析框架[5],构建抵抗力、恢复力与适应力三维评价指标体系,以系统量化其多元维度特征[6]。随着水资源生态韧性与社会经济发展关联度的深化,研究视角正经历从单一维度向系统耦合的范式转变。在耦合研究方面,既有文献基于耦合视角探讨了新型城镇化、经济发展与水资源生态韧性的协调关系及其动态演化特征[7]。然而,数字经济虽对流域生态建设具有关键支撑作用,其与水资源生态韧性的耦合协调研究仍显匮乏。具体而言,数字技术通过提升用水效率可增强生态韧性的适应性,而数字基础设施通过强化流域监控能力可提升其抵抗力[8]。上述研究表明,数字经济凭借产业升级与技术创新的驱动作用,能够间接增强水资源生态韧性,但二者相互作用机制与协同演化规律尚未得到系统阐释。因此,深入探讨二者的耦合协调机制,并将研究扩展至更多流域典型样本,对于揭示异质性规律与差异化治理对策具有重要意义。

综上所述,水资源生态韧性理论研究成果日臻丰富,但既有研究多聚焦黄河、长江流域,对珠江流域的系统性探讨相对匮乏;同时,缺乏数字经济与水资源生态韧性的耦合机制及动态跃迁分析,水资源生态韧性指标构建亦常忽略流域用水压力程度。鉴于此,本文以珠江流域为研究对象,聚焦数字经济与水资源生态韧性的耦合协调关系,通过构建涵盖用水压力、经济发展与资源禀赋的水资源生态韧性评价体系,运用耦合协调模型探究二者动态演化过程,并采用马尔可夫链揭示其状态跃迁机制,以期丰富流域生态韧性理论体系,为珠江流域统筹生态保护与高质量发展提供差异化治理策略与决策依据。

1 研究区概况

珠江流域地跨滇、黔、桂、粤4省区，总面积约4.50×10^5 km^2，年径流量居全国第二。流域西高东低、雨量充沛，现有通航河道1 088条，里程14 156 km。本文依《珠江志》(卷五)界定研究范围，结合经济发展与区位特征，将广东划分为粤中、粤东、粤西3个城市群，广西划分为桂林、南宁2个城市群，贵州、云南各为独立城市群。7大城市群功能定位梯次分明，粤中城市群集聚广东70%的GDP，担纲大湾区数字经济中枢；粤东城市群、粤西城市群分别借力轻工陶瓷、钢铁石化向新能源升级；南宁城市群依托西部陆海新通道打造向海经济走廊；桂林城市群以电子信息、生物医药驱动经济发展；贵阳城市群聚焦数据中心、智能终端两大千亿级产业；云南城市群以滇中新区为核心，通过绿色能源、有色金属、高原农产构建纵向经济带。

2 数据来源与研究方法

2.1 指标体系构建

韧性作为系统应对外部冲击与内部扰动的核心能力，其本质在于多维度条件下的动态适应与结构演化[9-11]，并已被广泛应用于经济与生态系统研究。生态韧性强调生态系统在干扰情境下的承载力、调节力与修复潜能，体现出“抵御—调整—恢复”的连续响应机制。基于此，本研究从抵抗力、适应力和恢复力3个维度构建水资源生态韧性指标体系(表1)，以全面刻画不同系统在外部冲击作用下的阶段性响应特征与系统性调节机制。

(1)抵抗力衡量系统面对外部压力时的初始承载能力，主要包括生态空间容量和污染负荷强度[12]。本研究从流域污染的角度出发，构建了农业用水压力、工业用水压力和生活用水压力3个二级指标，以量化城市群在生态扰动下的抵抗能力。借助“灰水足迹”概念[13]，将农业排放中的氮磷负荷、工业排放中的化学需氧量以及生活排放中的氨氮量转化为相应的用水压力。其表现为用水压力越小，珠江流域对外部扰动的抵抗能力越强，水资源生态韧性相应越高。

(2)适应力反映系统在污染治理、环境监测与废弃物管理等方面的调节与优化能力[14]。本研究从环境质量保障、经济发展保障和基础设施保障3类二级指标综合测度流域适应力。其中，环境质量保障包括城区绿化率、人均自然保护区面积、生态环境用水量、森林覆盖率和污水处理率；经济发展保障通过第三产业比例和地区生产总值增长率进行表征；基础设施保障则关注供水管网密度和污水处理率。

表1 水资源生态韧性指标体系

Table 1 Indicator system for water resources ecological resilience

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性
抵抗力	农业用水压力	化肥中的氮磷元素总量/kg	负向
		畜禽养殖业粪便和尿中氮磷元素总量/kg	负向
		畜禽养殖业粪便和尿中化学需氧量总量/kg	负向
	工业用水压力	工业废水中化学需氧量的排放量/kg	负向
		工业废水中氨氮元素的排放量/kg	负向
	生活用水压力	生活废水中化学需氧量排放量/kg	负向
		生活废水中氨氮排放量/kg	负向
适应力	环境质量保障	城区绿化率/%	正向
		人均自然保护区面积/(m^2·人$^{-1}$)	正向
		生态环境用水量/m^3	正向
		森林覆盖率/%	正向
		污水处理率/%	正向
	经济发展保障	第三产业比例/%	正向
		地区生产总值增长率/%	正向
	基础设施保障	供水管道密度/(km·km^{-2})	正向
		排水管道密度/(km·km^{-2})	正向
恢复力	水土资源禀赋	人均耕地面积/(m^2·人$^{-1}$)	正向
		人均水资源量/(m^2·人$^{-1}$)	正向
	社会治理投入	废水治理投资/万元	正向
		环保支出占地方财政支出比重/%	正向
		污水处理厂数量/个	正向
	水资源效率	万元GDP用水量/(m^3·万元$^{-1}$)	负向
		农业灌溉水有效利用系数	正向

(3)恢复力则体现系统在遭受损害后的再生与修复能力。恢复力不仅包括生态资源存量，还涉及生态治理投入等关键要素，从而全面揭示生态系统在扰动后的动态恢复过程[15]。本研究设置了水土资源禀赋、社会治理投入与水资源效率3项二级指标。水土资源禀赋通过人均耕地面积和人均水资源量表征生态本底；社会治理投入包括废水治理投资、环保支出占地方财政支出比重和污水处理厂数量，体现制度与资金保障；水资源效率则通过万元GDP用水量和农业灌溉水有效利用系数来衡量自我恢复的内生动力。

结合城市层面相关数据的可获得性，本研究从互联网发展和数字金融普惠两方面对数字经济综合发展水平进行测度。对于城市层面的互联网发展测度，借鉴赵涛[16]、黄慧群等[17]的方法，采用互联网普及率、相关从业人员情况、相关产出情况和移动电话普及率4个方面的指标。数字经济评价指标体系架构详见表2。

表 2　数字经济评价指标体系

Table 2　Evaluation index system for digital economy

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性
数字经济综合指数	互联网普及率	每百人互联网用户数/户	正向
	互联网相关从业人员数	计算机服务和软件从业人员比例/%	正向
	互联网相关产出	人均电信业务总量/(万元·人$^{-1}$)	正向
	移动互联网用户数	每百人移动电话用户数/户	正向
	数字金融普惠发展	中国数字普惠金融指数/%	正向

2.2　模型应用

2.2.1　投影寻踪模型

投影寻踪模型是一种处理和分析高维数据的统计方法,基本思想是将高维数据投影到低维子空间上,寻找出反映原高维数据的结构或特征的投影,以达到研究和分析高维数据的目的。它通过极大化或极小化选定的投影指标,寻找能够反映原始高维数据结构或特征的投影方向,并将高维数据投影到低维空间,再在低维空间对数据进行分析[18-19]。由于水资源生态韧性和数字经济指标体系的高维性及复杂性,本文采用此种方法对其进行测度。

2.2.2　耦合协调模型

耦合是指两个或两个以上的有关系统通过某种作用方式形成相互作用、相互影响进而实现相互联结的情况,即它们彼此通过某种内在机制产生一体化联动的现象,形成相互交织、相互作用的新的可持续复合系统。协调是指两个子系统之间产生物质、信息与能量的传输与转换,弥补两子系统之间原有的发展困境与不足,以系统的动态平衡促进系统之间的协调发展。耦合协调度模型可以综合度量两个及两个以上系统间的关联及协同水平,做出全面准确的评价。

参照郭扬[20]的耦合协调度计算公式

$$C=\sqrt{\frac{U_1U_2}{(U_1+U_2)^2}} \tag{1}$$

$$T=\alpha U_1+\beta U_2 \tag{2}$$

$$D=\sqrt{C\cdot T} \tag{3}$$

式中:U_1表示使用投影寻踪模型计算而得的水资源生态韧性综合指数;U_2表示数字经济发展水平综合指数;C表示水资源生态韧性与数字经济发展这两个系统的耦合度,分析两者相互作用和影响的强弱程度;T表示两者的协同度;α,β表示两个系统的权重,且$\alpha+\beta=1$。结合研究背景和多数学者研究[21-23],本研究中认为水资源生态韧性与数字经济发展同样重要,故取$\alpha=\beta=0.5$;D表示耦合协调度,取值范围为$[0,1]$,值越大表明两个系统耦合协调发展水平越高。本文归纳已有研究[24-25],将耦合协调度状态设置划分标准,具体内容见表3。

表 3　耦合协调度状态划分标准

Table 3　Classification criteria for coupling coordination degree status

区间	等级	区间	等级
[0.000,0.100)	极度失调(E_1)	[0.500,0.600)	勉强协调(E_6)
[0.100,0.200)	严重失调(E_2)	[0.600,0.700)	初级协调(E_7)
[0.200,0.300)	中度失调(E_3)	[0.700,0.800)	中级协调(E_8)
[0.300,0.400)	轻度失调(E_4)	[0.800,0.900)	良好协调(E_9)
[0.400,0.500)	濒临失调(E_5)	[0.900,1.000]	优质协调(E_{10})

2.2.3　马尔可夫链模型

传统的马尔可夫链,即模拟系统随着时间变化的过程,其核心思想是系统下一时刻的状态只依赖于当前状态,而与历史状态无关,这种特性被称为马尔可夫性质[26]。本文将连续变化的耦合协调度离散化为k种类型,将t年耦合协调度的概率分布表示为$1\times k$的状态概率向量,然后用$k\times k$马尔可夫转移概率矩阵表示不同类型耦合协调的时空转移,其表达式为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{i1} & \cdots & n_{ij} \end{bmatrix}_{k\times k} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{M}$表示$k\times k$的状态转移概率矩阵;n_{ij}表示研究时段内的转移概率,由t年份的i状态转变为$t+1$年份的j状态的空间单元数量之和,与所有年份的i状态空间单元数量之和的比值表示。

空间马尔可夫链,其转移概率矩阵是由k个$k\times k$阵组合而成(k为空间滞后因子数量),$M_{ij}(k)$表示以空间单元在t年份所具有的空间滞后因子k为条件,在t年份耦合协调度类型为i,到$t+1$年份转变成j类型的空间转移概率。空间滞后值的表达式为

$$\mathrm{Lag}=\sum_{i=1}^{n} y_i w_{ij} \tag{5}$$

式中:Lag表示空间滞后值;n表示空间单元数;y_i表示空间i的属性值;w_{ij}表示空间权重矩阵。

2.3 数据来源

本文对珠江流域 2011—2023 年的数据进行分析，数据多来自各省市《统计年鉴》《农村统计年鉴》、政府工作报告、水资源公报、林业局网站、科学技术厅网站，数据的另一个主要来源是《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国高技术产业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国能源统计年鉴》、北京大学数字金融研究中心等。部分地级市个别年份有关数据缺失，利用平均 3 a 增长率预测法和线性插值法补齐。

3 结果与分析

3.1 指标测算结果

3.1.1 水资源生态韧性和数字经济的综合评价结果

研究表明，2011—2023 年珠江流域水资源生态韧性指数呈持续上升态势，指数从 0.923 增长至 1.212，增幅达 31.31%，表明流域水资源生态系统抵御干扰、维持稳定的能力显著增强。由图 1a 可知，各城市群呈现“曲折上升”的差异化发展格局：粤中城市群和粤东城市群指数水平及增长幅度明显领先，这得益于两地较高的经济发展水平，完善的基础设施和有力的政策支持。例如，粤中城市群通过“智慧水务大脑”项目使管网漏损率从 12% 降至 7.2%，粤东城市群依托“东江数字孪生流域”建设使水资源系统适应指数提升 0.18。相比之下，粤西、桂林、南宁、贵阳和昆明城市群因经济发展相对滞后、生态保护投入不足及自然环境复杂等原因发展较为缓慢。由图 1b 可知，2011—2023 年珠江流域数字经济指数呈波动上升趋势，从 0.159 增长至 0.213，增幅 33.96%，尽管在 2014 年和 2019 年出现小幅回调，但总体反映出数字经济在流域内获得持续重视和发展。城市群层面呈现明显的梯度分化特征：粤中城市群凭借强大的经济基础与创新能力遥遥领先；粤西城市群次之，近年来取得一定突破但仍与粤中存在差距；粤东、桂林、南宁、贵阳和昆明城市群指数水平与增长趋势相近，虽起步较晚，发展速度相对缓慢，但在政策支持和基础设施完善下展现出较大潜力。综上所述，珠江流域的水资源生态韧性与数字经济发展呈现出同步增长和相互促进的良性互动关系。区域格局也高度重合，其中粤中和粤东地区在这两个方面均表现出较为明显的领先优势，而其他城市群则相对滞后。两者之间的耦合协调特征显著，数字经济通过技术渗透推动水资源管理效能的提升，生态韧性的改善则为数字经济发展提供了坚实的安全保障。

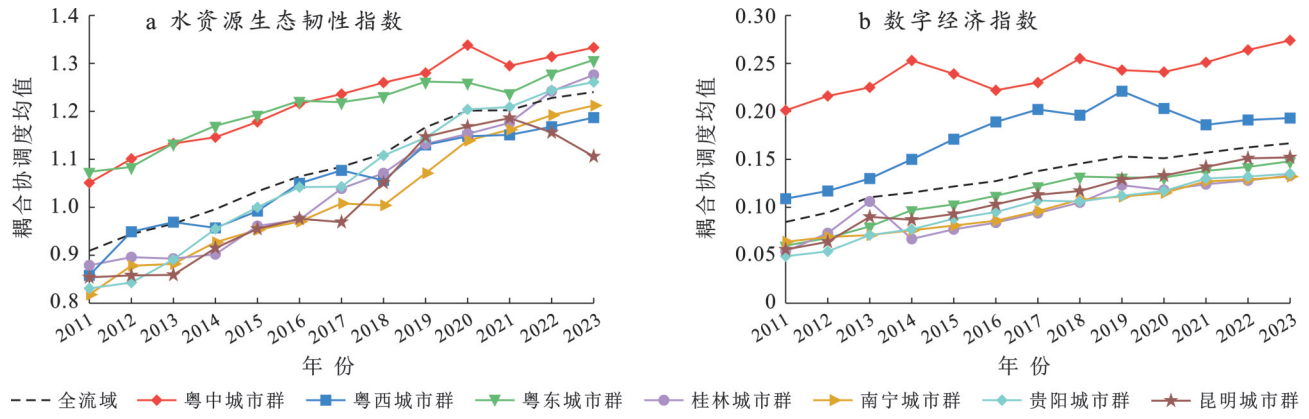


图 1 珠江流域 2011—2023 年水资源生态韧性指数和数字经济指数的动态

Fig.1 Dynamics of water resources ecological resilience index and digital economy index in Pearl River basin from 2011 to 2023

3.1.2 水资源生态韧性与数字经济耦合协调度结果

根据测算出的 2011—2023 年珠江流域城市群水资源生态韧性与数字经济的耦合协调度绘制图 2，并采用 GIS 软件绘制 2011，2015，2018 和 2023 年的耦合协调度均值连续面图（图 3）。全流域层面上，2011—2023 年全流域耦合协调度呈现逐步上升趋势，2011—2019 年为快速上升期，均值从 0.339 增长至 0.476，增幅为 40.41%，2019—2023 年为缓慢增长期，均值从 0.476 增长至 0.5，增幅为 5.04%。城市群层面上，各城市群耦合协调度均为上升趋势，呈现“东南高，西北低”的扩散特征，说明珠江流域城市群水资源生态韧性与数字经济的耦合协调关系均得到改善。其中粤中、粤西和粤东城市群耦合协调度均值明显高于其他城市群，其余城市群则低于全流域均值。

由图 3 可知，粤东、粤西、粤中城市群已实现由轻度失调向良好协调的跃迁，而桂林、南宁、贵阳、昆明城市群虽由严重失调转为濒临失调，但仍未跨越失调阈值。究其原因，前者得益于数字新基建下沉与省级“数字-水生态”政策协同，通过数据要素收益反哺生态补偿，构建“数字技术＋政策工具”双轮驱动

模式,显著提升水资源配置效率与韧性水平,后者则因数字基础设施覆盖不足,政策工具集成度低,水资源生态韧性提升仍面临瓶颈。

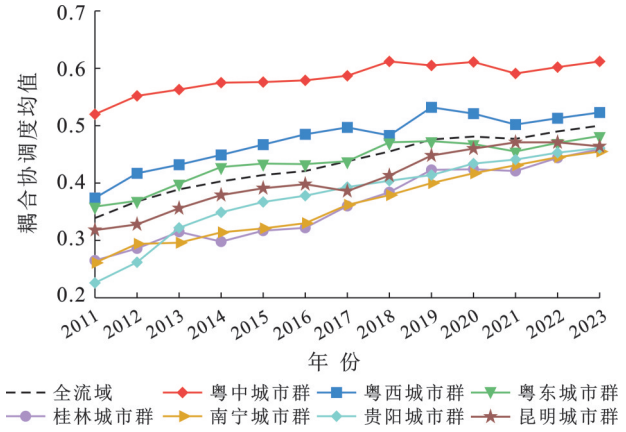


图 2　珠江流域 2011—2023 年水资源生态韧性与数字经济耦合协调度动态

Fig.2　Dynamics of coupling coordination degree between water resources ecological resilience and digital economy in Pearl River basin from 2011 to 2023

3.2　耦合协调度的时空演进分析

3.2.1　耦合协调度的动态演变特征

在前文时序变化的分析基础上,利用核密度图揭示珠江流域水资源生态韧性与数字经济耦合协调度的动态演变特征。选取 2011,2015,2019 和 2023 年 4 个时间节点,分别绘制珠江全流域、各城市群的核密度曲线(如图 4 所示)。研究期内,全流域核密度曲线中心持续右移,主峰高度上升、宽度收窄,呈“尖峰化”演进,表明耦合协调度整体提升且区域差异缩小;延展性上,2023 年出现右偏拖尾,反映高协调度城市数量增加;极化态势由单峰向轻微双峰转变,呈现弱极化特征。从城市群层面上看,各城市群呈现差异化演进格局。粤中、粤西、粤东城市群协调度显著提升,其中粤中多极化、粤东与粤西存在两极分化趋势;桂林、南宁、贵阳城市群协调水平稳步提升,区域差异缩小,极化现象减弱或消失;昆明城市群虽然协调度逐年提高,但区域差异较大,呈现多极分化态势。

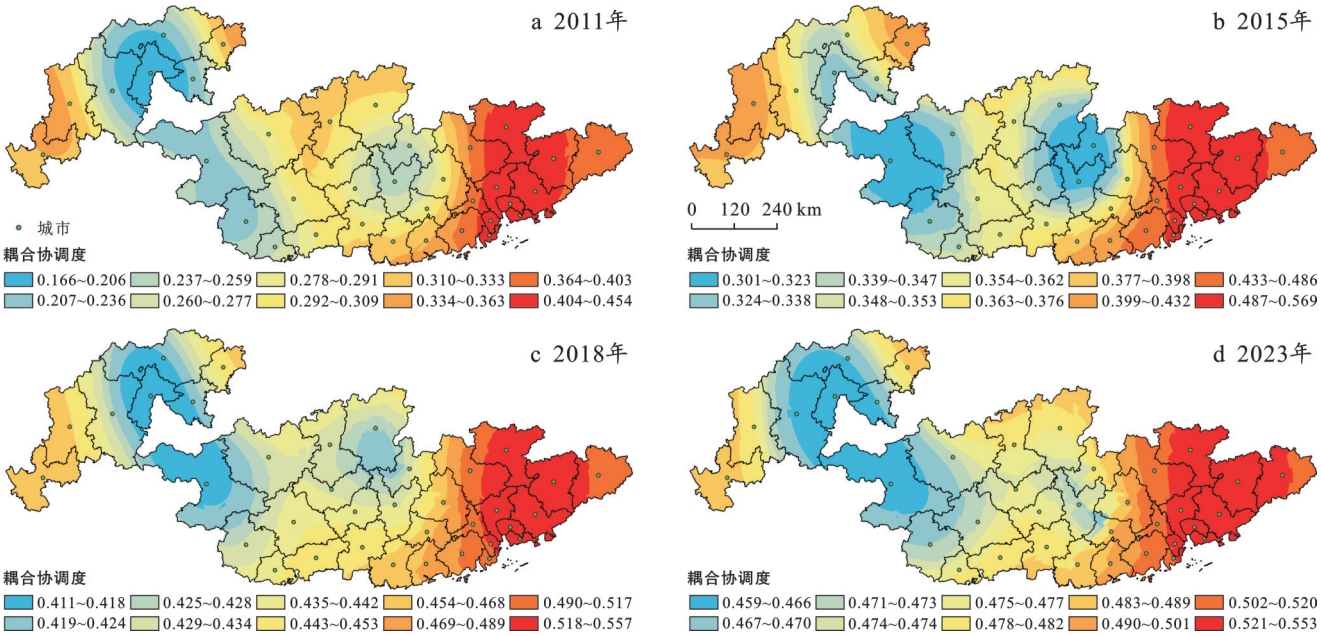


图 3　珠江流域城市群耦合协调度的空间分布

Fig.3　Spatial distribution of coupling coordination degree of urban agglomerations in Pearl River basin

3.2.2　耦合协调度的地区差异演变分析

为深入揭示珠江流域水资源生态韧性与经济发展耦合协调度的区域非均衡特征,本研究进一步采用 Dagum 基尼系数方法,系统测算流域内各区域耦合协调度的区域间差距及其来源构成。

(1)耦合协调度的基尼系数演变。由图 5 可知,全流域耦合协调度的基尼系数呈现阶梯式下降,由 2011 年的峰值 0.243 降至 2023 年的 0.107,降幅达 56.0%,表明区域不均衡现象持续缓解。研究期内可划分为 3 个阶段:2011—2013 年急剧下降,差距快速缩小;2013—2016 年波动下降,不均衡态势有所反复;2016—2023 年缓慢下降,收敛趋势趋于稳定。从城市群层面上看,区域内差异分化显著,粤中城市群基尼系数最高,粤东最低。昆明、粤西、粤中呈波动下降态势,其中昆明降幅最大,粤中变化最平缓;桂林在 2022 年触底反弹,差异有所扩大;贵阳、南宁整体呈下降趋势,后者后期趋于平稳;粤东前期稳定,后期先升后降,差距呈扩大态势。

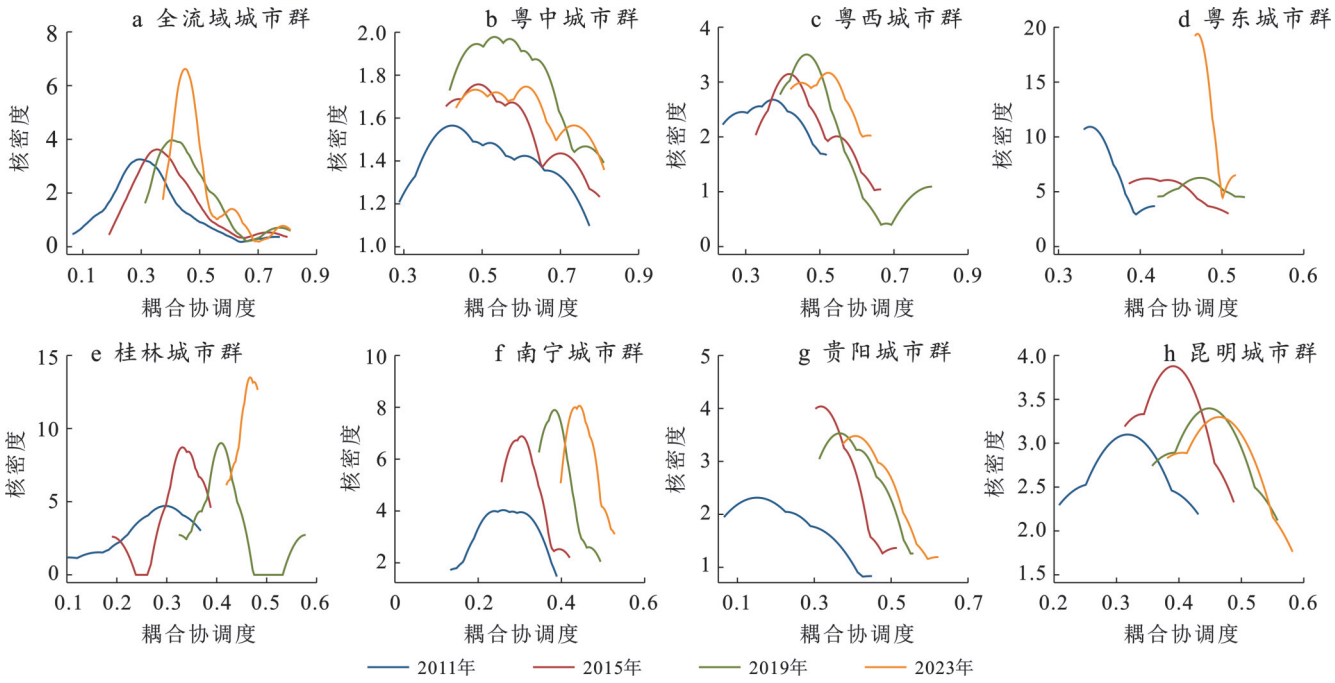


图 4 珠江流域城市群耦合协调度核密度曲线的动态演化

Fig.4 Dynamic evolution of kernel density curve of coupling coordination degree of urban agglomerations in Pearl River basin

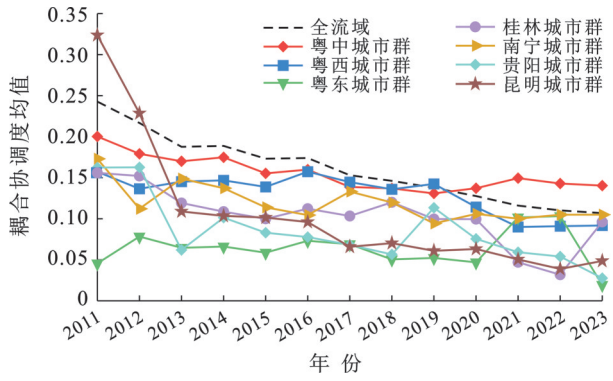


图 5 珠江流域 2011—2023 年耦合协调度基尼系数动态演化

Fig.5 Dynamic evolution of Gini coefficient of coupling coordination degree in urban agglomerations in Pearl River basin from 2011 to 2023

（2）耦合协调度的区域间差距。由图 6 可知，2011—2023 年 7 个城市群耦合协调度的区域间基尼系数差异呈收敛态势，其中粤中-昆明城市群差异最大，粤东-桂林城市群差异最小。2011 年昆明城市群因区位偏远、经济与自然禀赋滞后，与其他城市群基尼系数均值较高；2023 年该差异显著缩小，仅粤中-昆明城市群间基尼系数仍处高位，反映粤中作为一线城市的领先优势。2011 年粤中城市群与南宁、贵阳、昆明差异显著，尤以粤中-昆明城市群为最；2023 年粤中与桂林、南宁城市群差异最为明显，表明贵阳、昆明城市群取得进步，桂林、南宁城市群仍需强化水资源生态韧性与数字经济协同发展。

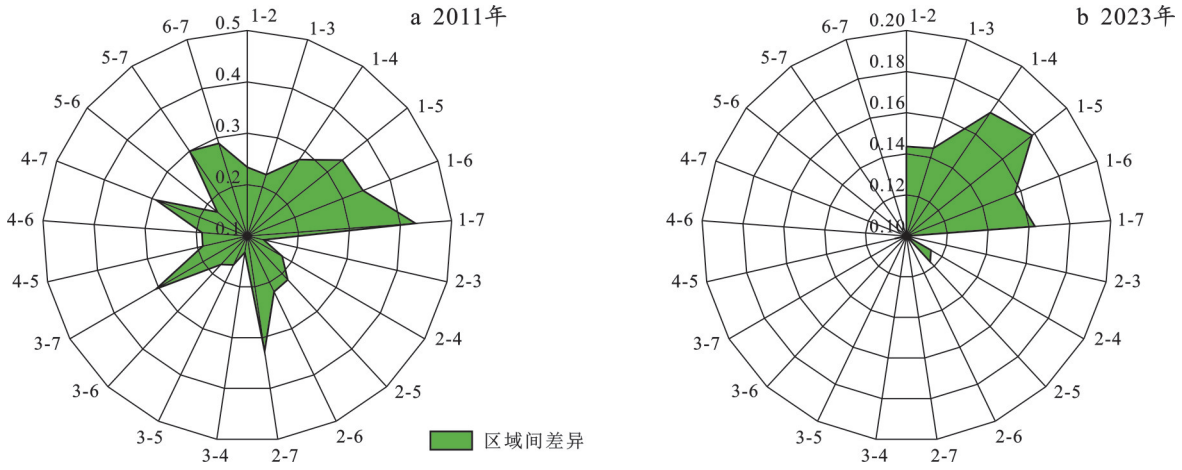


图 6 珠江流域城市群基尼系数区域间差异雷达图

Fig.6 Radar chart of interregional differences in Gini coefficient of urban agglomerations in Pearl River basin

(3)耦合协调度的差距来源。图7显示,2011—2023年珠江流域耦合协调度基尼系数的差距来源主要为区域间差异,平均贡献率达65.11%,超变密度次之达23.52%,区域内差异贡献最小,平均贡献率为11.38%。演变趋势上,区域间贡献率呈先升后降的波动态势,超变密度则呈现先降后升特征,而区域内贡献率基本保持稳定。研究表明,区域间分异主导整体空间分异格局,而超变密度揭示了跨区域的交叉重叠效应及城市群内部发展不均衡性,即高协调度城市群中存在个别城市显著滞后的现象。

3.3　耦合协调度的跃迁路径

3.3.1　基于传统马尔可夫链的跃迁路径

为寻找珠江流域城市群耦合协调度状态发生跃迁的变化路径,本文基于马尔可夫链模型,构建2011—2023年珠江流域耦合协调度状态转移概率矩阵,结果详见表4。主对角线表示耦合协调度等级不发生改变的概率,非对角线表示耦合协调度等级向上或者向下发生跃迁的概率。传统马尔可夫链结果表明:①2011—2023年耦合协调度呈现显著的路径依赖特征,各等级维持原状态概率沿主对角线递减,其中濒临失调等级稳定性最高。②状态转移呈现向上演进主趋势,其中严重失调向中度转移概率达75.0%,但良好协调向中级回落概率亦达44.4%,表明维持较高耦合状态压力较大。③三级及以上跃迁概率极低,表明耦合协调演化呈渐进式特征,难以实现“跳跃型”转变的路径。

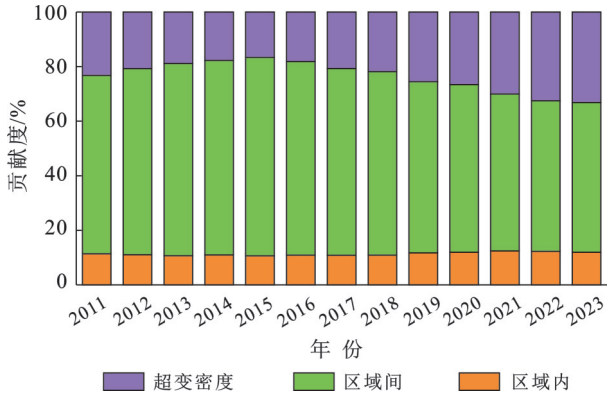


图7　珠江流域城市群耦合协调度的差异贡献率

Fig.7　Contribution rates of differences in coupling coordination degree in Pearl River basin urban agglomerations

表4　传统马尔可夫链转移概率矩阵

Table 4　Traditonal Markov chain transition probability matrix

项目	不同耦合协调度等级的转移概率									
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
E_1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E_2	0.000	0.250	0.750	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E_3	0.000	0.022	0.511	0.467	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E_4	0.000	0.000	0.040	0.781	0.179	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E_5	0.000	0.000	0.000	0.024	0.874	0.102	0.000	0.000	0.000	0.000
E_6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.151	0.792	0.057	0.000	0.000	0.000
E_7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.833	0.167	0.000	0.000
E_8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038	0.769	0.192	0.000
E_9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.444	0.556	0.000
E_{10}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:$E_{1—10}$为耦合协调度,其含义详见表3。t为年份,$t+1$表示下一年份。下同。

3.3.2　基于空间马尔可夫链的时空跃迁路径

由于传统的马尔可夫链模型可以分析珠江流域在时间上的耦合状态跃迁路径,但其忽略了领域之间空间上的影响。本文在考虑耦合协调度受邻域状态影响的基础上,将珠江流域两系统的耦合协调度按分位数法分成4个等份,$a=1,2,3,4$,a值越大耦合协调度越高,分别用低、较低、较高、高耦合协调度来描述,计算的空间马尔可夫链模型构建转移概率矩阵,结果详见表5。结果表明,邻域状态对耦合协调度跃迁路径具有显著调节效应。在低值邻域中,城市维持原等级的概率高于传统马尔可夫链,呈现负向空间锁定效应;在高值邻域中,维持概率则有所下降,反映正向空间溢出效应的存在。值得注意的是,高协调等级城市在邻域作用下未出现向低等级跃迁现象,说明空间缓冲机制降低了高端维持压力,这与珠江流域整体协调度稳步提升的态势相契合。

4　讨　论

4.1　研究发现与理论探索

本研究结论与水资源生态韧性研究的主流发现基本吻合,但针对珠江流域数字经济耦合的特殊性进行了深化。研究发现,经济较为发达的城市群与

水资源生态韧性的耦合协调度更高，并进一步揭示高耦合协调度城市群通过正向辐射带动作用，能够有效促进周边城市群两个系统的协同发展。然而，既有研究多囿于单维视角或静态截面分析，对二者耦合协调的动态演化机制及跃迁路径关注不足，制约了理论深化与实践指导价值。鉴于此，本研究聚焦珠江流域这一典型梯度发展区域，系统刻画其水资源生态韧性与数字经济耦合协调的时空演化规律，对保障流域生态环境安全与经济高质量发展具有重要的理论价值与现实意义。

表5 空间马尔可夫链转移概率矩阵

Table 5 Spatial Markov chain transition probability matrix

滞后空间类项	年份(t)	下一年份(t+1)转移概率			
		1	2	3	4
1	1	0.958	0.042	0.000	0.000
	2	0.000	1.000	0.000	0.000
	3	0.000	0.000	0.800	0.200
	4	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1	0.795	0.205	0.000	0.000
	2	0.074	0.852	0.074	0.000
	3	0.000	0.000	0.875	0.125
	4	0.000	0.000	0.111	0.889
3	1	0.333	0.667	0.000	0.000
	2	0.000	0.724	0.276	0.000
	3	0.000	0.035	0.789	0.175
	4	0.000	0.000	0.135	0.865
4	1	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.000	0.750	0.250
	3	0.000	0.043	0.913	0.043
	4	0.000	0.018	0.018	0.965

研究结果表明，2011—2023年珠江流域水资源生态韧性与数字经济耦合协调水平呈现协同演进态势，与周玉玺等[27]的研究结论具有一致性，印证了数字经济驱动水资源系统优化的普适性规律。在此基础上，本研究进一步揭示其空间极化特征呈现“东南高，西北低”的梯度扩散格局，区别于黄河流域“大连片，小散落”的分布模式，凸显了流域地理本底与经济发展阶段对耦合路径的塑造作用，丰富了区域异质性理论。跃迁机制表明，系统状态转移呈现显著的路径依赖性，协调状态具有黏性特征，而失调区域向高阶跃迁的概率显著高于衰退风险，这与黄河流域资源型城市韧性-生态韧性耦合协调“稳定向上”的演化趋势相呼应，进一步验证了区域系统自我强化的内在逻辑。基尼系数分解揭示，流域不均衡态势持续缓和但区域内差距贡献率平稳，暗示城市群内部可能存在制度锁定效应，此发现与程莉等[28]指出的“区域内差距相对固化”观点形成跨流域互证。

4.2 差异化治理框架的构建

基于耦合协调演进规律，本文构建“上游生态涵养，中游数字融合，下游技术辐射”的差异化治理框架。上游地区应依托生态屏障优势与高原特色农业基础，优先推广农业节水数字化监控技术，借鉴江西水肥一体化经验，实现生态产业化的数字转型；同时加大数字基础设施投入，突破区位瓶颈以承接技术溢出。中游地区需重点发展数字孪生流域技术，提升水资源精细化管控能力，弱化路径依赖，通过智能灌溉与污水治理技术嵌入重构传统产业生态。下游地区应充分发挥资金、人才与创新优势，建立数字经济创新中心与数字水利示范工程，通过产业转移与政策协同带动全域跃升，发挥数字技术辐射作用。

4.3 研究不足与展望

本研究仍存在以下局限：①数据可得性约束。受限于统计口径差异，部分地级市数字经济指标存在缺失值，虽采用插值法处理，但可能对微观尺度分析精度产生一定影响。②机制深度挖掘不足。本研究侧重状态识别与跃迁规律刻画，对数字经济影响水资源生态韧性的具体传导路径尚未展开中介效应检验，未来可引入结构方程模型或贝叶斯网络进行机理解析。③政策情景模拟缺位。马尔可夫链预测基于历史趋势外推，未能充分考虑极端气候事件、重大政策调整等突发情境对系统演变的冲击，后续研究可耦合系统动力学模型开展多情景仿真。

5 结 论

（1）2011—2023年珠江流域水资源生态韧性和数字经济发展均呈现逐步上升趋势。在珠江流域水资源生态韧性中，粤东城市群和粤西城市群均位于全流域均值之上，粤中城市群和粤东城市群均上升。在数字经济发展中，珠江流域城市增幅均达到30%以上。珠江流域耦合协调度呈现“数字经济越发达，协调水平越高”的梯度特征，空间上形成“东南高、西北低”的扩散格局。

（2）珠江流域水资源生态韧性与数字经济耦合协调度水平在总体层面和城市群层面均存在较大差距，但总体基尼系数持续下降，表明耦合协调发展水平的总体不均衡现象在不断得到改善；从区域间差异来看，各城市群间的基尼系数均呈现下降趋势，说明耦合协调发展差距逐渐缩小。从演变趋势来看，区域间差距贡献率整体先增大再缩小，波动较大，超变密度贡献率与之相反，呈现先减小后扩大的变化

态势,也存在一定波动,而区域内差距的贡献率基本处于平稳状态,变化不明显。

(3)珠江流域水资源生态韧性与数字经济发展的耦合协调状态跃迁路径整体呈现稳定向上增长的特征。其中,珠江流域内部呈现耦合协调状态时不容易发生状态的迁移,并且向右侧迁移的概率大于向左侧迁移的概率,即耦合状态向上增长的概率大于向下增长的概率。其次,珠江流域内部呈现失调状态的地区具有较高的概率向耦合协调更优的状态迁移。

参考文献(References)

[1] 周清香,何爱平.数字经济赋能黄河流域高质量发展[J].经济问题,2020(11):8-17.
Zhou Qingxiang, He Aiping. High quality development of the Yellow River basin empowered by digital economy [J]. On Economic Problems, 2020(11):8-17.

[2] 袁江杰,徐琳瑜,张晓蓉,等.一种融合虚实需求的城市群水资源系统韧性动态评估方法及应用[J].生态学报,2025,45(20):9897-9907.
Yuan Jiangjie, Xu Linyu, Zhang Xiaorong, et al. A dynamic assessment method and application of urban agglomeration water resource system resilience integrating virtual and physical water demand [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(20):9897-9907.

[3] 王慧丽,李妞,刘英,等.黄河流域水资源-生态韧性动态耦合与级层障碍解析[J].干旱区地理,2026,49(3):569-580.
Wang Huili, Li Niu, Liu Ying, et al. Dynamic coupling and hierarchical obstacle analysis of water resources and ecological resilience in the Yellow River basin [J]. Arid Land Geography, 2026,49(3):569-580.

[4] 王昌海,李奥,张蔚,等.我国西部边疆地区水生态安全评价:以西双版纳澜沧江流域为例[J].林业科学,2026,62(5):168-178.
Wang Changhai, Li Ao, Zhang Wei, et al. Assessment of water ecological security assessment in western border areas of China: A case study of Lancang River basin in Xishuangbanna [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2026, 62(5):168-178.

[5] 万芳,王煜,王威浩,等.流域水资源系统韧性演变及水网构建效果分析[J/OL].[2024-09-10].水资源保护,1-16. https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20240909.1506.004.
Wan Fang, Wang Yu, Wang Weihao, et al. Resilience evolution of water resources system and analysis of water network construction effect in the basin [J/OL]. [2024-09-10]. Water Resources Protection, 1-16. https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20240909.1506.004.

[6] 岳立,韩亮.数字经济对黄河流域水资源利用效率的影响及作用机制[J].工业技术经济,2022,41(7):21-27.
Yue Li, Han Liang. Influence of digital economy on water resources utilization efficiency in the Yellow River basin and its mechanism [J]. Journal of Industrial Technology and Economy, 2022,41(7):21-27.

[7] Hu Jin, Li Qiyuan. From bits to green: Unraveling the digital economy's influence on natural resource efficiency [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121203.

[8] 梁姗姗,舒晨.中国资源型城市产业链韧性水平测度、时空演化与区域差异[J].经济地理,2025,45(6):90-99.
Liang Shanshan, Shu Chen. Spatial-temporal evolution and regional disparities in measuring industrial chain resilience levels of resource-based cities in China [J]. Economic Geography, 2025,45(6):90-99.

[9] 谷城,张树山.产业链韧性水平测度、区域差异及收敛性研究[J].经济问题探索,2023(6):123-139.
Gu Cheng, Zhang Shushan. Level measurement, regional differences and convergence study of the industrial chain resilience [J]. Inquiry Into Economic Issues, 2023(6):123-139.

[10] 杨桐彬,朱英明,姚启峰.中国城市群经济韧性的地区差异、分布动态与空间收敛[J].统计与信息论坛,2022,37(7):45-60.
Yang Tongbin, Zhu Yingming, Yao Qifeng. Regional differences, distribution dynamics and spatial convergence of economic resilience in Chinese urban agglomerations [J]. Journal of Statistics and Information, 2022,37(7):45-60.

[11] 王泽宇,唐云清,韩增林,等.中国沿海省份海洋船舶产业链韧性测度及其影响因素[J].经济地理,2022,42(7):117-125.
Wang Zeyu, Tang Yunqing, Han Zenglin, et al. Resilience measurement and influencing factors of the marine ship industry chain in China's coastal areas [J]. Economic Geography, 2022,42(7):117-125.

[12] 刘益宇,廖成东.从表征到介入:社会-生态韧性的临界识别问题探究[J].自然辩证法通讯,2023,45(11):44-51.
Liu Yiyu, Liao Chengdong. From representation to intervention: A study on threshold-identification problem of social-ecological resilience [J]. Journal of Dialectics of Nature, 2023,45(11):44-51.

[13] 孟彦菊,章标彪,刘栋栋,等.珠江流域农业灰水足迹及其影响因素研究[J].生态经济,2023,39(12):126-133.
Meng Yanju, Zhang Biaobiao, Liu Dongdong, et al. Study on agricultural grey water footprint and its influencing factors in the Pearl River basin [J]. Ecological Economy, 2023,39(12):126-133.

[14] 王晨红,张爱平,胡美娟.长三角地区旅游产业生态系统韧性的时空格局及障碍因子[J].地域研究与开发,2023,42(4):82-88.
Wang Chenhong, Zhang Aiping, Hu Meijuan. Spatio-

temporal pattern and obstacle factors of tourism industry ecosystem resilience in the Yangtze River delta [J]. Areal Research and Development, 2023,42(4):82-88.

[15] 吕添贵,胡晗,付舒斐,等.长三角地区城市生态韧性时空分异特征及影响因素[J].地域研究与开发,2023,42(1):54-60.
Lyu Tiangui, Hu Han, Fu Shufei, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban ecological resilience in the Yangtze River delta [J]. Areal Research and Development, 2023,42(1):54-60.

[16] 赵涛,张智,梁上坤.数字经济、创业活跃度与高质量发展:来自中国城市的经验证据[J].管理世界,2020,36(10):65-75.
Zhao Tao, Zhang Zhi, Liang Shangkun. Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China [J]. Journal of Management World, 2020,36(10):65-75.

[17] 黄群慧,余泳泽,张松林.互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J].中国工业经济,2019(8):5-23.
Huang Qunhui, Yu Yongze, Zhang Songlin. Internet development and productivity growth in manufacturing industry: Internal mechanism and China experiences [J]. China Industrial Economics, 2019(8):5-23.

[18] Bachmann C M, Musman S A, Luong D, et al. Unsupervised BCM projection pursuit algorithms for classification of simulated radar presentations [J]. Neural Networks, 1994,7(4):709-728.

[19] Glover D M, Hopke P K. Exploration of multivariate atmospheric particulate compositional data by projection pursuit [J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(8): 1411-1424.

[20] 郭扬,黄艾婷,曲嘉瑞.新能源企业创新发展与区域碳排放效率的耦合协调及障碍因子分析[J].生态经济,2025,41(6):20-33.
Guo Yang, Huang Aiting, Qu Jiarui. Analysis on the coupling coordination and obstacle factors between the innovative development of new energy enterprises and regional carbon emission efficiency [J]. Ecological Economy, 2025,41(6):20-33.

[21] 栾贻锦,王艳慧,孙玥,等.黄河流域城市土地集约利用与生态文明建设的耦合协调性[J].水土保持通报,2025,45(4):347-359.
Luan Yijin, Wang Yanhui, Sun Yue, et al. Coupling and coordination of intensive land use and ecological civilization construction at cities in Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(4):347-359.

[22] 彭沥瑶,肖智.2013—2022年广东省城市韧性与土地利用效益耦合协调关系的时空演变[J].水土保持通报,2025,45(2):348-359.
Peng Liyao, Xiao Zhi. Spatio-temporal evolution of coupling coordination between urban resilience and land use efficiency in Guangdong Province from 2013 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):348-359.

[23] 黄学艺,陆汝成,叶宗达.中国陆地边境地区经济发展质量与生态韧性的耦合测度及交互响应[J].水土保持通报,2024,44(6):256-268.
Huang Xueyi, Lu Rucheng, Ye Zongda. Coupling measurement and interactive response of economic development quality and ecological resilience in China's land border areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):256-268.

[24] 姜旭,卢新海.长江中游城市群城镇化与人居环境耦合协调的时空特征研究[J].中国土地科学,2020,34(1):25-33.
Jiang Xu, Lu Xinhai. Temporal and spatial characteristics of coupling and coordination degree between urbanization and human settlement of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. China Land Science, 2020,34(1):25-33.

[25] 董文静,王昌森,张震.山东省乡村振兴与乡村旅游时空耦合研究[J].地理科学,2020,40(4):628-636.
Dong Wenjing, Wang Changsen, Zhang Zhen. The space-time coupling between rural revitalization strategy and rural tourism development in Shandong Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(4):628-636.

[26] 任喜萍,殷仲义.中国省域人口集聚、公共资源配置与服务业发展时空耦合及驱动因素[J].中国人口·资源与环境,2019,29(12):77-86.
Ren Xiping, Yin Zhongyi. Spatial-temporal coupling and driving factors of provincial population aggregation, public resource allocation and service industry development in China [J]. China Population Resources and Environment, 2019,29(12):77-86.

[27] 周玉玺,高瑞敏.黄河流域乡村数字经济与生态韧性的协同演化及驱动因素[J].资源科学,2025,47(10):2145-2160.
Zhou Yuxi, Gao Ruimin. Synergistic evolution and driving factors of rural digital economy and ecological resilience in Yellow River basin [J]. Resources Science, 2025,47(10):2145-2160.

[28] 程莉,黄兰稀,严月岑,等.长江经济带乡村生态韧性测度及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2024,45(5):11-23.
Cheng Li, Huang Lanxi, Yan Yuecen, et al. Research on the measurement and influencing factors of rural ecological resilience in the Yangtze River economic belt [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(5):11-23.