数字经济发展对长江经济带生态韧性的影响及其耦合协调研究

卢先明，李慧文，周金城，秦 岩

（湖南理工学院经济与管理学院，岳阳 414006）

摘要：长江经济带如何提升生态韧性，实现经济发展与生态保护协同推进，是迫切需要解决的问题。采用熵值法测度数字经济发展与生态韧性，运用偏最小二乘法(PLS)和耦合协调度模型分析2013—2022年长江经济带11个省份数字经济发展对生态韧性的影响及耦合关系。结果表明：数字经济水平和生态韧性水平持续提高，其中长三角地区最高，从下游地区到上游地区逐渐递减；数字普惠金融占比稳步提高，数字基础设施占比逐渐下降，数字产业发展水平总体上变化不大；压力韧性水平逐年上升，状态、响应和创新韧性水平总体呈上升趋势，其中创新韧性水平在2022年下降明显；互联网接入端口数、单位面积长途光缆长度、数字金融覆盖广度指数是驱动长江经济带生态韧性提升的重要因素；数字经济发展与生态韧性的耦合协调度存在明显的空间分异特征，下游地区两者的耦合协调度明显高于上游地区。需要分区域制定差异化发展策略，逐步缩小上下游地区的数字鸿沟，强化河运主导的货运结构，降低污染排放。同时，促进区域间协同发展，推动生态韧性的整体提升。

关键词：长江经济带；数字经济；生态韧性；耦合协调度模型；偏最小二乘法

中图分类号：F127；F129.9 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)07－0212－10

改革开放以来，中国经济快速发展，但与此同时，生态环境也承受了较大压力。如何在推动经济持续健康发展的同时，有效提升生态系统的韧性和稳定性，实现经济发展与生态保护的协同并进，已成为当前亟待破解的重大课题。近年来，互联网、大数据、云计算、人工智能等数字创新技术迅猛发展，对生态环境带来了积极影响。首先，数字经济的发展提升了企业供应链敏捷性，促进企业调整生产服务方案，减少了闲置和浪费，进而减少能源消耗与污染物排放[1]。其次，数字技术通过智能传感、实时监控等数字设备的使用加速了智慧城市建设，通过对企业废弃物排放实时监测，有效控制了其对大气、水及环境的污染[2]。此外，产业数字化促进了数字经济与传统产业的深度融合，改变了以资源消耗为主的发展模式，推动了产业从资源粗放型向技术集约型转变[3]。总体来看，数字经济的发展可重构“经济-生态”系统的动态平衡。长江经济带作为横贯中国东中西部的“生态安全屏障”，近年来环境问题频发[4]，亟须分析其生态韧性影响因素，开展耦合协调研究。因此，探究数字经济发展对长江经济带生态韧性的影响及其耦合关系，对长江经济带更好地践行“生态优先、绿色发展”战略具有指导意义。

1 文献综述

现有关于生态韧性、数字经济以及数字经济与生态韧性的关系研究主要集中在以下3个方面：①生态韧性研究。Holling[5]首次在自然生态学领域中提出“韧性”的概念，即系统从以前的状态中恢复或在受到干扰后达到新平衡状态的能力。学者们围绕生态韧性理论框架[6-7]、综合评价指标[8-9]、影响因素[10-11]等内容展开讨论，这为之后相关生态韧性研究提供了一定的基础；梁琦等[12]基于城市韧性框架，提出“压力-状态-响应（pressure-state-response，PSR）”的生态韧性评价模型；郭海红和刘新民[13]基于“演化韧性”视角，构建生态系统在面对冲击时的“抵抗力-适应力-恢复力”评价体系，如今大多数学者从这方面来建立生态韧性的评价指标；鲁

收稿日期：2025-09-12

基金项目：湖南省社科基金重大项目(21ZDAJ008)

作者简介：卢先明(1963—)，男，湖南岳阳人，硕士，研究员，研究方向为哲学；李慧文(1999—)，女，江西南昌人，硕士研究生，研究方向为区域经济学；周金城(1980—)，男，湖南邵阳人，博士，教授，研究方向为区域经济学；秦岩(2003—)，男，湖南张家界人，硕士研究生，研究方向为区域经济学。

方圆等[14]、张明斗和杨雨欣[15]研究了生态韧性与城镇化的耦合协调关系、低碳城市建设对生态韧性的影响等,丰富了生态韧性的学术内涵和价值。②数字经济研究。Tapscott[16]最早提出数字经济的概念,此后学者们发现数字经济能够在优化社会资源配置[17]、碳减排、降低城市空气污染水平、促进经济和就业增长、实现城乡居民共同富裕[18]、推动经济高质量发展[19]等方面作用明显。Ma 和 Zhu[20]认为数字经济可以通过数字技术更高效利用资源、优化资源配置、降低监管成本来推动绿色治理,赋能绿色发展;邓荣荣和 张翱祥[21]指出数字经济发展显著降低了城市各类环境污染物的排放;Li 和 Wang[22]发现数字经济与传统产业的绿色融合对碳减排具有重要意义;郭炳南等[23]通过"宽带中国"试点政策对生态环境质量产生的减排效应,验证了数字经济发展可降低城市空气污染水平。由此可见,随着数字技术的不断创新与应用,数字经济不仅能提升经济运行效率,还能为实现绿色、低碳、可持续发展提供有力支撑。③数字经济发展与生态韧性的关系研究。孙铭和王茗旭[24]分析了中国286个地级市数字经济发展提升生态韧性的空间溢出特征,为中国明确提升生态韧性的机制和地区之间协作强化提供了政策依据;郭力和李欣烨[25]分析了数字经济发展对黄河流域生态韧性的影响;刘丁蓉等[26]、邓倚珊[27]分别研究了珠三角地区和闽三角地区数字经济与城市生态韧性的耦合协调度和时序发展特征,都为对长江流域城市生态韧性研究提供了方法和研究角度的参考。

综上,现有研究存在两点不足:①在研究内容上,一方面,目前少有学者将数字经济与城市生态韧性进行耦合关系分析,另一方面,许多二者耦合协调度研究仅针对耦合程度分析,很少考虑到时间层面上二者的动态变化;②在研究对象上,长江经济带是国家首个以"生态优先、绿色发展"为定位的战略发展区,但目前少有聚焦于长江经济带区域进行城市生态韧性的研究。本文的边际贡献在于:①将长江经济带上中下游协同纳入数字经济与生态韧性的耦合分析中,为推动长江经济带高质量发展提供了参考;②采用偏最小二乘法解决多重共线性问题,同时构建了包含数字基础设施、数字产业发展、数字普惠金融的数字经济发展指标体系,并基于生态韧性的特点从"压力-状态-响应-创新"4个方面出发构建城市生态韧性的指标体系;③根据长江经济带不同地区的差异,分析耦合协调度的空间异质性,不仅能为长江经济带城市的数字经济发展与生态韧性提升提供理论依据和实践指引,还可为其他区域探索生态韧性发展路径提供有益借鉴。

2 指标构建与研究方法

2.1 样本选择与数据来源

归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)根据 NASA(美国国家航空和宇宙航行局)定期发布的 MOD13A3 数据集(空间分辨率为 1 km)整理计算。社会统计数据主要来自2013—2022年的《中国统计年鉴》及各省份的《国民经济和社会发展统计公报》。此外,数字普惠金融相关指数来自北京大学数字金融研究中心,工业固体废物产生量数据来自各省份生态环境厅的环境统计年报,水资源数据来自各省份水利厅的水资源公报,全国专利数据来源于国家知识产权局,科研投入强度数据来自国家统计局官网。

2.2 指标体系构建

当前学界针对数字经济发展水平的测度方式呈现多元特征,梳理既有研究文献可发现,其主要测算方法大致可归为两类。第一类是核心指标法,直接将数字普惠金融作为测度指标;第二类是筛选适宜指标搭建综合评价体系,运用熵值法、主成分分析法等对数字经济进行测度。借鉴吕雁琴和范天正[28]、徐维祥等[29]的方法,采用熵值法,从数字基础设施、数字产业发展、数字普惠金融3个层面,共13个指标,全面反映长江经济带上中下游不同区域的数字经济发展水平。

生态韧性方面,在结合演化韧性理论与适应性循环模型的动态演化过程[13]、综合 PSR 模型和演化韧性思想的基础上,借鉴了石彩霞和贺小荣[30]的研究成果,构建"压力-状态-响应-创新"生态韧性评估体系(表1)。"压力"是指城市生态系统在人类生产生活与经济发展过程中所承受的负面影响,反映生态系统面临的外部挑战程度,选取工业废水排放量、单位 GDP 能耗和人口密度等指标来度量;"状态"代表长江经济带城市生态系统自身的结构、功能与质量水平,选取人均水资源量、人均公园绿地面积率等指标体现;"响应"反映长江经济带城市在生态保护与韧性提升方面的行动力度,采用生活垃圾无害化处理率、污水处理厂集中处理率等指标表示;"创新"是指生态系统在面对干扰和变化时,更具适应力和恢复力而进行的新技术的应用和引入,因此选取当年所获绿色实用新型专利数量、科学技术

表 1　数字经济发展水平与生态韧性评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位	属性
数字经济发展水平 x	数字基础设施	域名数 x_1	万个	正向
		IPv4 网址数 x_2	万个	正向
		互联网宽带接入端口数 x_3	万个	正向
		移动电话普及率 x_4	部/百人	正向
		单位面积光缆长度 x_5	km/km^2	正向
	数字产业发展	信息化企业数 x_6	个	正向
		每百家企业拥有网站数 x_7	个	正向
		有电子商务交易活动的企业比重 x_8	%	正向
		电子商务销售额 x_9	亿元	正向
		软件业务收入 x_{10}	亿元	正向
	数字普惠金融	覆盖广度指数 x_{11}	—	正向
		使用深度指数 x_{12}	—	正向
		数字化程度指数 x_{13}	—	正向
生态韧性 y	压力	单位 GDP 工业废水排放总量 y_1	t/万元	负向
		单位 GDP 工业 SO_2 排放量 y_2	t/万元	负向
		单位 GDP 工业固体废物产生量 y_3	t/万元	负向
		人口密度 y_4	人/km^2	负向
	状态	人均水资源量 y_5	m^3/人	正向
		人均公园绿地面积 y_6	m^2/人	正向
		归一化植被指数(NDVI) y_7	%	正向
		建成区绿化覆盖率 y_8	%	正向
	响应	污水处理厂集中处理率 y_9	%	正向
		生活垃圾无害化处理率 y_{10}	%	正向
		一般工业固体废物综合利用率 y_{11}	%	正向
		节能环保支出占地方财政支出比 y_{12}	%	正向
	创新	R&D 经费投入占 GDP 的比重 y_{13}	%	正向
		科学技术支出占地方财政支出比 y_{14}	%	正向
		当年获得的绿色实用新型专利数量 y_{15}	件	正向
		绿色发明占年度申请专利总数百分比 y_{16}	%	正向

支出占财政支出比重、R&D 经费投入占 GDP 的比重等指标来衡量。

2.3　研究方法

2.3.1　熵值法

为规避主观因素的影响，提高评价结果的客观性和准确性，运用熵权法得到各指标权重，并采用线性加权平均法分别计算出长江经济带各省份的数字经济发展综合指数(DI)和生态韧性综合指数(EN)。假定年份为 k，地区为 i，指标为 j，那么 x_{kij} 即为第 k 年期间 i 地区的第 j 项指标值。

(1)数据标准化。

正向指标：

$$A_{kij}=\frac{\max x_{kij}-x_{kij}}{\max x_{kij}-\min x_{kij}} \tag{1}$$

负向指标：

$$A_{kij}=\frac{x_{kij}-\min x_{kij}}{\max x_{kij}-\min x_{kij}} \tag{2}$$

式中：A_{kij} 为 x_{kij} 消除量纲影响后的标准化数值；$\min x_{kij}$ 为第 j 项的最小值；$\max x_{kij}$ 为第 j 项的最大值。

(2)归一化处理。得到每个指标下各样本的比重 P_{kij}。

$$P_{kij}=\frac{A_{kij}}{\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{d}A_{kij}} \tag{3}$$

式中：n 为年份数；d 为地区数。

(3)计算熵值 E_j。

$$E_j=-\frac{1}{\ln(nd)}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{d}P_{kij}\ln P_{kij} \tag{4}$$

(4)计算变异指数 D_j。

$$D_j=1-E_j \tag{5}$$

(5)计算熵权 W_j。

$$W_j=\frac{D_j}{\sum_{j=1}^{p}D_j} \tag{6}$$

式中：p 为指标数。

(6)计算综合评价得分：数字经济发展综合指数(DI)和生态韧性综合指数(EN)。

$$\mathrm{DI}=\sum_{j=1}^{p}(W_jX_j),\ \mathrm{EN}=\sum_{j=1}^{p}(W_jY_j) \tag{7}$$

2.3.2　偏最小二乘法

偏最小二乘法(partial least squares，PLS)兼具多元回归分析、主成分分析和典型相关分析的优点，同时能够处理小样本量和自变量多重共线性的问题[31]。变量投影重要性(variable projection importance，VIP)可衡量回归模型中每个自变量的重要程度。VIP 越高，对因变量的影响越大。一般来说，VIP 超过 1 的指标是极重要因素，VIP 在 0.8～1 的指标是重要因素，VIP 低于 0.8 的指标则是不重要因素[32]。VIP 的计算公式为

$$\mathrm{VIP}_j=\sqrt{\frac{p}{Rd(Y;t_1,t_2,\cdots,t_j)}\sum_{k=1}^{m}Rd(Y;t_h)w_{hj}^2} \tag{8}$$

式中：VIP_j 为第 j 个指标 VIP；p 为所选指标变量的数量；R 为提取的成分 $t_1,t_2,\cdots,t_m$ 对于 Y 的累计

解释能力;w_{hj}^2 为 W_h 轴的第 j 个分量。

2.3.3 耦合协调度模型

耦合协调度是基于耦合度形成的,能够更好地描述多个系统或要素之间的耦合协调发展水平[33-34],构建数字经济发展与长江经济带生态韧性之间的耦合度模型,其数学表达为

$$C = 2\sqrt{\frac{\mathrm{DI}\times\mathrm{EN}}{(\mathrm{DI}\times\mathrm{EN})^2}} \tag{9}$$

式中:C 为耦合度。耦合协调度模型为

$$D = \sqrt{CT},\ T = \alpha\mathrm{DI} + \beta\mathrm{EN} \tag{10}$$

式中:D 为耦合协调度;T 为系统间的综合评价指数;α、β 为待定系数,研究认为数字经济发展与生态韧性相互影响、地位同等,故取 $\alpha=\beta=0.5$。借鉴相关研究[35-36],D 的等级划分标准见表 2。

表 2 耦合协调度等级划分标准

耦合协调度	协调程度	耦合协调度	协调程度
[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

3 结果与分析

3.1 长江经济带各省份数字经济发展水平分析

从 2013—2022 年的时序演变来看,长江经济带各省份数字经济发展水平存在显著差异,但总体保持稳步增长态势(图 1)。以 2022 年为例,各省份数字经济发展水平从高到低的顺序排列为:上海(73.04%)、江苏(68.44%)、浙江(61.33%)、四川(37.23%)、安徽(30.39%)、湖北(29.71%)、重庆(28.62%)、湖南(29.71%)、江西(24.12%)、贵州(19.75%)、云南(16.68%)。其中,长三角地区的上海、江苏和浙江数字经济发展水平遥遥领先于其他省份,年增长速度分别高达 8.75%、4.3% 和 6.53%。位于长江上游的“绿色屏障”贵州,虽然数字经济发展水平年均增速为 38.68%,但 2013 年该区域仅为 1.59%,导致其数字经济水平总量不足。

图 2 为 2013—2022 年的数字经济发展水平维度占比变化统计。在数字基础设施维度,采用移动电话普及率、互联网宽带接入端口数等来刻画。从图 2 可见,数字基础设施占比在长江经济带各省份已超出 40%,网络高普及率和高覆盖率表明研究区域的网络基础设施较为完善。其中,上海在“十三五”时期着力推进智慧城市建设,数字基础设施占

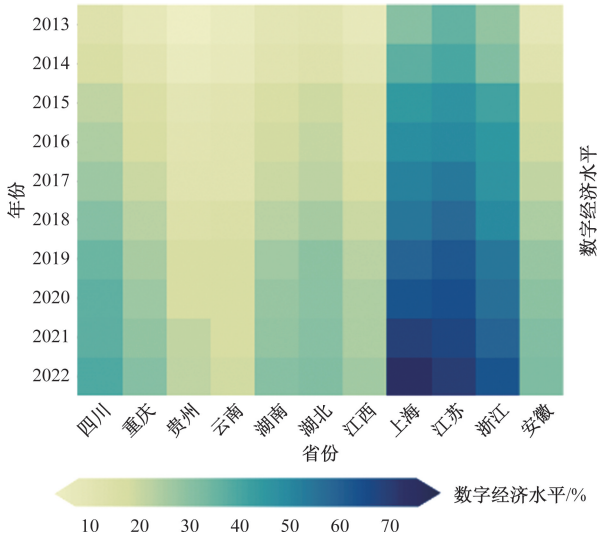


图 1 2013—2022 年数字经济发展水平时序演变

比远超其他省份。贵州和云南的数字产业发展占比相对于其他省份来说较小,因为地理条件、基础设施和经济基础相对较差,且两省远离产业重心,难以形成规模化的产业链协同。长江经济带数字普惠金融由数字技术开发的“低级化”向数字应用协调的“高级化”转变。长三角地区普惠金融占比明显低于其他省份,而中西部地区则由于发达省份的空间溢出效应,进入了数字普惠金融发展的快车道。可见,在数字经济发展过程中,各省份数字经济发展 3 个维度的演变趋势是:数字普惠金融占比稳步提高,数字基础设施占比逐渐下降,数字产业发展总体上变化不大。从不同地区来看,上游的云南和贵州主导类型按发展阶段依次为:数字基础设施→数字产业发展→数字普惠金融,中游地区的 3 个维度占比均衡,而下游地区始终是数字产业发展和数字基础设施占主导。

3.2 长江经济带各省份生态韧性水平分析

由图 3 可知,长江经济带生态韧性水平呈现逐年提高之势,从 2013 年的 0.323 上升至 2022 年的 0.486,累计增长了 0.163,增幅达到 50.46%。其本质是工业化中期污染压力与治理效能的动态平衡。根据环境库兹涅茨曲线理论,当区域工业化进入中期阶段,人口与产业集聚虽加剧生态压力,但污染集中治理效应与政策规制强度的提升会对冲压力冲击。其余 3 个维度韧性水平均呈波动上升趋势,个别年份水平有所下降,但总体上保持着稳定向好发展态势。其中,在 2022 年创新韧性水平下降趋势明显,可能受经济增速放缓等因素影响,财政支出结构向“保民生、稳经济”倾斜,中小企业倾向削减

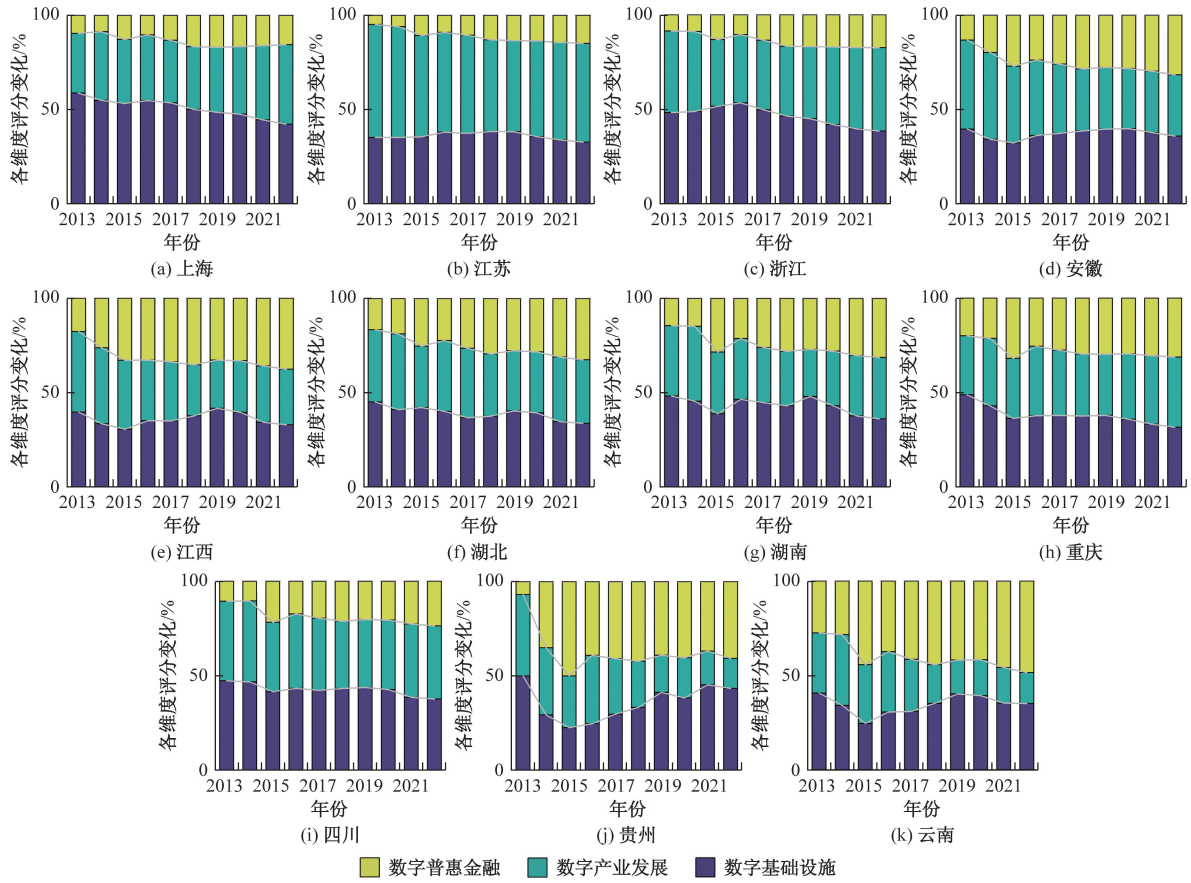


图 2　2013—2022 年各省份数字经济发展水平维度占比变化

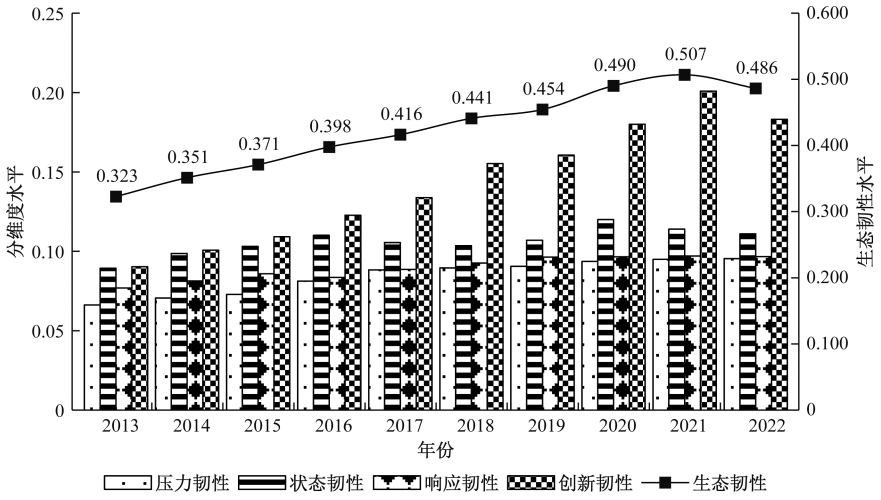
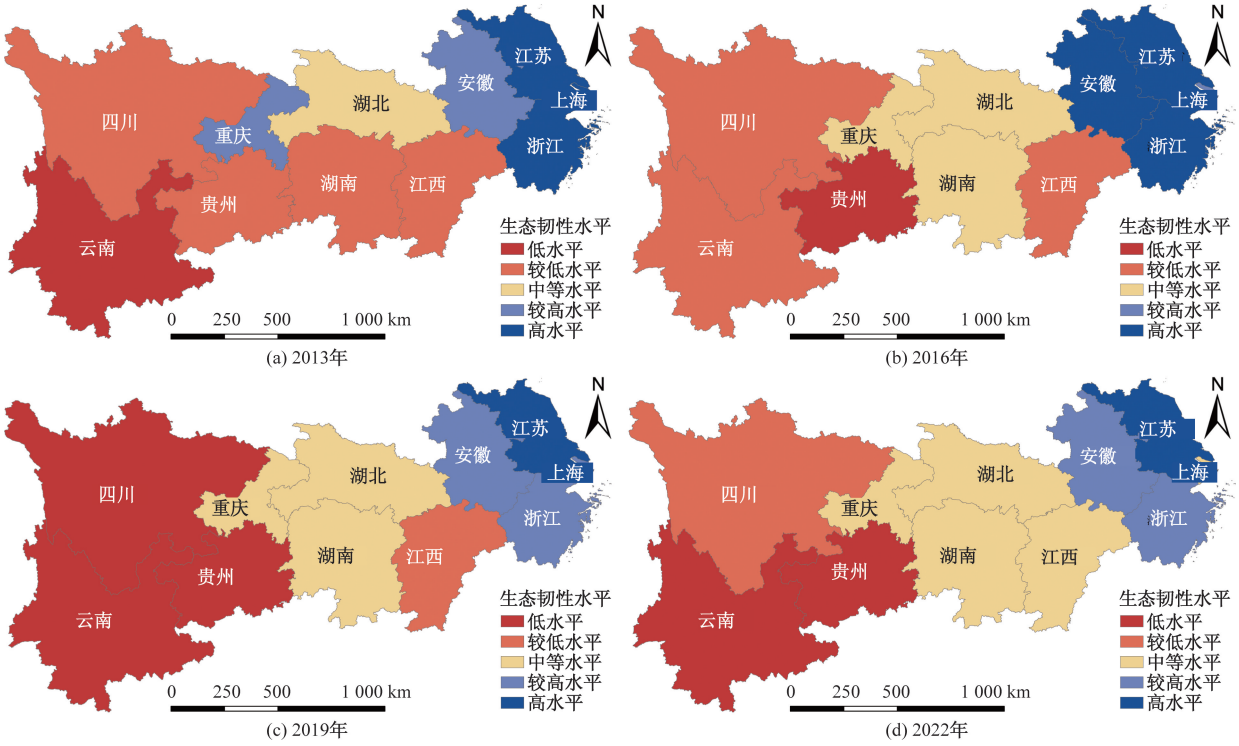


图 3　2013—2022 年长江经济带生态韧性及分维度水平

研发投入，优先维持运营，加上绿色技术研发风险高、市场回报周期长等因素，进一步抑制企业积极性，进而造成创新韧性水平下降。

为进一步分析生态时空格局变化，采用自然断点法进行等级划分，将长江经济带生态韧性依次分为高水平生态韧性区、较高水平生态韧性区、中等水平生态韧性区、较低水平生态韧性区和低水平生态韧性区 5 个等级。同时借助 ArcGIS 软件生成的相关数据（图 4）。可以发现，长江经济带生态韧性呈现下游主导引领、中游稳健上升、上游相对滞后的空间分异格局。

具体来看，2013 年长江经济带生态韧性水平普遍较低，除上海、江苏、浙江为中等水平区外，其余省份都处于较低水平和低水平生态韧性区。上海、



审图号:GS(2024)0650号

图 4　2013 年、2016 年、2019 年、2022 年长江经济带生态韧性时空格局变化

江苏、浙江得益于经济发达带来的环保投入和污染治理的优势,整体处于中等水平生态韧性区。云南和贵州由于经济总量较低,在 2013 年均低于全国平均水平,地方财政对生态治理的投入有限,缺乏资金、技术和治理体系的支撑来提升生态韧性,因此处于低水平生态韧性区。2016 年,湖北升级至中等水平生态韧性区,在这一期间湖北凭借长江中游湖泊群治理显著提升了自身生态适应力。其余省份都相比 2013 年升级为更高一级的生态韧性区。2019 年,“十三五”长江经济带绿色生态廊道建设、生态文明建设等政策持续发力,使下游地区通过产业绿色转型、智慧环保赋能升级为高水平生态韧性区。湖北先于中游其他两省升级为高水平生态韧性区。云、贵两省因高原地形限制,依然处于较低水平生态韧性区。2022 年,产业结构优化使长江经济带下游资源消耗降低,升级为高水平生态韧性区;中游各省份升级为较高水平生态韧性区,其区域范围扩大至重庆;上游虽实施生态补偿机制,但因地形限制与产业路径依赖,仍属于较低水平生态韧性区。

总体上,城市生态韧性空间演化呈现出从低等级韧性向高等级韧性演替的规律,并且长江经济带生态韧性两极分化较为严重,下游地区发展较好,上游地区发展缓慢。较高水平生态韧性区域在缓慢增加,中等水平和较低水平生态韧性区仍占较大比重,可以看出长江经济带城市生态韧性总体水平较低,而高水平生态韧性区域主要分布在下游地区。

4　长江经济带数字经济发展对生态韧性的影响分析

4.1　回归分析

将数字经济发展的 13 项指标作为自变量 x,将生态韧性作为因变量 y,构建偏最小二乘回归模型(PLS),分析数字经济发展对生态韧性的影响,各省份 PLS 模型均通过交叉有效性检验,表明回归模型具有较高可靠性,结果见表 3。从回归方程来看,每百家企业拥有网站数 x_7 指标的回归系数有 5 个省份是负数,可能由于企业网站运营需要服务器,而服务器需要消耗大量的能源,如果使用传统能源的话,会增加碳排放[37]。其余指标的回归系数以正向为主,表明对长江经济带生态韧性具有较强的促进作用。

4.2　变量投影重要性分析

为分析各指标对生态韧性的影响程度,使用 SIMCA-P 13.0 软件进行分析,得到 VIP(表 4)。结果表明,长江经济带不同省份存在差异。例如,电

子商务销售额(x_9)在上海、浙江和江苏的 VIP＜0.8,对生态韧性可视为不重要因素;在四川、贵州、湖北、江西和安徽,VIP 值介于 0.8～1,可视为一般重要因素;而在重庆、云南和湖南,VIP＞1,可视为最重要因素。总体而言,互联网接入端口数(x_3)、单位面积长途光缆长度(x_5)、数字金融覆盖广度指数(x_{11})等因素在影响生态韧性方面扮演着最重要的角色,表明长江经济带数字经济发展对生态韧性的影响主要集中在数字基础设施和数字普惠金融这两个维度上。

表 3　长江经济带各省份 PLS 模型回归分析结果

省份	A	R_x^2	R_y^2	标准化 PLS 方程
四川	2	0.932	0.918	$y=5.959+0.132x_1-0.025x_2+0.142x_3+0.134x_4+0.068x_5+0.067x_6+0.002x_7+0.047x_8+0.094x_9+0.112x_{10}+0.083x_{11}+0.080x_{12}+0.097x_{13}$
重庆	1	0.824	0.872	$y=10.113+0.056x_1+0.082x_2+0.085x_3+0.078x_4+0.088x_5+0.082x_6-0.044x_7+0.088x_8+0.081x_9+0.087x_{10}+0.087x_{11}+0.087x_{12}+0.071x_{13}$
贵州	2	0.886	0.977	$y=9.257+0.028x_1+0.073x_2+0.096x_3+0.144x_4+0.076x_5+0.206x_6+0.058x_7+0.102x_8+0.103x_9+0.016x_{10}+0.118x_{11}+0.113x_{12}+0.053x_{13}$
云南	2	0.858	0.958	$y=5.766+0.177x_1+0.199x_2+0.073x_3+0.071x_4+0.021x_5-0.017x_6+0.086x_7+0.029x_8+0.254x_9+0.155x_{10}+0.064x_{11}+0.021x_{12}+0.165x_{13}$
湖南	3	0.926	0.982	$y=5.348+0.157x_1-0.142x_2+0.130x_3+0.107x_4+0.064x_5+0.11x_6+0.065x_7+0.058x_8+0.208x_9+0.171x_{10}+0.116x_{11}+0.134x_{12}-0.013x_{13}$
湖北	3	0.961	0.989	$y=5.795-0.057x_1+0.04x_2+0.090x_3+0.148x_4+0.134x_5+0.118x_6+0.086x_7+0.199x_8+0.115x_9+0.119x_{10}+0.115x_{11}+0.130x_{12}-0.033x_{13}$
江西	2	0.929	0.986	$y=5.5+0.175x_1+0.009x_2+0.098x_3+0.084x_4+0.114x_5+0.061x_6-0.038x_7+0.078x_8+0.078x_9+0.102x_{10}+0.086x_{11}+0.095x_{12}+0.075x_{13}$
上海	5	0.993	0.934	$y=12.392+0.220x_1+0.172x_2+0.32x_3+0.428x_4+0.008x_5-0.526x_6-0.264x_7+0.160x_8-0.10x_9-0.10x_{10}+0.027x_{11}+0.335x_{12}-0.445x_{13}$
江苏	1	0.805	0.901	$y=5.347+0.058x_1+0.086x_2+0.082x_3+0.077x_4+0.089x_5+0.071x_6-0.084x_7+0.091x_8+0.057x_9+0.091x_{10}+0.091x_{11}+0.090x_{12}+0.081x_{13}$
浙江	1	0.718	0.945	$y=7.194-0.002x_1+0.079x_2+0.094x_3+0.051x_4+0.103x_5+0.096x_6-0.105x_7+0.102x_8-0.031x_9+0.105x_{10}+0.105x_{11}+0.1x_{12}+0.097x_{13}$
安徽	2	0.944	0.951	$y=5.793+0.117x_1+0.011x_2+0.138x_3+0.064x_4+0.128x_5+0.086x_6+0.061x_7+0.055x_8+0.17x_9+0.056x_{10}+0.089x_{11}+0.097x_{12}+0.094x_{13}$

表 4　长江经济带 11 个省份的 VIP 值

变量	四川	重庆	贵州	云南	湖南	湖北	江西	上海	江苏	浙江	安徽
x_1	0.889	0.710	0.903	0.935	0.875	0.618	0.830	0.598	0.709	0.017	0.956
x_2	0.919	1.037	1.052	1.173	0.730	0.997	0.913	1.060	1.054	0.892	0.883
x_3	1.131	1.074	1.091	1.033	1.102	1.091	1.028	1.081	1.007	1.066	1.102
x_4	1.100	0.984	1.107	1.037	1.064	1.077	1.049	1.045	0.951	0.582	1.015
x_5	1.055	1.114	1.057	1.008	1.058	1.113	1.059	1.119	1.099	1.165	1.089
x_6	1.042	1.033	1.062	0.989	1.045	1.105	1.024	1.012	0.868	1.088	1.031
x_7	0.780	0.554	0.779	0.978	0.877	0.465	0.957	0.968	1.027	1.186	0.864
x_8	1.015	1.111	1.045	0.731	1.011	1.053	1.050	0.979	1.119	1.156	1.012
x_9	0.845	1.020	0.867	1.122	1.041	0.950	0.952	0.762	0.702	0.356	0.916
x_{10}	1.096	1.098	0.934	0.934	1.006	1.105	1.055	0.990	1.112	1.192	1.018
x_{11}	1.068	1.099	1.109	1.032	1.081	1.102	1.062	1.056	1.121	1.185	1.059
x_{12}	1.041	1.095	1.079	0.982	1.068	1.074	1.043	1.128	1.104	1.131	1.043
x_{13}	0.948	0.892	0.836	0.981	0.974	1.000	0.947	1.068	0.995	1.103	0.980

5 各省份数字经济发展与生态韧性的耦合协调度分析

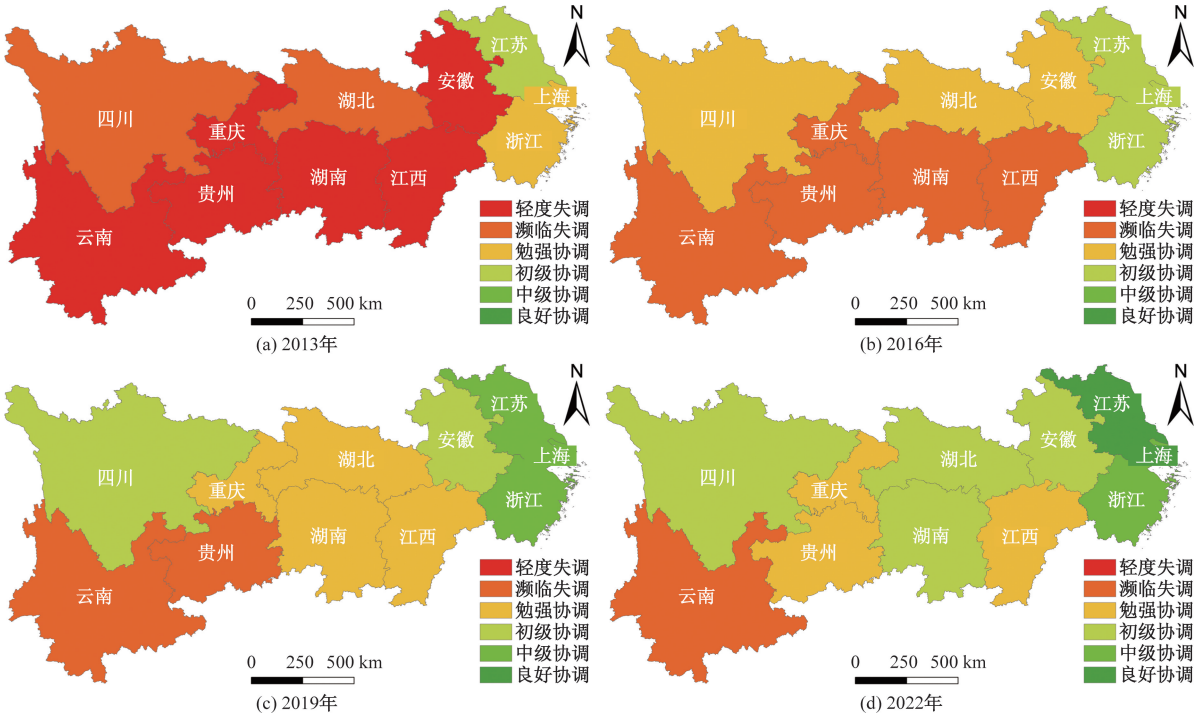
2013—2022年长江经济带数字经济发展与生态韧性趋于协调发展,耦合协调度平均值由0.425增加至0.642,由濒临失调向初级协调转变,年增长率为5.1%,表明数字经济发展对生态韧性具有显著正向促进作用。

另外,选取2013年、2016年、2019年、2022年作为代表年份进行时空格局演化分析(图5)。从时间上看,2013年长江经济带各省份耦合协调度介于0.25～0.62,大多处于"轻度失调"或"濒临失调"阶段,而位于长三角地区的上海、江苏和浙江则已进入协调等级。2016年,云南、贵州、重庆、湖南和江西耦合协调度介于0.41～0.50,属于濒临失调阶段;四川、湖北、安徽耦合协调度介于0.52～0.54,属于勉强协调阶段;而长三角地区耦合协调度介于0.67～0.70,属于初级协调阶段。2019年,除云南、贵州外,其余省份进入协调阶段,耦合协调度介于0.55～0.77。江苏、上海、浙江首先进入中级协调阶段,协调发展水平进一步提升。2022年,江苏率先进入良好协调阶段,耦合协调度达0.83,只有云南发展较为缓慢,仍处于濒临失调状态。总体来看,长江经济带下游地区的上海、江苏和浙江耦合协调度遥遥领先,而上游地区的云南、贵州相对滞后。长三角地区的领先得益于其拥有全国最完善的产业链,加上制造业和服务业深度融合,为数字技术应用提供了丰富的系统性优势。而云南、贵州的滞后是地理条件、产业结构、制度环境等多重约束累积造成的结果。

6 结论与建议

2013—2022年,长江经济带数字经济发展水平与生态韧性水平持续增长,空间分布呈现以长三角地区为主导、下游到上游依次递减的格局。①数字经济发展方面,数字普惠金融占比稳步提高,数字基础设施占比逐渐下降,数字产业发展总体上变化不大:在生态韧性角度,压力韧性表现为逐年上升趋势,状态、响应和创新韧性总体呈上升趋势。②在驱动因素方面,互联网接入端口数、单位面积长途光缆长度、数字金融覆盖广度指数是长江经济带生态韧性提升的最重要因素,可见数字经济发展对生态韧性的影响主要体现在数字基础设施和数字普惠金融这两个维度。③在耦合协调度方面,各省份协调等级逐步提高;协调等级高的省份主要集中于下游的长三角地区,而上游的云贵两省协调等级一直较低。据此,提出如下建议。

(1)分区域制定差异化发展策略。长江经济带下游的数字经济已处于相对领先水平,可进一步推动高端技术,如人工智能、大数据技术等的发展,加



审图号:GS(2023)2767号

图5 2013年、2016年、2019年、2022年数字经济发展和生态韧性的耦合协调度的空间格局

强当地的生态保护。针对中上游省份以制造业和旅游业发展为主的特征，可建设区域性数字经济枢纽，如布局5G基站、绿色数据中心等新型基础设施，出台税收优惠、补贴等激励措施，鼓励金融机构和高新技术企业进驻，逐步缩小上下游地区的数字鸿沟，提升长江经济带生态韧性的创新水平。

(2)推动区域间协同发展。从数字经济发展来看，需构建以长江三角洲城市群为引领，以长江中游城市群、成渝城市群为支撑，以黔中、滇中两大区域性城市群为补充，以沿江流域内的大中小城市为基础的层级架构，最终形成区域联动、协同高效、结构合理、绿色低碳的数字经济发展空间格局。在此布局下，需强化上海、武汉、重庆等超大城市以及南京、杭州、成都等特大城市的核心引领，同时发挥合肥、南昌、长沙、贵阳、昆明等大城市对区域发展的辐射带动作用。

(3)发挥河运优势，降低污染排放。长江作为全球内河航道中货运量位列第1的黄金水道，在区域发展的总体布局中具有重要战略地位。其货运规模的领先性不仅凸显了航道的核心经济价值，更使其成为支撑区域发展的战略依托。河运相比公路、铁路，具有单位运量大、能耗低、碳排放少的天然生态优势，因此通过强化河运主导的货运结构，从源头减少交通活动对生态系统的破坏，可为长江经济带生态韧性水平提升提供决策参考。

参考文献

[1] 孙新波，钱雨，张明超，等. 大数据驱动企业供应链敏捷性的实现机理研究[J]. 管理世界. 2019，35(9)：133-151.

[2] BENZIDIA S，MAKAOUI N，BENTAHAR O. The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance[J]. Technological Forecasting and Social Change，2021，165：120557.

[3] 赵宸宇. 数字化发展与服务化转型：来自制造业上市公司的经验证据[J]. 南开管理评论，2021(2)：149-163.

[4] TU D，CAI Y，LIU M. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between ecosystem services and new-type urbanization：a case study of the Yangtze River Economic Belt in China[J]. Ecological Indicators，2023，154：110535.

[5] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics，1973，4：1-23.

[6] DAKOS V，KéFI S. Ecological resilience：what to measure and how[J]. Environmental Research Letters，2022，17(4)：043003.

[7] SHI C，ZHU X，WU H，et al. Urbanization impact on regional sustainable development：through the lens of urban-rural resilience[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2022，19(22)：15407.

[8] 曾凡盛，冯兴华，唐燕，等. 鄱阳湖流域县域生态韧性空间格局演变研究[J]. 地理与地理信息科学，2022(6)：29-35.

[9] 夏楚瑜，董照樱子，陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究：以杭州市为例[J]. 生态学报，2022(1)：116-126.

[10] 陶洁怡，董平，陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境，2022(9)：1975-1987.

[11] 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(1)：54-60.

[12] 梁琦，肖素萍，李梦欣. 数字经济发展、空间外溢与区域创新质量提升：兼论市场化的门槛效应[J]. 上海经济研究，2021(9)：44-56.

[13] 郭海红，刘新民. 沿黄地区中心城市新型城镇化与生态韧性的耦合协调机制研究[J]. 华东经济管理，2023(4)：101-109.

[14] 鲁方圆，张郴，贾添羽，等. 长江经济带城市生态韧性时空演化特征及其驱动机制[J]. 环境科学，2025，46(7)：4592-4601.

[15] 张明斗，杨雨欣. 低碳城市建设对生态韧性的影响效应与机制：基于低碳城市试点政策的准自然实验[J]. 华东经济管理，2025，39(4)：69-81.

[16] TAPSCOTT D. The digital economy：promise and peril in the age of networked intelligence[M]. New York：McGraw-Hill，1996.

[17] 丛屹，俞伯阳. 数字经济对中国劳动力资源配置效率的影响[J]. 财经理论与实践，2020(2)：108-114.

[18] 张瑜，田开兰，高翔，等. 投入产出框架下数字经济核心产业赋能我国经济和就业增长的测算研究[J]. 统计研究，2025，42(1)：45-60.

[19] 杨钊霞. 数字经济对经济高质量发展的作用[J]. 山西财经大学学报，2025(S1)：1-3.

[20] MA D，ZHU Q. Innovation in emerging economies：research on the digital economy driving high-quality green development[J]. Journal of Business Research，2022，145：801-813.

[21] 邓荣荣，张翱祥. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. 南方经济，2022(2)：18-37.

[22] LI Z，WANG J. The dynamic impact of digital economy on carbon emission reduction：evidence city-level empirical data in China[J]. Journal of Cleaner Production，2022，351：131570.

[23] 郭炳南，王宇，张浩. 数字经济发展改善了城市空气质量吗：基于国家级大数据综合试验区的准自然实验[J]. 广东财经大学学报，2022(1)：58-74.

[24] 孙铭,王茗旭. 数字经济发展对生态韧性影响的机制及效应分析[J]. 环境科学,2025,46(7):4602-4614.
[25] 郭力,李欣烨. 数字经济发展对黄河流域生态韧性的影响效应研究[J]. 决策与信息,2023(5):86-96.
[26] 刘丁蓉,孙仕,杨新辉. 数字经济如何赋能生态韧性:基于中介效应与调节效应的实证分析[J]. 商学研究,2023(6):14-30.
[27] 邓倚珊. 闽三角城市生态韧性与数字经济耦合协调度及障碍因子研究[J]. 海峡科学,2024(10):108-116.
[28] 吕雁琴,范天正. 中国数字经济发展的时空分异及影响因素研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版),2023(3):47-60.
[29] 徐维祥,周建平,刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. 地理研究,2022(1):111-129.
[30] 石彩霞,贺小荣. 环境规制对城市生态韧性的影响效应:以长江中游城市群为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2023(6):56-71.
[31] 杨灿,朱玉林. 绿色发展视阈下湖南省生态足迹的驱动力因素分析[J]. 经济地理,2020(4):195-203.
[32] ZHANG X,ZENG H. Dynamic of three dimensional ecological footprint in the Pearl River Delta and its driving factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2017,37(2):771-778.
[33] 李建豹,黄贤金,孙树臣,等. 长三角地区城市土地与能源消费 CO_2 排放的时空耦合分析[J]. 地理研究,2019(9):2188-2201.
[34] 毕国华,杨庆媛,刘苏. 中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展[J]. 经济地理,2017(1):50-58.
[35] 程明洋,刘彦随,蒋宁. 黄淮海地区乡村人-地-业协调发展格局与机制[J]. 地理学报,2019(8):1576-1589.
[36] 任亚文,曹卫东,张宇,等. 长江经济带三大城市群城镇化与生态环境时空耦合特征[J]. 长江流域资源与环境,2019(11):2586-2600.
[37] PARK Y,MENG F,BALOCH M A. The effect of ICT,financial development,growth,and trade openness on CO_2 emissions:an empirical analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research,2018,25:30708-30719.

Study on Influence of Digital Economy Development on Ecological Resilience of Yangtze River Economic Belt and Their Coupling Coordination

LU Xianming,LI Huiwen,ZHOU Jincheng,QIN Yan

(School of Economics and Management,Hunan Institute of Science and Technology,Yueyang 414006,China)

Abstract: The imperative of enhancing ecological resilience within the Yangtze River Economic Belt while achieving the synchronized progress of economic development and ecological conservation is a matter of great urgency. The entropy method was employed to quantify the development of the digital economy and ecological resilience. By utilizing the partial least squares (PLS) approach and the coupling coordination degree model, an in-depth analysis is conducted on the influence and coupling relationships between the digital economy development and ecological resilience in 11 provinces and municipalities along the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022. The findings reveal that both the digital economy and ecological resilience have witnessed continuous upward trends. Among them, the Yangtze River Delta region demonstrates the highest levels, with values gradually declining from the downstream to the upstream areas. The proportion of digital inclusive finance has been steadily increasing, while that of digital infrastructure has been on a gradual decline. Overall, the development level of the digital industry has remained relatively static. The pressure resilience has been ascending year by year. The state, response, and innovation resilience have generally shown upward trajectories, although the innovation resilience experienced a notable decline in 2022. The number of Internet access ports, the length of long-distance optical cables per unit area, and the index of digital financial coverage breadth emerge as the most crucial factors propelling the enhancement of ecological resilience in the Yangtze River Economic Belt. Significant spatial disparities are evident in the coupling coordination degree between digital economy development and ecological resilience. Specifically, the coupling coordination degree in the downstream regions is markedly higher than that in the upstream regions. Consequently, it is essential to formulate region-specific development strategies. These strategies should aim to gradually bridge the digital divide between the upstream and downstream regions, reinforce the river-transport-dominated freight structure, and curtail pollution emissions. Moreover, promoting collaborative development across regions is vital for the holistic improvement of ecological resilience.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; digital economy; ecological resilience; coupling coordination degree model; partial least squares method