

王海荣,王永峰,付占辉.黄河流域数字经济发展与生态环境的协同演化及交互响应[J].中国沙漠,2026,46(3):143-153.

黄河流域数字经济发展与生态环境的 协同演化及交互响应

王海荣¹,王永峰²,付占辉³

(1.河南省第二地质大队有限公司,河南 郑州 450016; 2.河南省国土空间调查规划院,河南 郑州 450052; 3.河南大学 文化旅游学院,河南 郑州 450046)

摘要:厘清数字经济发展与生态环境的协同演化规律对推动黄河流域绿色转型与可持续发展具有重要理论与实践意义。本文以黄河流域81个地市为研究单元,综合运用熵权法、改进的耦合协调度模型、面板VAR模型等方法,系统揭示二者协同演化的时空格局及交互响应机制。结果表明:(1)2011—2021年黄河流域数字经济发展水平稳步提升,生态环境发展水平整体呈现增长-下降-增长的变化趋势,二者空间分异特征均表现为上游<中游<下游。(2)数字经济发展与生态环境的协同水平表现为先降后升的“U型”变化趋势,且空间正自相关性持续增强。(3)高值集聚区域(HH)集中分布在中原城市群核心区和山东半岛,空间范围逐步扩大;低值集聚区域(LL)集中在青甘等上游地区,空间范围变化较小,具有低值锁定效应;低值异质(LH)和高值异质(HL)都呈现零星分布状态。(4)两系统均呈现路径依赖的发展趋势,且随时间逐步减弱;二者具有相互的正向促进作用,其中数字经济对生态环境的推动效应更显著。最后从实施差异化空间治理、增强高值区辐射能力、破解低值锁定效应等方面提出相应的政策建议。

关键词:数字经济发展;生态环境;协同演化;交互响应;黄河流域

文章编号: 1000-694X(2026)03-143-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00022

中图分类号: F205

文献标志码: A

0 引言

鉴于黄河流域在中国经济发展和生态安全中的重要地位^[1],党中央于2019年将黄河流域生态保护和高质量发展确立为重大国家战略,习近平总书记先后三次主持召开黄河专题座谈会。近年来黄河流域经济社会发展取得了长足进步,但长期忽视生态环境保护的经济增长模式带来一系列负面影响,生态环境与经济发展之间的矛盾不容忽视,并成为重大国家战略推进的主要障碍^[2]。数字经济是落实重大国家战略的新动能,目前在经济发展转型中发挥着越来越重要的作用^[3]。党的二十大报告进一步明确提出加快发展数字经济,把握数字经济带来的发展机遇。党的二十届三中全会提出要健全促进实体经济和数字经济深度融合制度。在黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略这一特

殊场域,数字技术的赋能效应与生态保护的刚性约束并存,既有通过数字产业化替代传统高耗能产业的机遇^[4],也需警惕数字基础设施建设可能引发的生态扰动。在这样的背景下,协调数字经济发展与生态环境的关系不仅是贯彻“绿水青山就是金山银山”理念的必要路径,更是突破黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略实施瓶颈的关键路径。

目前数字经济发展与生态环境关系的研究主要集中在两个方面:一是在理论机制探讨方面,主要关注数字经济发展通过促进技术创新、产业结构升级、资源配置优化、新动能释放等路径,对生态环境产生影响^[5-8]。二是在实证研究方面,主要是采用空间计量经济模型、准自然实验、支持向量机模型、耦合协调度模型、协整分析等方法,利用省际面板数据、省域、典型区域或者地市横截面数据探讨数字经济对生态环境的影响^[9-12]。随着黄河流域国家

收稿日期:2025-11-19; 改回日期:2026-02-10

资助项目:国家自然科学基金项目(42401254)

作者简介:王海荣(1981—),女,河南焦作人,高级工程师,主要从事地质环境治理与生态修复的研究。E-mail: 312462147@qq.com

通信作者:付占辉(E-mail: fuzh1989@163.com)

战略的深入推进,学者也开始关注黄河流域数字经济发展与生态环境的关系^[13-14]。由此可见,目前在数字经济发展与生态环境方面取得了较多研究成果,但仍存在以下局限:一是现有研究更多关注数字经济发展对生态环境的单向影响,缺少对两大子系统双向反馈机理的系统探讨;二是在黄河流域数字经济发展与生态环境关系的研究中,对地市级单元的关注较少,难以捕捉流域内部细微的空间异质性特征。为弥补上述不足,本文尝试进行两方面的扩展:第一,构建数字经济发展与生态环境协同演化机理分析框架,探寻两方面的相互作用机理;第二,将研究尺度设定为地市,利用改进的耦合协调度模型测算数字经济发展与生态环境的协同演化水平,并利用面板VAR模型探讨二者的动态响应关系,以期为黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的顺利推进提供理论依据和技术支撑。

1 研究方法数据来源

1.1 数字经济发展与生态保护协同演化机理框架

借鉴复杂系统理论与协同进化思想,将数字经济-生态环境协同演化界定为:在区域发展过程中,两大子系统通过持续的双向互动与反馈调节,推动

系统整体在结构、功能与发展路径上发生协同变化^[15]。其核心不仅在于关注系统间的静态联系,更强调二者在相互作用中不断重塑彼此的发展路径。一方面,数字经济以数据为核心生产要素,依托5G、人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术,为生态环境保护及治理提供了新路径与新动能;另一方面,优良的生态环境本底不仅能够为中心、通信基站等数字基础设施的绿色布局提供必要的空间载体和生态保障,其内在的资源约束与政策规制也能推动数字经济向绿色化方向演进。基于上述认识,构建数字经济与生态环境协同演化的机理框架(图1),以揭示二者互馈共生的动态关系与演化逻辑。

1.1.1 数字经济的驱动效应及其生态反馈

数字经济通过技术赋能、要素配置优化与模式创新等内在驱动力,对生态环境产生多维度的影响,其核心作用路径主要表现为3个方面:①数字经济通过增效减排功能推动绿色转型。数字技术深度融入能源、工业、交通、建筑等领域,促进产业结构向智能化、绿色化方向升级。数字产业化能够催生低耗高效的绿色产业,而产业数字化则通过工业互联网、智能制造等技术优化生产工艺和能源管理,实现生产集约化与清洁化,从源头降低单位产

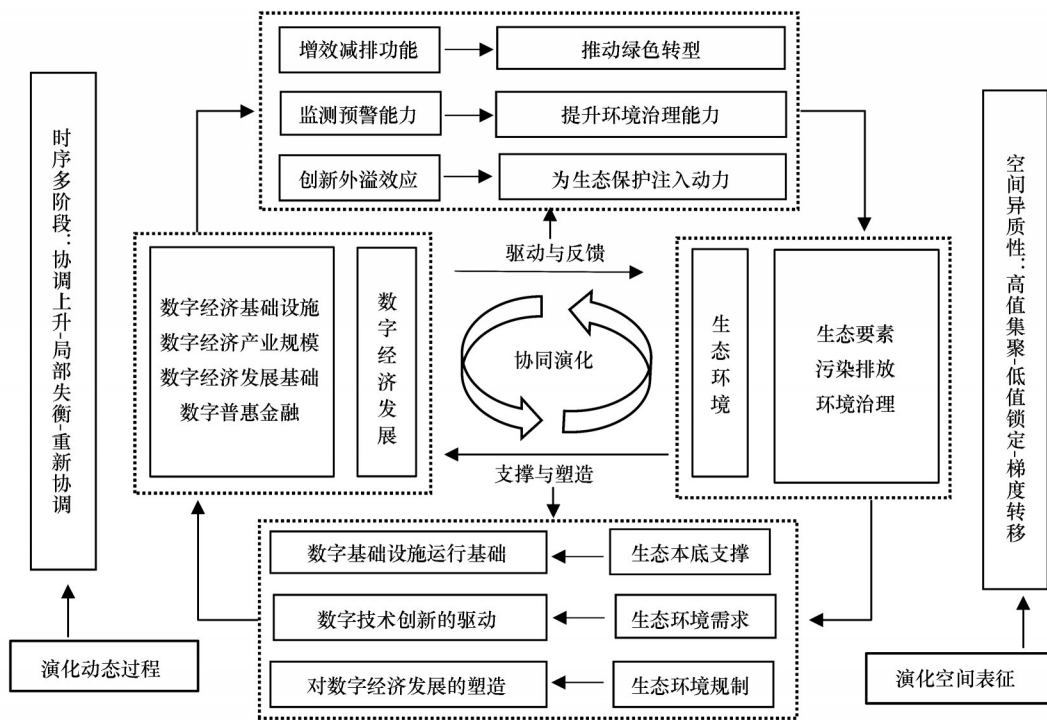


图1 数字经济发展与生态环境协同演化机理框架

Fig.1 A synergistic evolution mechanism framework of digital economy development and ecological environment

出的资源消耗与污染排放,从而推动绿色发展转型^[16]。②数字经济依托智能监测提升环境治理能力。通过构建空天地一体化的生态环境物联网监测网络,实现对生态环境要素的全时全域立体感知。大数据与人工智能模型的应用,有利于推动生态环境治理从被动应对向“主动预警、精准防控”的模式变革,从而提升环境风险防控能力与治理效率。③数字经济通过创新外溢为生态环境注入持续动力。数字经济本身就是技术创新的产物,并通过降低信息获取交易成本、优化创新资源配置,进一步激发绿色技术创新,为污染治理和生态修复提供新的解决方案。

另外,数字经济的发展如果缺乏绿色导向,其自身也会产生显著的“负外部效应”,例如,数据中心的巨大能耗、电子废弃物增多、设备全生命周期资源消耗与污染,均会对生态环境形成约束与胁迫。同时,这种生态压力也会反过来对数字经济自身的发展产生影响。

1.1.2 生态环境的支撑约束及其对数字经济的塑造

生态环境不仅为数字经济发展提供基础支撑,也构成其重要的刚性约束,并通过需求拉动与制度规制塑造其演进方向,主要体现为3个方面:①生态环境是数字经济发展的本底支撑与刚性约束。数字基础设施(如数据中心、通信基站等)的建设和运行高度依赖特定的自然环境条件。比如,适宜的气候条件和良好生态环境可降低数据中心运行的冷却能耗,减少碳足迹,从而为数字产业提供可持续发展的生态基础;反之,生态退化或资源受限将直接推高运营成本、限制设施布局,对数字经济发展形成制约。②生态环境需求对数字技术创新的驱动作用。日益严峻的生态环境挑战(如气候变化、污染防治、温室效应治理等)为数字技术的创新与应用创造了巨大的市场需求。例如,“双碳”目标催生AI碳核算、区块链碳交易等技术的需求。这种由生态需求引致的技术创新,不断重塑数字经济的发展方向。③生态环境规制的导向作用对数字经济发展的塑造机制。环境政策体系(正式环境规制)与公众环保意识(非正式环境规制)共同构成数字经济绿色转型的制度环境。双重规制压力倒逼企业将数字技术应用于环境管理与节能减排^[17],同时也催生了服务于环境治理的数字环保产业,引导资本和技术向绿色低碳领域聚集,推动数字经济向环

境友好型发展模式转型。

另外,如果不重视生态环境保护,可能增加数字基础设施的运维成本和运行风险,最终形成生态-数字协同演进的瓶颈。因此,生态环境并非被动受作用的客体,而是通过支撑-拉动-规制三重机制,动态塑造数字经济的发展轨迹,二者在反馈与适应中共同演进。

1.1.3 协同演化的动态过程与空间表征

在上述双向驱动-反馈机制的作用下,数字经济与生态环境两大子系统在互馈调适中不断改变自身状态,共同推动数字经济-生态环境耦合系统的时空动态演化^[18]。在不同发展阶段,受反馈强度、政策调控及区域条件等因素影响,耦合系统可能呈现协调上升-局部失衡-重新协调的非线性演进轨迹。例如,在数字经济快速发展而环境规制滞后的阶段,生态负外部性累积可导致系统协调水平下降,从而进入失衡调整期。随着生态规制强化与绿色市场需求增强,数字经济逐步实现绿色转型,系统随之迈向协调提升新阶段。在空间上表现出高值集聚、低值锁定、梯度转移的异质性格局。例如,在基础设施完善、政策执行力强、市场机制完备的区域,正向驱动与适应性反馈更为顺畅,易形成高水平的协同集聚区。而在生态本底脆弱、转型能力不足、制度响应滞后的区域,系统则可能因负向反馈乏力或适应不良而陷入低水平协同的锁定状态,或成为高水平和低水平交错分布的过渡地带。

1.2 数字经济发展与生态环境协同演化水平测度方法

1.2.1 数字经济发展与生态环境水平测度

(1) 指标体系构建。为系统衡量数字经济发展水平,参考相关研究成果^[19-20],构建包含数字经济基础设施、数字经济产业规模、数字经济发展基础和数字普惠金融指数4个维度共14项指标的评价体系(表1)。数字经济基础设施维度表征数字化硬件支撑能力,选取互联网宽带用户数和移动电话用户数两项指标,以反映地区信息网络接入的普及程度与潜在市场规模。数字经济产业规模维度衡量数字核心产业及其对实体经济的渗透程度,具体选取电信业务收入和邮政业务收入等4项指标反映数字服务业市场产出。数字经济发展基础维度包括人均地区生产总值、第三产业占地区生产总值比重、

表1 黄河流域数字经济发展与生态环境综合评价指标体系
Table 1 Comprehensive evaluation indicator system for digital economy development and ecological environment in the Yellow River Basin

一级指标	二级指标	变量
数字经济 发展	数字经济 基础设施	互联网宽带用户数
		移动电话用户数
	数字经济 产业规模	电信业务收入
		邮政业务收入
		信息传输、计算机和软件业从业人员数
		交通仓储邮政业从业人员数
	数字经济 发展基础	人均地区生产总值
		第三产业占地区生产总值的比重
		第三产业就业人员比重
		财政一般预算内支出中教育支出
	数字普惠 金融指数	覆盖广度指数
		使用深度指数
		数字化程度指数
	生态环境	生态要素
人均公园绿地面积		
污染排放		工业烟尘排放量
		工业废水排放量
		工业二氧化硫排放量
环境治理		工业固体废物综合利用率
		生活垃圾无害化处理率
		建成区绿化覆盖率

第三产业就业人员比重、财政教育支出和财政科技支出,以刻画经济发展水平、产业结构与公共服务条件对数字经济发展的支撑能力。数字普惠金融指数采用北京大学数字金融研究中心与蚂蚁集团编制的“中国数字普惠金融指数”作为表征指标,以反映数字技术在金融服务中的渗透深度与普惠成效。

生态环境子系统主要考虑生态要素、污染排放、环境治理3个方面,共包含8个指标(表1)。在生态要素方面,选用人均水资源量与人均公园绿地面积作为表征,分别反映区域关键自然资源禀赋与城市生态空间供给水平。在污染物排放方面,采用工业烟尘排放量、工业废水排放量与工业二氧化硫排放量,用以衡量生产活动对生态环境的压力。在环境治理方面,包含工业固体废物综合利用率、生活垃圾

无害化处理率以及建成区绿化覆盖率等3项指标,共同反映社会在污染治理水平与生态建设成效。

基于ArcGIS平台的空间分析功能,采用自然断点分级法对黄河流域数字经济发展水平和生态环境综合评价结果进行可视化表达。

(2) 综合指数测度。采用极大-极小值法对各个指标进行无量纲化处理,在此基础上计算指标权重:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 表示样本指标权重; n 为样本的个数($1 \leq i \leq n$)。

计算第 j 个指标的熵(e_j):

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (P_{ij} \ln P_{ij}), e_j \in [0,1] \quad (2)$$

计算差异性系数(g_j):

$$g_j = 1 - e_j \quad (3)$$

计算第 j 项指标的权重(W_j):

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (4)$$

式中: m 为指标的个数($1 \leq j \leq m$)。

计算两个子系统的综合指数(u_j):

$$u_j = \sum_{j=1}^m W_j X_j \quad (5)$$

1.2.2 耦合协调度测算

传统耦合协调度模型存在两个局限性:其一,协调度值域在 $[0,1]$ 内非均匀分布,多数测算结果集中于高值区(即趋近于1),导致系统间协调状态的区分效度不足,降低了实际应用价值;其二,常规算法默认各子系统具有同等重要性,这种均权处理导致最终计算结果简化为子系统分值乘积的 $1/2n$ 次方,难以客观反映复杂系统的异质性特征。针对上述问题,王淑佳等^[21]对传统协调发展度模型进行改进,在参数敏感性和结果解释力上显著提升。因此,本文借鉴耦合协调度改进模型的思路,测度黄河流域数字经济发展与生态环境耦合协调度。假设两个子系统中 U_2 为最大值,则计算公式为:

$$C = \sqrt[2]{[1 - (U_2 - U_1)] \times \frac{U_1}{U_2}} \quad (6)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (7)$$

式中: C 、 D 分别表示耦合度和耦合协调度,二者取值范围均在0至1。借鉴已有研究成果,将生态环境与

数字经济发展的耦合协调阶段细分为4个阶段,并进一步划分为8个协调度等级,详细划分情况见表2。

表2 耦合协调度等级

Table 2 Classification of coupling coordination degree

耦合度	耦合阶段	耦合协调度	耦合协调程度
0.90~1.00	高度耦合	0.90~1.00	优质协调
0.61~0.89	磨合耦合	0.61~0.89	良好协调
		0.56~0.60	中级协调
		0.48~0.55	初级协调
0.21~0.60	拮抗耦合	0.40~0.47	濒临协调
		0.33~0.39	初级失调
		0.20~0.32	中级失调
0.10~0.20	低度耦合	0.10~0.19	严重失调

1.3 生态环境与数字经济发展动态响应关系分析方法

面板向量自回归(Vector Autoregression, VAR)模型融合了面板数据的时间序列特征与VAR模型的动态分析优势,在探究变量间因果关系及随机扰动对变量的冲击效应上展现出独特优势。基于此,本文将面板VAR模型应用到黄河流域数字经济发展与生态环境的动态响应测度之中,主要包括以下步骤:变量平稳性和格兰杰因果关系检验、利用广义矩估计(Generalized Method of Moments, GMM)方法在面板数据上估计VAR、估计脉冲响应函数,具体公式和方法过程见黄凌翔等^[22]的研究。

1.4 数据来源

鉴于四川已经被纳入长江经济带国家战略之中,为避免重复,本文不考虑四川省。据此,本文的研究范围涵盖了青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙古、河南、山东8个省区,并结合数据的可获性,共选取了81个地市。样本年份为2011—2021年。数据来自《中国城市统计年鉴》及各地市统计年鉴。针对部分缺失数据,采用插值法进行补充。

2 结果与分析

2.1 数字经济发展和生态环境时空特征

2.1.1 时序变化特征

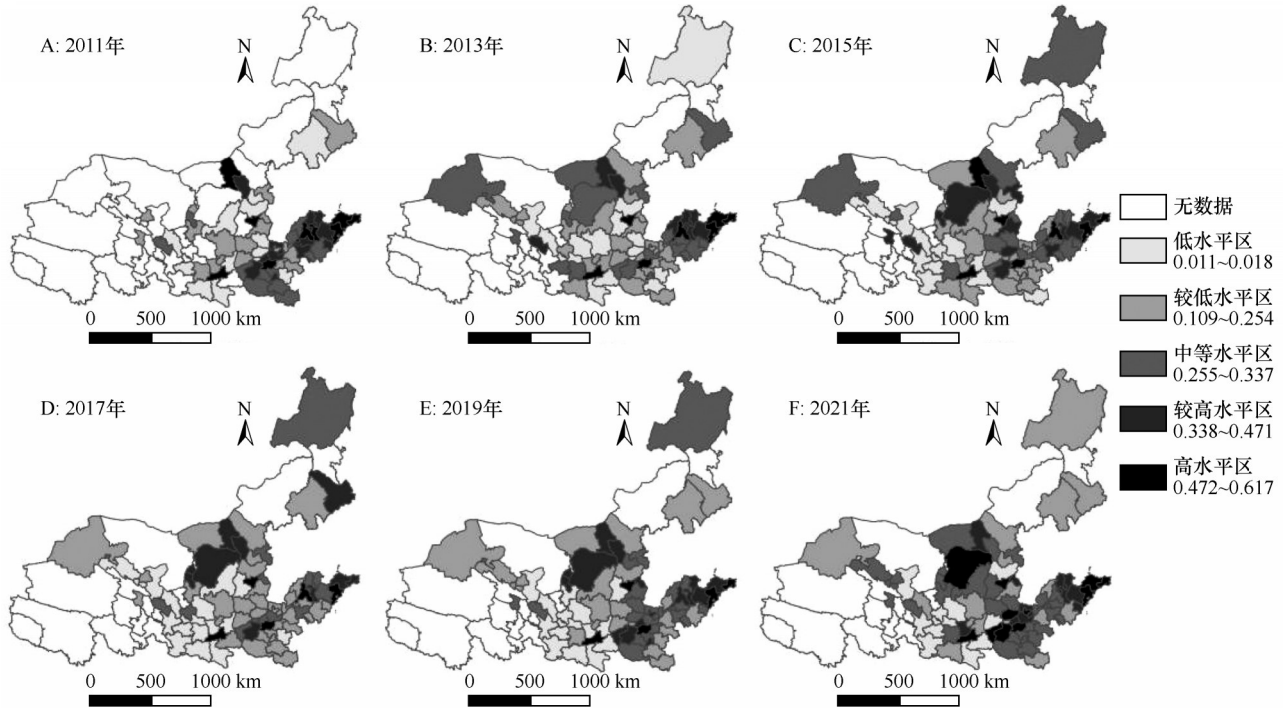
2011—2021年,黄河流域数字经济发展水平整体呈现增长的态势,综合指数从0.131增加至0.427,

反映出区域数字化转型成效显著。演变过程可以分为3个阶段:2011—2013年增长较快,主要得益于《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》的政策引导,以及物联网、云计算等新兴技术的初步产业化集聚;2014—2017年进入增速趋缓期,由于受国家供给侧结构性改革深入推进、传统产业转型压力加大、环境规制强化等影响,数字经济与实体经济的融合面临阶段性调整,资源错配和转型成本问题开始显现,导致数字经济发展速度有所趋缓;2018年以后,“数字中国”建设步伐加快、5G等新型基础设施开始大规模部署,不仅直接拉动了数字产业化增长,也为产业数字化提供了技术支撑,推动数字经济又开始呈现快速增长态势。

研究期内黄河流域生态环境发展水平整体呈现增长-下降-增长的波动变化态势,综合指数从0.319上升到0.392,并在2016年达到第一个高峰,这与“十二五”期间生态文明制度建设及污染治理力度加大密切相关。随后出现了短暂回落,到2018年下降到最小值0.263,流域内部分重化工业集中区域在环保约束强化背景下,新兴绿色产业体系尚未完全形成,短期内环境系统仍承受较大负荷;2019年以后呈现波动上升状态,主要原因是随着黄河流域生态保护和高质量发展战略正式实施,各地在生态修复、减污降碳等方面的投入持续加大,推动生态环境状况逐步改善,到2021年增长到0.328。

2.1.2 空间分异特征

黄河流域数字经济发展空间分异显著(图2)。济南、青岛、郑州、西安等城市长期位居前列,构成数字经济发展的第一梯队;发展相对滞后的城市主要分布在中上游地区省会(首府)城市以外的地区。研究期内黄河流域上游、中游和下游地区的平均值分别为0.164、0.203和0.356,总体表现为上游<中游<下游的阶梯递减空间格局。这种空间不均衡状况形成的主要原因是:中上游地区受限于地理环境和自然条件,传统产业转型缓慢,多以传统能源化工和农业生产为主,数字经济发展内生动力不足;而下游地区的城市凭借优越的区位优势和良好的发展基础,在电子商务、物联网和云计算等领域已具备良好的产业条件,数字产业链初具雏形,并产生规模效应,为数字经济发展提供了有力支撑。另外,研究期内空间演化呈现两方面趋势:一是低值区域数量逐步减少,高值区域数量持续增加;二是



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图2 黄河流域数字经济发展水平空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the development level of the digital economy in the Yellow River Basin

以关中平原、中原城市群、山东半岛城市群为核心的高值区域逐渐向周边扩展,逐步形成多层的核心-边缘结构。

黄河流域生态环境空间差异也较为明显(图3)。生态环境发展水平较高的城市在中下游地区分布较多,较低的城市在上游地区分布较多,三大区域(上游、中游、下游地区)的生态环境发展水平均值分别为0.218、0.243和0.337,总体表现为上游<中游<下游的梯度递减特征。

2.2 数字经济发展与生态环境协同演化的时空特征

2011—2021年,黄河流域数字经济发展与生态环境耦合协调度整体呈现先轻微下降后缓慢提升的“U型”发展态势。研究期内处于严重失调、中级失调的城市数量有所缩小,而初级协调、濒临协调的城市数量逐步增大(图4)。耦合协调度的演变趋势可以分为两个阶段:①2011—2015年协调度普遍偏低,约69.1%的地市处于中级及以下失调状态。2011年严重失调的地市零星分布在黄河中上游(比如陕甘地区),下游鲁豫交界地带形成显著中级失调集聚区,仅济南达到良好协调,呈现单极引领格局;2013年下游地区开始整体向中级协调过渡,青

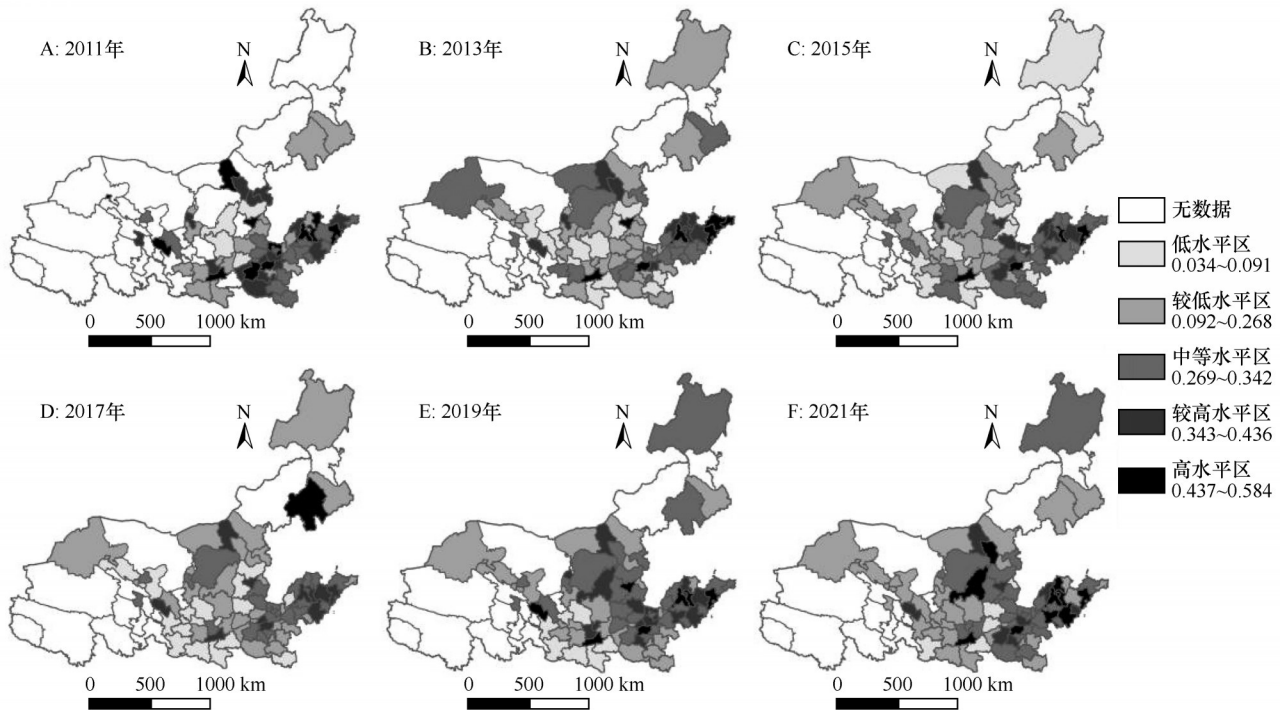
岛、烟台、威海等沿海城市开始形成中级协调增长极;2015年协调度低谷期,中上游形成以嘉峪关—汉中为轴心的严重失调集中区,下游沿海地区(比如烟台市、威海市)仍然保持中级协调。②2017年以后黄河流域进入协调度回升阶段,空间格局呈现点轴扩散特征,其中郑州、西安两大国家中心城市突破至良好协调等级,形成新型双核驱动格局;2019年处于良好协调状态的城市数量开始增多,下游地区的郑州—济南—青岛协调走廊初步形成;至2021年,鄂尔多斯作为能源型城市首度跻身良好协调行列。

为进一步揭示黄河流域数字经济发展和生态环境耦合协调度的空间差异,汇总计算出各城市耦合协调度研究期内平均值。以耦合协调度数值0.4为界,仅有太原市、西安市、郑州市、济南市、青岛市、烟台市、威海市等7个城市进入协调发展阶段(耦合协调度>0.4),其中青岛市耦合协调度平均值超过了0.5;流域内超过90%的城市仍处于失调状态。

2.3 数字经济发展与生态环境协同演化的空间集聚特征

2.3.1 全局空间自相关

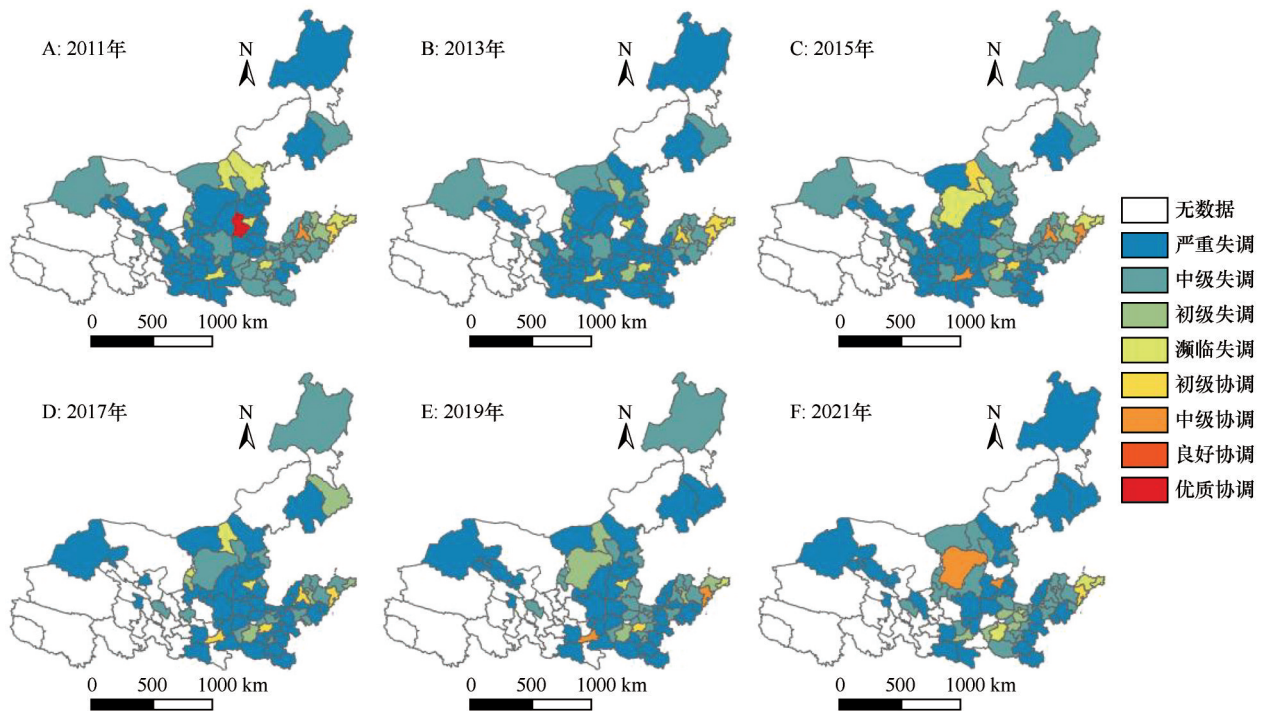
2011—2021年黄河流域生态环境与数字经济



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改

图 3 黄河流域生态环境发展水平空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological environment development in the Yellow River Basin



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改

图 4 黄河流域数字经济发展与生态环境耦合协调度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the coupling coordination between digital economy development and ecological environment in the Yellow River Basin

发展耦合协调度的莫兰指数均为正,且均通过相关检验($P<0.05$),表明具有显著的空间正相关性。此

外,研究期内莫兰指数整体表现为增长态势,耦合协调度集聚程度呈现增强的态势。

2.3.2 局部空间自相关

为进一步探讨耦合协调度的空间集聚特征,通过局部空间自相关分析将黄河流域81个地级市分为4种类型。

(1) 高值聚集区域(HH关联型)。该类型区域内各自身与相邻地区的耦合协调度都较高,空间分异程度较小。2015年以前主要分布在黄河流域下游地区的临海区域,形成单一集聚区。2015年以后,高值集聚区的范围逐步向内陆扩展,一方面向鲁西地区延伸,这与山东省推行一系列促进区域协调发展和数字经济发展的政策措施密切相关,在产业结构逐步优化与污染治理强度加大的背景下,逐步形成沿海城市与鲁西内陆地区城市良性互动的局面;另一方面,随着中部崛起战略、中原城市群战略和国家中心城市建设的推进,郑州对周边城市的辐射带动作用也日益凸显,生态环境建设也同步推进,以郑州为核心的中原城市群核心区也逐渐发展成为另一个高值集聚区。

(2) 高值异质区域(HL关联型)。该类型区域表现为城市自身的耦合协调度较高而其相邻城市的耦合协调度较低,空间分异程度较大。主要零星分布在山东西部、河南南部以及中上游地区的省会(首府)城市周边,空间范围由单一组团向多组团演变。该类区域的城市虽然自身耦合协调度相对较高,但由于地理区位、交通条件或发展阶段等因素限制,对周边城市的辐射与带动能力有限,再加上周边区域的城市受限于自身发展条件,难以形成有效的良性互动,这就造成了高值异质区域的产生。

(3) 低值异质区域(LH关联型)。该类型区域耦合协调度空间分异程度较大,自身的耦合协调度较低而相邻地区的耦合协调度较高。主要分布在河南省的豫东和豫西地区、晋西南地区以及陕甘部分地区,空间范围逐步缩小。该类型的区域主要是分布在高值集聚区与低值集聚区的过渡带,尽管在地理上邻近高值区,但由于自身发展动力不足、基础设施薄弱以及自身接受辐射的能力有限等原因,形成了耦合协调度的“低值孤岛”。

(4) 低值集聚区域(LL关联型)。该类型区域内耦合协调度的空间分异程度较小,自身与相邻地区的耦合协调度均较低。主要分布在黄河流域上游地区,比如青海、甘肃西部比较明显,其空间范围在研究期内变化较小,表现出较强的稳定性。这类城市的经济发展起步晚,硬件(基础设施)和软件

(制度环境)不完善,且多位于生态敏感区,形成耦合协调度的“凹陷地带”。

2.4 数字经济发展与生态环境动态响应关系

2.4.1 变量平稳性和格兰杰因果关系检验

首先利用LLC(Levin-Lin-Chu)和IPS(Im-Pesaran-Shin)两种面板单位根检验方法进行指标平稳性检验。结果表明,数字经济发展(DE)和生态环境(EE)变量均在1%的显著水平拒绝原假设(表3),这表明生态环境和数字经济发展均为平稳序列,满足后续进行格兰杰因果关系检验和回归的条件。

表3 差分后变量平稳性检验

Table 3 Stationarity test for variables after differencing

检验方法	EE	DE
LLC	-20.863*	-16.467*
IPS	-3.301*	-2.612*

注:*表示 $P<0.01$ 。

利用格兰杰因果关系检验方法对黄河流域生态环境与数字经济发展是否构成因果关系进行检验。检验结果显示,黄河流域各地市生态环境与数字经济发展之间存在双向交互的格兰杰因果关系(表4),这表明黄河流域生态环境与数字经济发展具有协同关联性。

表4 格兰杰因果关系检验

Table 4 Granger causality test results

原假设	统计检验	结论
DE不是EE的Granger原因	17.638*	拒绝原假设
EE不是DE的Granger原因	24.131*	拒绝原假设

注:*表示 $P<0.01$ 。

2.4.2 面板VAR模型的GMM估计

在变量平稳性检验和格兰杰因果关系检验的基础上,对面板数据进行GMM估计,以揭示黄河流域EE和DE之间的交互作用和响应机制。依据AIC原则确定最佳滞后期为3(表5),基于GMM方法的面板VAR模型估计结果具体见表6。

黄河流域生态环境(EE)滞后1期对当期的影响系数为正(0.363),且在1%的显著水平上通过检验,2期及以后对当期的影响不显著;数字经济发展(DE)滞后1期和2期对当期的影响系数均为正(0.683和0.291),且都在1%的显著水平上通过检验。这表明EE和DE均存在正向累进效应和惯性

表5 最优滞后阶数检验
Table 5 Test for optimal lag order

滞后期数	AIC	BIC	HQIC
1	-6.459	-5.764*	-6.183*
2	-6.497	-5.706	-6.187
3	-6.521*	-5.628	-6.166
4	-6.413	-5.396	-6.014
5	-6.369	-5.207	-6.009

注：*表示 $P < 0.01$ 。AIC、BIC、HQIC 分别为赤池信息准则 (Akaike Information Criterion)、贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion)、汉南-奎因信息准则 (Hannan-Quinn Information Criterion)，用于确定面板向量自回归模型的最优滞后阶数。

表6 基于GMM方法的PVAR模型估计结果
Table 6 Estimation results of the PVAR model using the GMM approach

EE		DE	
变量	系数	变量	系数
L1.h_EE	0.363*	L1.h_EE	0.019
L1.h_DE	0.562*	L1.h_DE	0.683*
L2.h_EE	0.126	L2.h_EE	0.046*
L2.h_DE	-0.051	L2.h_DE	0.291**
L3.h_EE	0.016	L3.h_EE	0.009
L3.h_DE	0.012	L3.h_DE	-0.171

注：*表示 $P < 0.01$ ；EE为生态环境；DE为数字经济发展。

特征，且数字经济发展(DE)的正向惯性要强于生态环境(EE)。因此，在推进黄河流域生态环境保护和数字经济协同发展过程中应充分发挥二者惯性机制，强化生态环境治理措施与数字经济规划的协同性，以避免这种正向惯性机制的减弱。此外，数字经济发展滞后3期为负向显著影响(系数为-0.171)，因此，在实践中应协调好数字经济规模扩张与质量提升的关系。

黄河流域数字经济发展(DE)滞后1期对生态环境(EE)的影响系数为正(0.562)，且在1%的显著水平上通过检验；滞后2期及以后对生态环境(EE)的影响不显著。生态环境(EE)滞后1期对数字经济发展(DE)的影响不显著；滞后2期对数字经济发展(DE)的影响系数为正(0.046)，且在1%的显著水平上通过检验；滞后3期及以后对数字经济发展(DE)的影响不显著。这说明黄河流域生态环境(EE)与数字经济发展(DE)在一定程度上存在互为促进关系，DE对于EE的正向促进作用会更早出现且强度更大。其原因主要源于两方面：一方面，数字经济发展可通过技术赋能、效率提升等途径较快转

化为环境治理效能；另一方面，生态环境对数字经济的支撑往往需要通过产业结构调整、制度环境优化等多重机制传导，过程更为复杂且需更长时间积累。

2.4.3 基于面板VAR模型的脉冲响应分析

为揭示一个标准差大小的随机扰动冲击对分析变量当期和未来值的动态影响轨迹，本文利用Stata软件对EE、DE进行脉冲响应分析。

生态环境(EE)和数字经济发展(DE)对于自身的冲击均表现为显著的正向响应，最大值均出现在第1期，随后呈现波动减弱直至不显著。EE和DE的自我正向响应分别延续至第5期和第7期。这表明黄河流域EE和DE均存在路径依赖特征，并随着时间的推移逐步减弱。

对于一个标准差EE的冲击，DE在第3、4期呈显著正向响应。这表明生态环境改善对数字经济发展具有促进作用，但该作用具有明显的滞后性。如前所述，生态环境主要通过本底支撑、需求拉动、制度规制等3条路径影响数字经济，这一传导过程涉及政策制定、企业响应、结构调整与技术进步等多重环节，且受流域生态环境整体水平制约，因此这种促进作用尚未充分释放并表现为滞后性。对于一个标准差DE的冲击，EE在滞后2~7期表现为显著的正向冲击响应，这表明数字经济发展对于生态环境存在显著的助推作用。

3 结论与建议

2011—2021年，黄河流域数字经济与生态环境协同演化呈“U型”趋势，空间分异显著。研究期内，数字经济发展与生态环境耦合协调度呈现先轻微下降后缓慢提升的变化趋势，绝大多数城市处于失调或濒临协调状态，整体协调水平偏低。这表明目前黄河流域的区域协同处于以点带面的初级阶段，数字-生态良性互动机制尚未广泛形成。空间分布上，协同演化水平总体表现为上游<中游<下游。这种空间梯度格局不仅源于自然条件与区位差异，更反映出生态约束、产业基础与治理能力共同塑造的区域分化。

空间集聚特征明显，呈高值集聚区扩张、低值集聚区锁定、异质区镶嵌格局。耦合协调度表现出持续增强的空间正自相关性，形成高值集聚、低值锁定及异质过渡的多元化模式。高值集聚区域(HH)集中分布在中原城市群核心区和山东半岛，空间范围逐步扩大，表现为区域良性互动增强的趋

势。该类区域应继续保持数字经济与生态环境协同发展的优势,通过国土空间优化引导产业合理布局,强化技术与管理模式的外溢效应。低值集聚区域(LL)主要集中在青甘等上游地区,空间范围研究期内变化较小,具有“低值锁定效应”,这类区域应充分发挥后发优势,通过绿色招商与区域协作提升发展能力,从而走出区域“锁定效应”陷阱。低值异质区域(LH)主要分布在河南省的豫东和豫西地区、晋西南地区以及陕甘部分地区,空间范围逐步缩小并逐步向中上游地区转移。高值异质区域(HL)主要零星分布在山东西部、河南南部以及中上游地区的省会(首府)城市周边,从单一组团逐渐向多组团演变。这两类异质区域的共同特点是耦合协调度高值城市 and 耦合协调度低值城市相邻,表明区域联动与辐射传导机制不畅,其症结在于中心辐射不足与边缘承接能力有限的结构性矛盾。在实践中这两类区域的工作重点是提升高值城市带动能力和低值城市接受辐射的能力,促进区域间要素有序流动与协同发展。

数字经济与生态环境两系统具有路径依赖与双向非对称促进特征。黄河流域数字经济发展与生态环境均表现为明显的路径依赖和自我增强特征,并随时间都逐步减弱,其中数字经济发展的路径依赖减弱速度比生态环境更快。同时两系统之间还具有相互的正向促进作用,且存在非对称性,其中数字经济发展对生态环境的正向促进作用更明显。这一非对称响应机制有助于解释数字经济发展与生态环境协同演化时空格局的形成:在数字经济先发区域,其环境治理效能提升较快,有利于形成协同演化的高值集聚区;而在生态约束较强、数字基础薄弱的区域,系统响应迟缓,则易陷入低值锁定。因此,未来应着力增强二者之间正向累进效应以及互为促进作用,一方面强化数字技术与产业对生态环境保护的赋能作用,另一方面完善生态规制与绿色市场机制,提升生态环境对数字经济的支撑能力。

参考文献:

- [1] 石涛. 黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调度及空间网络效应[J]. 区域经济评论, 2020(3): 25-34.
- [2] 刘琳轲, 梁流涛, 高攀, 等. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 176-195.
- [3] 郑玉, 刘瀑. 数字经济对产业链现代化的影响机理及空间差异研究[J]. 地理研究, 2025, 44(11): 2988-3008.
- [4] 王梦菲, 张昕蔚. 数字经济时代技术变革对生产过程的影响机制研究[J]. 经济学家, 2020(1): 52-58.
- [5] 胡宗义, 周积琨, 黎晓青, 等. 低碳城市建设的绿色技术创新效应评估: 兼论数字经济与制度环境的调节作用[J]. 统计研究, 2025, 42(8): 59-71.
- [6] 魏丽莉, 侯宇琦. 数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(8): 60-79.
- [7] 刘强, 马彦瑞, 徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 72-85.
- [8] Tao J, Cai M M, Wang Q J. Impact of digital economy on environmental performance among worldwide countries: role of emerging technologies and energy consumption [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 395: 127860.
- [9] 李广昊, 周小亮. 推动数字经济发展能否改善中国的环境污染: 基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 宏观经济研究, 2021(7): 146-160.
- [10] 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, 41(1): 111-129.
- [11] Yang L, Ma Z, Xu Y. How does the digital economy affect ecological well-being performance? Evidence from three major urban agglomerations in China [J]. Ecological Indicators, 2023, 157: 111261.
- [12] Zhu B, Li S, Chevallier J. The impact of digitization on ecological environment governance capacity: evidence from China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025, 115: 108014.
- [13] 吕德胜, 王珏, 程振. 黄河流域数字经济、生态保护与高质量发展时空耦合及其驱动因素[J]. 经济问题探索, 2022(8): 135-148.
- [14] 庞博, 傅尧, 李晓星, 等. 黄河流域数字经济-技术创新-生态环境协整分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(11): 15-21.
- [15] 田里, 闫子豪, 张鹏杨, 等. 中国边境省域旅游经济与生态安全韧性协同演化[J]. 经济地理, 2025, 45(10): 204-214.
- [16] 陈鸿基, 胡森林, 曾刚, 等. 长三角地区数字经济对绿色发展效率的影响机制[J]. 经济地理, 2025, 45(5): 13-22.
- [17] 钱娟, 李新春. 有偏技术进步对环境污染的空间溢出效应: 基于环境规制的调节作用[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(12): 109-119.
- [18] Han X, Fu L, Lv C, et al. Measurement and spatio-temporal heterogeneity analysis of the coupling coordinated development among the digital economy, technological innovation and ecological environment [J]. Ecological Indicators, 2023, 151: 110325.
- [19] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 等. 数字经济理论体系与研究展望[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 208-224.
- [20] 王军, 朱杰, 罗茜. 中国数字经济发展水平及演变测度[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(7): 26-42.
- [21] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [22] 黄凌翔, 韩杰, 艾萍, 等. 土地市场、财政压力与经济增长: 基于省级面板 VAR 的实证分析[J]. 中国土地科学, 2020, 34(11): 85-94.

Coupling relationship and interactive response mechanism between digital economy development and ecological environment in the Yellow River Basin

Wang Hairong¹, Wang Yongfeng², Fu Zhanhui³

(1. Henan Second Geological Brigade Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 2. Henan Provincial National Land Space Survey and Planning Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. School of Culture and Tourism, Henan University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Clarifying the synergistic evolution between digital economy development and the ecological environment holds significant theoretical and practical importance for promoting green transformation and sustainable development in the basin. Taking 81 prefecture-level cities in the Yellow River Basin as research units and based on panel data from 2011 to 2021, this study systematically reveals the spatiotemporal patterns and interactive response mechanisms of their synergistic evolution by employing methods such as the entropy weight method, an improved coupling coordination degree model, and a panel VAR model. The main conclusions are as follows: (1) From 2011 to 2021, the development level of the digital economy in the Yellow River Basin steadily increased, while the ecological environment exhibited a fluctuating trend of growth-decline-growth. Both systems showed a consistent spatial differentiation pattern: upstream < midstream < downstream. (2) The synergistic level between digital economy development and the ecological environment followed a “U-shaped” trajectory, initially declining before gradually rising, with continuously strengthening spatial positive autocorrelation. (3) High-high agglomeration areas (HH) were mainly concentrated in the core zone of the Central Plains Urban Agglomeration and the Shandong Peninsula, with their spatial scope gradually expanding. Low-low agglomeration areas (LL) were clustered in upstream regions such as Qinghai and Gansu, showing limited spatial change and a low-value locking effect. Both low-high (LH) and high-low (HL) heterogeneous areas were sporadically distributed, reflecting insufficient regional linkage. (4) Both systems exhibited path dependence in their development trends, which gradually weakened over time. They demonstrated mutually reinforcing positive effects, with the digital economy exerting a more pronounced driving effect on the ecological environment. This study expands the research on the interaction between technological empowerment and ecological constraints at the prefectural scale and proposes corresponding policy recommendations, including implementing differentiated spatial governance, enhancing the radiating capacity of high-value areas, and breaking the low-value locking effect.

Key words: development of digital economy; ecological environment; synergistic evolution; interactive response; Yellow River Basin