王生霞,武芯如.黄河流域新质生产力–数字经济–生态效率三元耦合协调的时空分异与驱动机制[J].中国沙漠,2026,46(5):182–193.

# 黄河流域新质生产力–数字经济–生态效率三元耦合协调的时空分异与驱动机制

王生霞,武芯如
(兰州财经大学 工商管理学院,甘肃 兰州 730000)

**摘要**:厘清新质生产力–数字经济–生态效率(简称NDE系统)三者之间的协同机理,对于实现黄河流域发展方式绿色转型与动能转换具有重要战略意义,可以为黄河流域实施差异化区域策略、优化多元驱动机制、完善空间协同网络提供科学依据,以破解NDE系统协同发展不均衡的难题。以黄河流域57个地级市为研究对象,通过构建NDE系统评价指标体系,综合运用耦合协调度模型、引力模型及地理探测器等方法,对2010—2021年三者的耦合协调度及其演变规律进行实证研究。结果表明:(1)NDE系统耦合协调度整体呈上升趋势,形成东南高、西北低的格局,空间分异显著;(2)空间联系网络从"局部集聚"向"全域联动"演进,形成多核心辐射格局;(3)驱动机制由前期政府主导转向对外开放引领的多元协同,交通区位与产业结构的交互效应($q$=0.981)成为重要驱动力,各因子交互呈非线性增强特征。

**关键词**:黄河流域;新质生产力;数字经济;生态效率;时空分异;驱动机制
**文章编号**:1000–694X(2026)05–182–12 **DOI**:10.7522/j.issn.1000–694X.2026.00100
**中图分类号**:F205 **文献标志码**:A

## 0 引言

黄河流域生态保护和高质量发展已成为重大国家战略[1],生态效率是衡量生态保护的重要指标[2]。以科技创新为内核的新质生产力,正日益成为推动流域质量变革与效率变革的核心引擎[3]。数字经济作为新质生产力的关键载体,通过重构产业结构、赋能传统产业转型与提升要素配置效率,为黄河流域可持续发展注入新动能[4]。然而,该区域仍面临生态本底脆弱[5]、开发与保护失衡[6]、发展动能转换滞后[7]等现实挑战。因此,深入探究新质生产力、数字经济与生态效率之间的协同机制,对实现黄河流域高质量发展具有重要战略意义。

新质生产力、数字经济与生态效率三者间的内在关联已成为学术界关注的焦点。现有研究主要围绕以下三方面展开:(1)数字经济与生态效率的互动关系。数字经济通过促进产业结构升级[8]与技术创新[9–10]等路径改善生态效率,且严格的生态约束也倒逼数字经济向绿色、低碳方向转型,二者之间存在显著的耦合关系[11–13]。但数字基础设施建设、算力能耗与电子废弃物也会新增环境压力,甚至在资源型地区会出现数字技术被高耗能产业"俘获"的现象,导致生态效率不升反降,影响方向与强度存在显著区域异质性[14]。(2)数字经济对新质生产力的影响机制。数字经济作为一种融合信息技术、人工智能与大数据的新型、综合经济形态,既是经济增长的新引擎,也是培育新质生产力的关键支撑[15]。数字经济通过优化生产要素组合[16–18]、推动科技创新[15,19]、提升全要素生产率[20],为新质生产力的形成和壮大奠定基础。(3)新质生产力与生态效率的协同路径。新质生产力通过绿色技术创新、产业生态化转型提升生态效率[21–24],绿色属性特征凸显。但在创新基础薄弱地区,新质生产力的生态提

**收稿日期**:2026–04–17;**改回日期**:2026–06–08
**资助项目**:国家自然科学基金项目(41501076);甘肃省基础研究计划–软科学专项项目(26JRZA086);甘肃省教育厅高校教师创新基金项目(2026A-087)
**作者简介**:王生霞(1983—),女,河南卫辉人,博士,副教授,研究方向为旅游地理。E-mail:wangshx@lzufe.edu.cn
**通信作者**:武芯如(E-mail:19893162684@163.com)

升效应显著弱化，甚至因过度追求技术扩张而加剧资源环境压力，二者协同发展存在明显空间门槛与区域异质性[25]。

既有研究涵盖省域[10,26]、市域[13,27]等层面，覆盖了中国京津冀[28-29]、长三角[30]、黄河流域[2,11]等区域，熵值法、耦合协调度模型、空间计量分析等已成为探讨系统间关系的主流工具[27,31-33]。现有研究为新质生产力、数字经济与生态效率之间的两两关系研究奠定了有益基础，但研究多局限于单一要素或二元关联分析，缺乏将新质生产力、数字经济与生态效率置于同一框架下进行系统性、交互性考察的视角，更未能充分回应黄河流域内部存在的显著空间异质性对这一三元协同关系的深刻影响。因此，本文以2010—2021年黄河流域57个地级市为研究对象，突破既有研究的二元局限，在厘清三者内在协同机理基础上，通过构建新质生产力-数字经济-生态效率（简称NDE系统）三元协同分析框架与综合评价体系，系统解析三者之间的非线性互动与耦合机制，综合运用多种方法，准确揭示三元协同关系的空间依赖性与异质性，剖析其影响因素与作用路径，以期为理解NDE系统区域协同与差异提供新视角，为流域NDE系统分区差异化精准施策提供科学依据。

# 1　数据与方法

## 1.1　研究区概况

黄河流域横跨中国东、中、西三大地带，既是关键的生态安全屏障，也是重要的经济廊道。流域自然地理环境复杂，上游的三江源地区被誉为“中华水塔”，中游流经生态脆弱的黄土高原，下游则为广袤的冲积平原。受干旱、半干旱气候影响，水资源总量有限且时空分布不均，生态效率成为制约黄河流域高质量发展的关键因素。综合考虑流域经济社会发展的整体状况及数据可获性，本文将范围确定为黄河流域干流及主要支流所流经的青海、甘肃、宁夏、内蒙古、河南、山东、陕西和山西8个省区，共涵盖57个地级市。该区域内部自然条件相异、经济发展梯度明显、技术扩散水平不一，是深入探究新质生产力、数字经济与生态效率之间的时空耦合关系的典型区域。

## 1.2　黄河流域NDE系统协同机理

三者的耦合并非简单的两两互动，而是存在着创新驱动-数字赋能-绿色约束的闭环传导机制。具体而言，新质生产力构成系统的动力源，通过技术创新为数字经济提供核心供给；数字经济扮演传导中介，将创新成果扩散至产业末端，驱动生产方式的绿色转型；生态效率则发挥反馈作用，以资源环境压力倒逼技术迭代与模式革新，形成对新质生产力发展方向的校准。三者由此构成一个相互嵌套、循环递进的协同系统（图1）。根据三者在闭环中的功能定位，以下从动力源、传导中介与反馈校准3个环节展开考察。

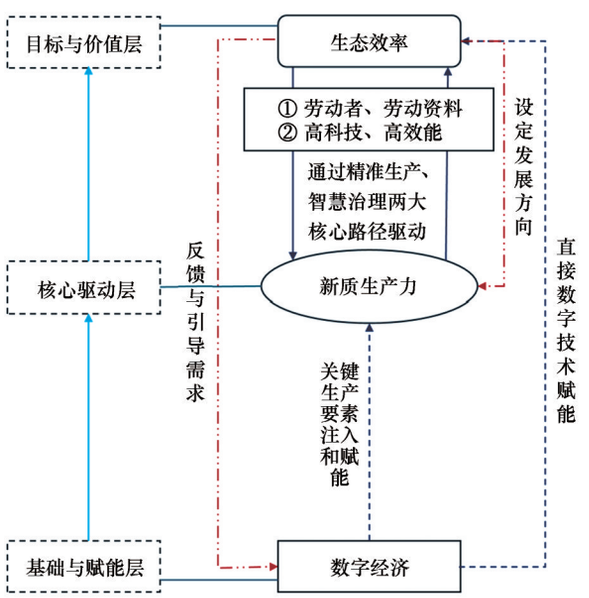



图1　理论框架

Fig.1　Theoretical framework

从动力源环节来看，新质生产力以创新为主导、绿色为内涵的质态，为黄河流域实现发展模式根本性转变提供了核心动能。一方面，新质生产力能够通过其产业深度转型升级的间接牵引效应，为黄河流域数字经济发展开辟广阔应用场景与需求空间[34]。另一方面，新质生产力的生态属性，构成了其与传统生产力的根本差异，也顺应了新时代生态文明建设的必然趋势[35]。在信息化时代背景下，新质生产力依托高素质劳动者、数字化的非物质劳动对象以及高科技劳动资料，大力推动生产与消费模式向绿色低碳转型，对提升生态效率具有显著的促进作用[2,25]。

从传导中介环节来看，数字经济既是新质生产

力的实体载体，也是将创新势能转化为绿色效能的关键中介[13]。一方面，数字产业化与产业数字化共同构成新质生产力的实体基础，前者通过构建协同创新生态与高技术产业链提供核心载体，后者则通过激活数据要素、优化资源配置为产业升级注入动能[15]。同时，数字基础设施作为关键支撑平台，通过畅通数据流动、降低创新成本，有效提升技术要素的配置效率[15]。另一方面，数字技术应用推动企业采用清洁能源与低碳技术，促进生产绿色化，降低对自然资源的依赖与污染物排放[36]。此外，其通过淘汰高消耗、高污染的落后产能，直接加速了区域产业结构的净化，有效降低了经济发展的环境负荷[37]。

从反馈校准环节来看，数字经济的绿色化应用最终体现为生态效率提升，而生态效率的变化则通过约束与压力机制，反哺新质生产力的创新方向。一方面，友好的生态环境为数字基础设施建设与运营降本增效，有利于拓展数字业务规模、提升设备应用水平，从而不断丰富数字经济的应用场景[13]。另一方面，生态效率通过来自生态环境、资源短缺和环境规制的三重压力，倒逼技术创新与绿色变革，从而为新质生产力的发展提供了核心驱动力[2]。

### 1.3 指标体系构建

科学构建NDE系统综合评价指标体系，是准确测度三者发展水平与耦合关系的基础。本文在借鉴已有研究成熟框架基础上[11-13,25,31-34]，遵循系统性、可操作性与动态性原则，充分结合黄河流域作为生态屏障与高质量发展试验区的双重战略定位，以及其内部上中下游城市在资源禀赋、产业结构与发展阶段上的显著差异，力求体现研究的理论前瞻性与地域特殊性。

新质生产力系统方面，本文从劳动者—劳动资料—劳动对象的经典理论框架构建评价体系（表1）。本文在关注研发人员、研发经费等核心创新投入的基础上，特别纳入了“战略性新兴产业从业人数”，以反映黄河流域产业结构转型升级的人力基础。同时纳入“数据要素利用水平”，体现数字经济时代数据作为关键生产要素的重要性。将“生活垃圾无害化处理率”纳入新质劳动对象，也契合了黄河流域生态保护和高质量发展的核心要求。

数字经济系统方面，本文从数字基础设施、数字产业化、产业数字化3个维度构建评价体系（表1）。在基础设施层面，选取“长途光缆线密度”等指标，以评估黄河流域广阔地域下的信息联通能力。在“数字产业化”层面，不仅通过常规指标衡量产业规模，更通过“国内专利申请授权量”和“人工智能企业数”捕捉区域的数字创新活力与前沿技术布局。在“产业数字化”层面，引入“数字普惠金融指数”指标能够有效揭示数字技术对缓解黄河流域中上游地区长期面临的金融资源匮乏、提升金融服务实体经济可达性的独特作用。同时，采用“二三产业增加值”作为衡量数字经济与传统产业融合所覆盖经济总量的代理指标。需要说明的是，考虑到当前数字经济与第一产业的融合在黄河流域整体产业结构中占比较小，且相关细粒度数据在市级层面尚难获取，故以二三产业增加值作为现阶段反映产业数字化主体规模的可操作指标。

生态效率系统方面，本文采用资源环境经济学经典的投入-期望产出-非期望产出分析框架（表2）。在投入端，为全面衡量经济社会活动对自然资源的占用强度，本文系统性地涵盖了能源、资本、劳动力、水资源与土地五大核心要素，以全面衡量经济社会活动对自然资源的占用强度。在产出端，期望产出聚焦于“实际地区生产总值”，表征经济发展的有效成果；非期望产出则对应流域的主要工业污染类型，旨在精准反映高耗能、重化工业占比较高的产业结构对黄河流域生态环境造成的实际压力。

### 1.4 研究方法

#### 1.4.1 计算耦合协调度的过程及方法

（1）Super-SBM模型

为准确衡量黄河流域的生态效率，本文采用非径向、非角度的Super-SBM模型。该模型能够有效克服传统DEA模型仅考虑期望产出而忽略非期望产出的局限[25]：

$$\min U_1 = \frac{1+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} s_i^-}{1-\frac{\frac{1}{s}\sum_{r=1}^{s} s_r^+}{y_{rk}}} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} \sum_{j=1,j\neq k}^{n} x_{ij}\lambda_j - s_i^- \leqslant x_{ik} \\ \sum_{j=1,j\neq k}^{n} y_{ij}\lambda_j + s_r^+ \geqslant y_{rk} \\ s_i^- \geqslant 0;\ s_r^+ \geqslant 0 \\ \lambda_j \geqslant 0, j = 1,2,\cdots,n \end{cases} \tag{2}$$

**表 1　新质生产力与数字经济评价指标体系**

**Table 1　Evaluation index system for new quality productive forces and digital economy**

| 子系统层 | 要素层 | 指标层 | 指标内涵 | 权重 |
|---|---|---|---|---|
| 新质生产力 | 新质劳动者 | 研究与试验发展(R&D)人员全时当量 | 衡量直接从事科技创新活动的核心人力投入规模 | 0.166 |
| | | 战略性新兴产业从业人数 | 反映新兴产业作为创新主体的研发人力投入强度 | 0.103 |
| | | 普通高等学校在校学生数 | 表征未来高素质劳动者的储备情况 | 0.226 |
| | | 在岗职工平均工资 | 间接反映劳动力的整体素质与技能水平 | 0.049 |
| | 新质劳动资料 | 科学支出占地方财政支出的比重 | 体现地方政府对科技研发活动的支持力度与战略导向 | 0.087 |
| | | R&D内部经费支出 | 衡量全社会用于知识创造、技术研发的实际资金投入规模 | 0.222 |
| | | 高铁里程 | 表征基础设施的完善程度 | 0.079 |
| | 新质劳动对象 | 数据要素利用水平 | 综合评估数据作为关键生产要素在经济社会中的渗透与应用程度 | 0.060 |
| | | 生活垃圾无害化处理率 | 反映社会对循环经济和环境友好的治理能力 | 0.006 |
| 数字经济 | 数字基础设施 | 长途光缆线密度 | 衡量区域骨干网络的信息传输能力 | 0.206 |
| | | 人均互联网宽带接入端口 | 反映互联网接入能力的普及程度与水平 | 0.155 |
| | | 移动电话普及率 | 表征智能终端的拥有和使用情况 | 0.015 |
| | 数字产业化 | 信息传输、计算机服务&软件业从业人员占比 | 直接衡量数字核心产业的规模及其在区域就业结构中的地位 | 0.031 |
| | | 电信业务总量 | 表征信息通信服务业的市场规模与活跃度 | 0.095 |
| | | 国内专利申请授权量 | 衡量区域的技术创新产出能力 | 0.167 |
| | | 人工智能企业数 | 表征前沿数字技术产业的集聚程度和发展活力 | 0.247 |
| | 产业数字化 | 数字普惠金融指数 | 综合反映数字技术在金融服务领域的渗透深度与广度 | 0.018 |
| | | 二三产业增加值 | 衡量数字经济与传统产业融合所覆盖的经济总量 | 0.066 |

**表 2　生态效率评价指标体系**

**Table 2　Eco-efficiency evaluation index system**

| 一级指标 | 二级指标 | 衡量指标 |
|---|---|---|
| 投入 | 能源投入 | 能源消耗总量 |
| | 资本投入 | 固定资产投资 |
| | 劳动力投入 | 从业人员数 |
| | 水资源投入 | 全社会用水量 |
| | 土地投入 | 建成区面积 |
| 期望产出 | 经济总产出 | 实际地区生产总值 |
| 非期望产出 | 废水排放量 | 工业废水排放量 |
| | 废气排放量 | 工业二氧化硫排放量 |
| | 固体废弃物排放量 | 工业烟尘排放量 |

式中：$U_1$为生态效率，当$0 \leqslant U_1 < 1$时，表示决策单元无效，当$U_1 \geqslant 1$时，表示决策单元有效；$\lambda_j$为权重向量；$n$为决策单元个数；$x_{ij}$，$y_{ij}$代表投入和产出向量的元素；$s_i^-$，$s_r^+$代表投入和产出的松弛量。

（2）熵值法

为科学评估新质生产力与数字经济各指标在复合系统中的相对重要性，避免主观赋权带来的偏差，本文采用熵值法对新质生产力及数字经济评价指标体系进行客观赋权。计算公式参见文献[11]。

（3）耦合协调度模型

耦合协调度模型适用于分析多系统间相互作用、协同发展的程度。本文运用该模型分析黄河流域NDE系统三元协调发展程度。首先，计算三系统的耦合度$C$：

$$C = 3 \times \left( \frac{U_1 \times U_2 \times U_3}{U_1 + U_2 + U_3} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

式中：$U_1$、$U_2$、$U_3$分别为新质生产力、数字经济与生态效率的综合发展指数。耦合度$C$值越接近1，表明三系统间相互作用越强。在此基础上，引入综合协调指数$T$与耦合协调度$D$，以克服耦合度无法反映系统整体发展水平的局限：

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \gamma U_3 \tag{4}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{5}$$

式中：$\alpha$、$\beta$、$\gamma$为待定权重。鉴于新质生产力、数字经济与生态效率在黄河流域高质量发展中具有同等

重要的战略地位，故取$\alpha=\beta=\gamma=\frac{1}{3}$。本文将耦合协调度划分为10个等级（表3）[38]。

**表3 耦合协调度等级分类标准**

**Table 3 Coupling coordination degree classification standard**

| 耦合协调度 | 协调等级 | 耦合协调度 | 协调等级 |
|---|---|---|---|
| [0,0.1) | 极度失调 | [0.5,0.6) | 勉强协调 |
| [0.1,0.2) | 严重失调 | [0.6,0.7) | 初级协调 |
| [0.2,0.3) | 中度失调 | [0.7,0.8) | 中级协调 |
| [0.3,0.4) | 轻度失调 | [0.8,0.9) | 良好协调 |
| [0.4,0.5) | 濒临失调 | [0.9,1) | 优质协调 |

#### 1.4.2 计算耦合协调度时空分异的方法

（1）Kernel密度估计方法

核密度估计通过构建平滑的概率密度函数，能够直观地揭示样本数据在时空维度上的分布模式与演化趋势。具体的测算公式参见文献[32]。

（2）趋势分析

通过趋势分析技术与高精度多项式拟合，可将离散的区域数据点内插为连续的趋势面。该方法能对大规模地理数据进行半定量研究，从而更精确地揭示地理要素的空间分布格局与动态趋势。具体计算公式参见文献[39]。

（3）引力模型

为量化NDE系统在地理空间上的相互作用强度，本文引入引力模型。该模型源于万有引力定律，认为区域间的联系强度与各自的“质量”成正比，与“距离”成反比。本文选取年末总人口（$P$）和地区生产总值（$G$）的几何平均数$\sqrt{P\times G}$表征城市综合质量，以城市间地理距离（$d$）作为距离变量。为反映联系的双向非均衡性，引入耦合协调度占比系数$k_{ij}$进行修正：

$$y_{ij}=k_{ij}\frac{\sqrt{P_iG_i}\times\sqrt{P_jG_j}}{d_{ij}^2} \tag{6}$$

$$k_{ij}=\frac{C_i}{C_i+C_j} \tag{7}$$

式中：$y_{ij}$为城市$i$对城市$j$耦合协调度的空间联系强度；$C_i$和$C_j$为城市$i$和城市$j$的NDE系统耦合协调度；$P_i$和$P_j$为城市$i$和$j$的年末总人口；$G_i$和$G_j$为城市$i$和城市$j$的地区生产总值；$k_{ij}$为引力系数；$d_{ij}$为城市$i$和城市$j$之间的地理距离。

#### 1.4.3 探测系统耦合外部影响因子

为识别影响NDE系统耦合协调度的外部驱动因素，本文运用地理探测器中的因子探测器进行分析。因子探测器用于测度各驱动因子对NDE系统耦合协调度空间分异的解释，以$q$值衡量：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{8}$$

式中：$h$=1，2…，$L$，为因子$X$的分层；$N_h$和$N$分别为层$h$和全区的样本数；$\sigma_h^2$和$\sigma^2$分别为层$h$和全区耦合协调度的方差。$q$值取值区间为[0，1]，值越大表示该因子对空间分异的解释力越强。

交互探测器用于识别不同因子之间的交互作用类型是否会增强或减弱对耦合协调度的解释力，具体判断依据见文献[40]。

### 1.5 数据来源

各指标数据主要源自2011—2022年《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及各市统计年鉴、国民经济与社会发展统计公报、环境状况公报，并辅以国泰安（CSMAR）与EPS数据库进行补充。针对个别缺失值，采用线性插值法或依据发展水平相似地级市的数据进行匹配填补。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域NDE系统发展水平

从分布位置看，2010—2021年黄河流域新质生产力、数字经济与生态效率核密度曲线均显著右移，发展水平稳步提升，其中数字经济右移幅度最大，生态效率持续向高阶演进（图2）。从分布形态看，新质生产力与数字经济的曲线由“宽峰”向“尖峰”收敛，峰值上升、右侧拖尾缩短，表明区域内部差异逐步缩小、协调发展格局显现；而生态效率曲线由单峰宽幅向多峰演变，右侧拖尾明显，反映整体提升但内部分化加剧，延安、鄂尔多斯等城市形成领先集团。从极化现象看，新质生产力与数字经济未出现双峰或多峰结构，发展相对均衡；生态效率则显现“肩峰”或潜在双峰特征，存在初步极化风险。综上，黄河流域的新质生产力与数字经济呈现出水平提升、差异收敛的良性发展轨迹，而生态效率则表现为整体改善但内部分化显现的复杂图景。

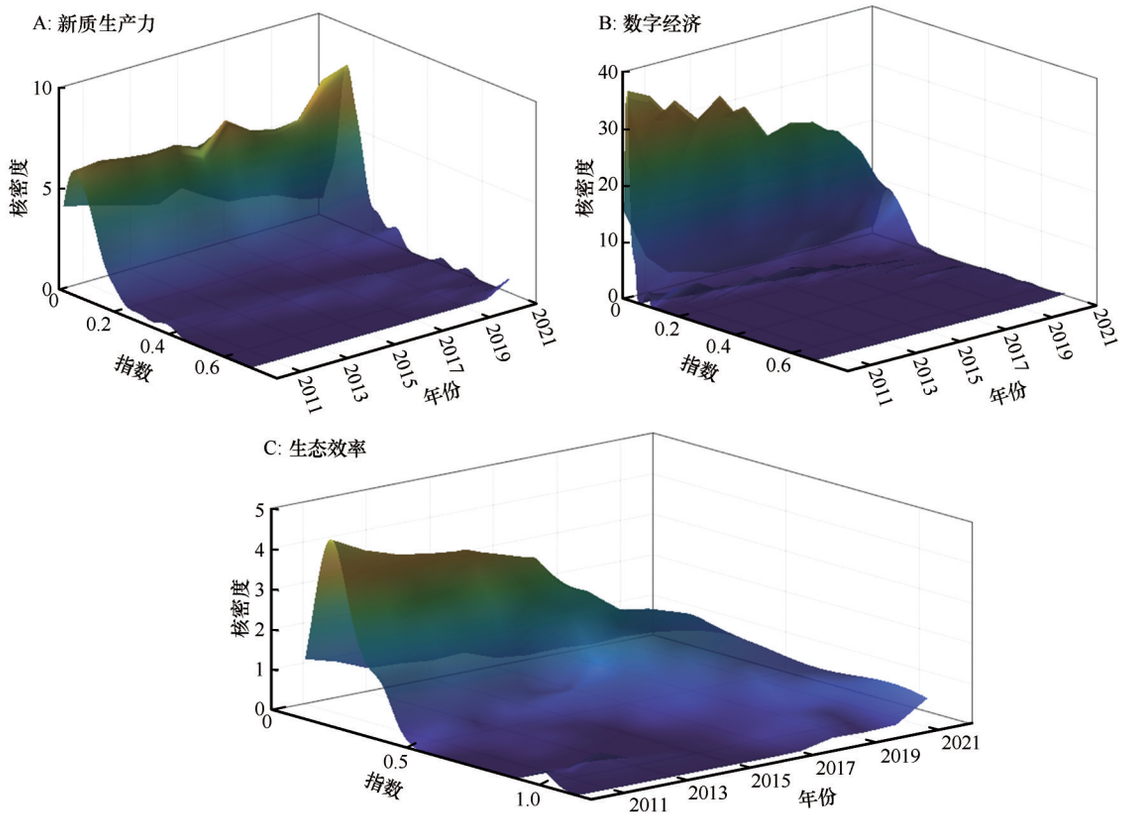



图2　时空演变趋势

Fig.2　Spatial and temporal evolution trends

### 2.2　黄河流域NDE系统耦合协调趋势及时空特征

2013年代表新发展理念全面推行前的初始状态；2018年作为黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略出台的前夕，是观测政策效应的理想基线；2021年则反映了战略实施后及“十四五”时期开局的最新格局。因此，本文基于耦合协调度模型，对2013、2018、2021年的系统耦合协调水平进行测度，并借助ArcGIS平台绘制其空间分布趋势面图。

总体上，黄河流域NDE系统耦合协调度呈现出显著的“东高西低”空间格局，而南北向分异则经历了一个动态的极化过程，最终形成了“南高北低”的态势（图3）。2013年的趋势线呈现“凸”字形，意味着耦合协调度的峰值出现在黄河流域中段，如以郑州、西安为核心的区域。2021年趋势线演变为“凹”字形，这表明流域南部地区的耦合协调度增长速度远超北部，最终确立了“南高北低”的空间格局。这一空间格局的形成，主要源于：东部地区凭借其优越的经济基础、科技资源与沿海区位，在培育新质生产力和发展数字经济上具有先天优势，并能更有效地转化为生态效益；南部地区则得益于更适宜的气候条件、活跃的创新氛围及强劲的政策红利，在绿色转型与数字融合上实现了更快突破，从而引领了流域发展格局的动态重塑。

黄河流域NDE系统耦合协调度存在显著的空间分异与动态演化特征（图4）。从静态格局看，流域整体呈现出鲜明的东南高、西北低的核心边缘结构。下游地区优势突出，济南市和郑州市的耦合协调度在2021年分别达到0.882和0.974，已分别进入良好协调与优质协调的高级阶段，与中游的西安市共同构成了全流域的高值集聚核心。这一格局印证了NDE系统闭环机理中的空间逻辑，即高值城市往往是创新驱动—数字赋能—绿色约束循环最为完整的节点，数字基础设施完善使传导中介功能充分发挥，生态规制压力又通过反馈通道持续拉动新质生产力迭代，从而在循环累积中不断拉大与低值洼地的差距。相反，上游的固原市与定西市同期数值仍处于0.3以下的低水平，处于中度失调乃至严重失调状态，形成了空间上的低值洼地。从动态趋势看，研究期内流域协调发展水平呈现出全域提升与局部极化并存的鲜明特征。首先，大多数城市实现了协调度的稳步增长，如开封市从0.319提升至

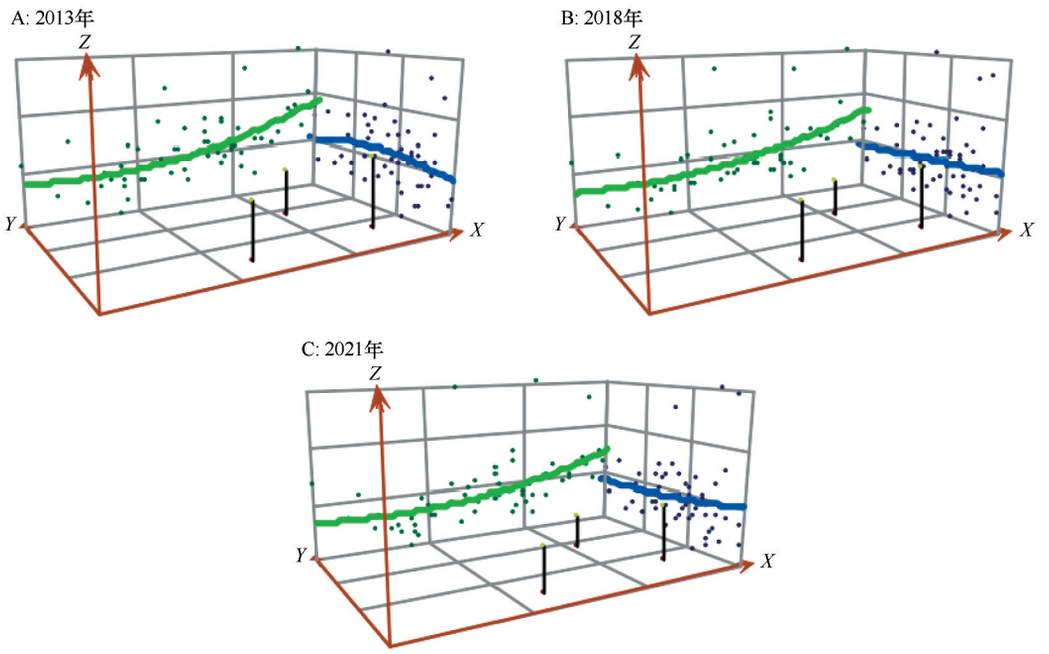
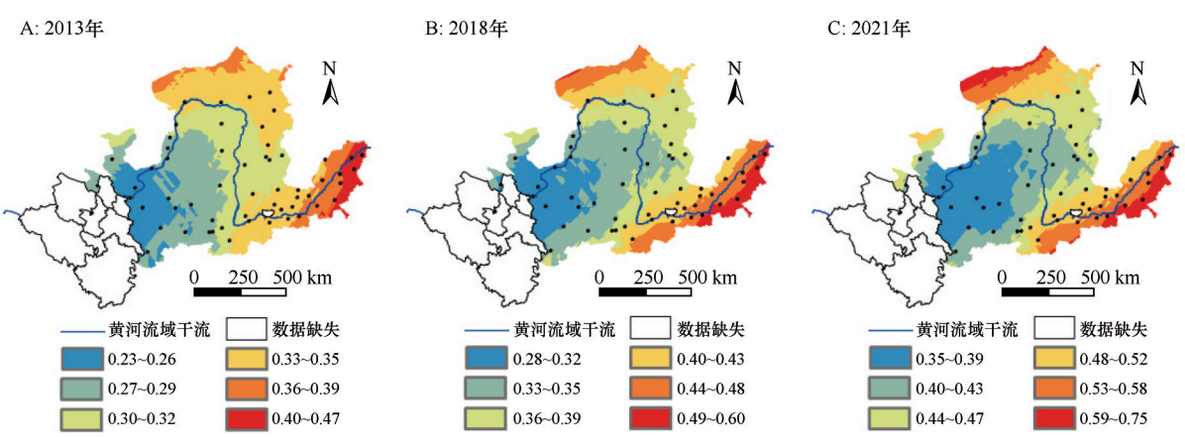



图3 耦合协调度趋势面

Fig.3 Trend surface of coupling coordination degree




注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2023)2767号的标准地图制作,底图边界无修改。

图4 Kriging插值

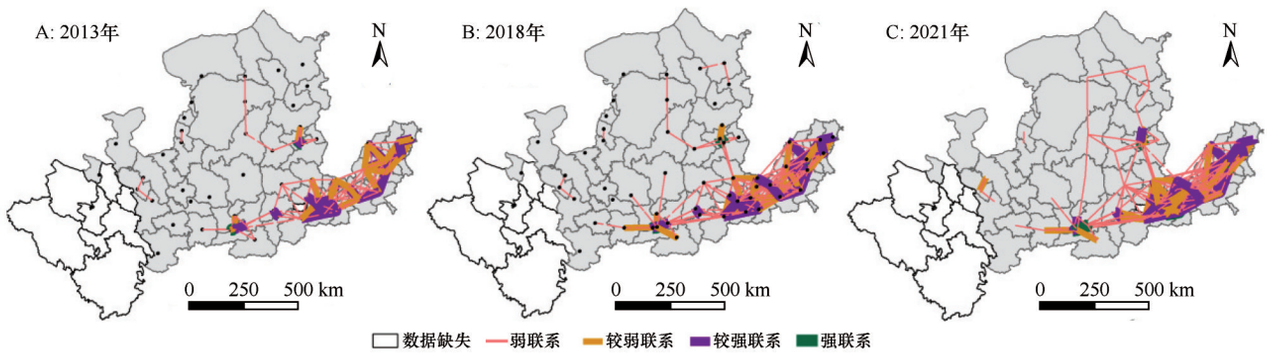
Fig.4 Kriging interpolation diagram map

0.563,洛阳市从0.388增长至0.641,表明流域协同发展态势总体向好。其次,高值区的空间极化效应加剧,郑州市在8 a间增幅高达0.447,核心引领作用持续强化。最后,部分低值区域的发展依然承压,平凉市的协调度在2018年达到0.331后出现回落,揭示了低值洼地发展的不稳定性与转型的艰巨性。

### 2.3 黄河流域NDE系统耦合发展空间联系强度

本文进一步引入引力模型,有效揭示地区间的辐射效应与接受程度[38]。本文通过自然断裂法将其划分为弱联系、较弱联系、较强联系和强联系4个等级,并借助ArcGIS对2013、2018、2021年的空间联系结构进行可视化(图5)。为突出核心关联特征并提升图面可读性,图中未呈现数量庞大但影响甚微的极弱关联连线。

2013年黄河流域NDE系统耦合协调的空间关联呈现局部集聚、弱联系主导的特征。关联网络主要集中于东部局部区域,强联系、较强联系占比极低,弱联系和较弱联系为关联主体,中西部多数城市间的三元系统协同互动明显不足,反映此时区域空间联动性尚处起步阶段。2018年空间关联呈现广度拓展、强度升级的趋势。连线数量较2013年显




注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2023)2767号的标准地图制作，底图边界无修改。

图5　空间联系结构

Fig.5　Spatial connection structure

著增加，东部核心区的强联系、较强联系密集度大幅提升，中西部也涌现出更多较弱联系和弱联系，NDE系统的区域互动性明显增强，空间关联从“局部集聚”向“多区域联动”过渡，更多城市被纳入协同发展网络。2021年空间关联进入全域联动、多等级协同的成熟阶段。强联系、较强联系的节点大幅增多，连线密集度进一步提升，中西部关联活跃度显著提高，弱联系的空间覆盖也更广泛，形成多核心+广辐射的关联网络。空间联系网络从弱联系主导走向多核心广辐射，其深层动力源于NDE系统闭环中数字经济环节的强化。数字经济的核心特征之一是高渗透性与低空间摩擦成本，当其发展水平突破一定阈值后，新质生产力的创新成果得以跨越行政边界向中上游扩散，而下游生态效率的改善需求又通过数字化监测与要素流动网络向上游传递反馈信号。引力模型捕获的联系强度跃升，正是这一闭环打破地理阻隔、在空间维度上展开的定量印证。

### 2.4　黄河流域NDE系统耦合外部驱动因子

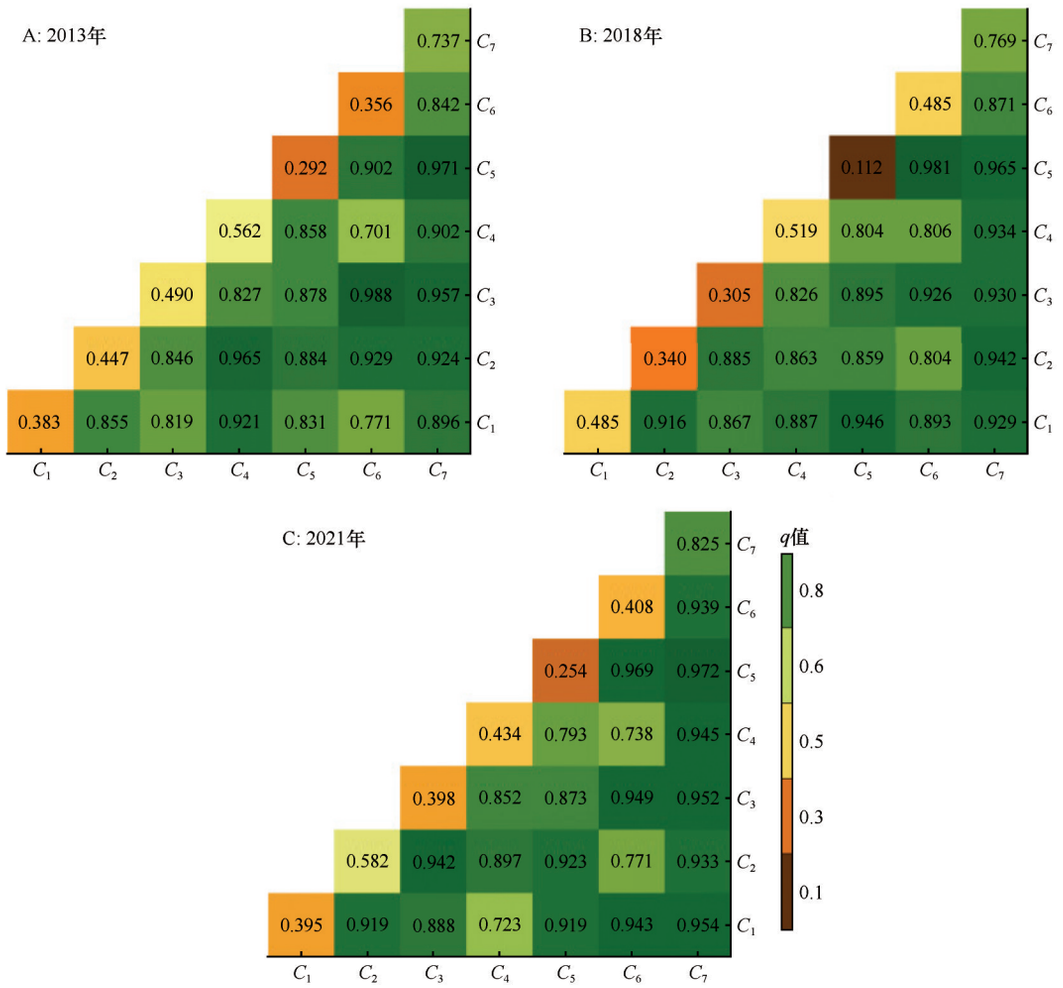
#### 2.4.1　单因子分析

黄河流域部分城市还未达到优质协调，协同水平仍有待提高。为此，本文运用地理探测器，分析NDE系统耦合发展的外部驱动因子。在已有研究基础上选取7个指标作为驱动因素，采用*K*-Means聚类方法进行分类，并通过地理探测器量化各因子对协同程度的影响力（$q$值）。根据2013、2018、2021年的$q$值计算结果（图6），按各因子影响力的平均水平和稳定性进行综合排序，将影响因素划分为3类：核心影响因素，包括区域经济水平（$C_7$）、对外开放水平（$C_2$）；次级影响因素，包括交通区位（$C_6$）、政府干预程度（$C_4$）、城镇化水平（$C_3$）；一般影响因素，包括产业结构（$C_5$）、金融发展水平（$C_1$）。

核心影响因素方面，区域经济水平（$C_7$）的$q$值在研究期内始终维持在较高水平，且在所有年份通过5%的显著性检验。这表明，地区整体经济活力与生产力发展水平是NDE系统协同发展最根本的支撑。对外开放水平（$C_2$）的$q$值呈现出显著的上升趋势，至2021年已成为解释力最强的单一因子。这体现了国际技术外溢、外商投资带来的先进管理模式与绿色标准，对流域新质生产力的培育与数字经济的国际化起到了关键的催化作用。

次级影响因素方面，交通区位（$C_6$）、政府干预程度（$C_4$）与城镇化水平（$C_3$）构成了系统协同的重要支撑。交通区位（$C_6$）的驱动力在观察期内快速攀升，其平均影响力在各因子中位列前茅。这反映出完善的交通基础设施与优越的地理区位，能够加速创新要素跨区域流动，降低数字经济和绿色技术的扩散成本。政府干预程度（$C_4$）的$q$值在2013年与2018年均维持在较高水平，凸显在协同发展的初期和中期，地方政府通过财政支出、环境规制、战略性产业扶持等政策性工具，在整合创新资源、引导数字技术应用、划定生态保护红线等方面发挥了不可替代的作用。然而，2021年其$q$值下降且显著性减弱，暗示政策驱动的边际效应可能正在递减，NDE系统的协同发展需寻求更多元化的动力源。城镇化水平（$C_3$）的影响力在观察期内有所波动，反映出单纯的人口城镇化若不能与产业升级和公共服务优化同步，其促进效应将受限。

一般影响因素方面，金融发展水平（$C_1$）和产业




注：$q$为自变量对因变量解释度；$C_1$为金融发展水平，$C_2$为对外开放水平，$C_3$为城镇化水平，$C_4$为政府干预程度，$C_5$为产业结构，$C_6$为交通区位，$C_7$为区域经济水平。

图6 2013、2018、2021年黄河流域NDE系统耦合协调度的外部影响因素

Fig.6 External influencing factors of coupling coordination degree of NDE system in the Yellow River Basin in 2013, 2018 and 2021

结构($C_5$)的驱动作用相对薄弱。金融发展水平($C_1$)的$q$值在2018年达到峰值(0.485)，反映出资本对技术研发和数字化转型的关键支撑，但其波动性也表明黄河流域尤其是中上游地区金融服务实体经济的渠道仍有待畅通。产业结构($C_5$)的$q$值在各年均处于末位，这可能源于黄河流域部分城市存在重化工业路径依赖和“虚高度化”问题，即服务业增长多来自低端领域，缺乏对数字技术与绿色创新的承接力和需求支撑。

### 2.4.2 交互因子分析

为揭示驱动因子间的交互作用，进一步探究其如何共同影响NDE系统的耦合协调度，本文运用地理探测器中的交互探测器进行分析(图6)。所有因子两两交互后的$q$值均大于任一因子的独立$q$值，且大部分交互组合的$q$值远超两个单因子$q$值之和，表现为非线性增强效应，凸显了多因子协同驱动的重要性。

从交互强度的时空演变来看，关键交互组合的变化揭示了驱动模式的动态转型。2013年，$C_4 \cap C_2$的组合解释力最强($q$=0.965)，凸显了在协同发展初期政策与开放的双轮驱动。2018年，C6∩C5的交互作用突起，$q$值高达0.981，反映出交通网络赋能产业转型成为核心动力，同时也暴露出产业结构单因子驱动力薄弱、需依托硬件支撑才能释放潜力的深层特征。至2021年，$C_5 \cap C_7$的交互$q$值攀升至0.972。产业结构的这一特征进一步显化，即产业结构难以独立驱动系统协同，但当地区具备较强的经济基础时，产业升级便能有效激活内需、提升全要素生产

率，将经济规模优势转化为新质生产力与绿色数字技术的应用场景。

## 3　讨论

本文通过耦合协调度模型、空间计量分析与修正引力模型相结合的分析框架，揭示了黄河流域NDE系统协同的时空演化规律与空间作用机制。本文验证了NDE系统三者间存在显著的耦合协调关系，且其东南高、西北低的空间分异格局与已有文献中对黄河流域[11-13]或其他区域（如京津冀[28]、长三角[30]）发展不平衡性的观察具有一致性。这一格局的深层结构在于上、中、下游所处协同阶段存在本质差异。下游地区已初步形成创新驱动、数字赋能与生态反馈的良性循环，济南、郑州等核心城市的三元互动进入相互促进的高级阶段；中游地区呈明显过渡特征，西安虽跻身高值核心，但数字经济在能源、化工等主导产业中渗透不足，新质生产力的创新供给难以通过数字渠道充分转化为生态效益；上游地区多数城市三系统均处低水平发育期，动力源与传导中介难以支撑生态效率提升。

然而，本文进一步深化与拓展了已有认知。首先，本文构建并实证了NDE系统三元耦合框架，突破了以往研究多集中于数字经济-生态效率或新质生产力-生态效率等二元关系的局限[11-13,31]，系统性地揭示了三者间创新驱动-数字赋能-绿色约束的闭环互动机理。其次，本文借助空间联系网络分析，精准刻画了协同关系从“局部集聚”到“全域联动”的动态演进。这一发现不仅弥补了局部空间自相关仅能揭示静态集聚类型的局限，更从功能联系层面证实了以郑州、济南、西安为核心的增长极辐射带动能力正在增强。

尽管多模型嵌套有效揭示了NDE系统的时空耦合特征，但研究仍存在一定的局限性：首先，熵值法赋权难以兼顾指标的动态变化，可能弱化长期趋势刻画。其次，地理探测器虽能识别驱动力的解释强度与交互类型，但其本质仍是一种静态的相关分析，难以揭示因素间精确的作用路径与因果机制。最后，本文采用全国统一的指标体系评价黄河流域各市，且以二三产业增加值代理衡量产业数字化，未能充分反映上游欠发达地区的创新要素禀赋特征以及第一产业数字化融合的经济贡献。未来研究可考虑引入结构方程模型或定性比较分析等方法来进一步剖析其复杂的因果网络，并探索分区赋权或相对发展指数校准等路径以提升测度精准性。

## 4　结论

2010—2021年，黄河流域新质生产力、数字经济与生态效率整体呈上升态势。其中数字经济增速最快，新质生产力和数字经济的区域差距逐步缩小，呈现水平提升、差异收敛的良性趋势；生态效率虽整体改善，但内部差距有所拉大。

耦合协调度东南高、西北低的空间格局反映了上、中、下游协同阶段的本质差异。下游地区济南、郑州已进入良好协调至优质协调阶段，闭环运转顺畅；中游地区西安虽跻身高值核心，但周边资源型城市数字经济与主导产业融合不足，新质生产力的创新势能难以有效转化为生态效益；上游地区固原、定西等城市耦合协调度长期处于0.3以下，面临低水平耦合锁定困境。时序变化上，多数城市协调度稳步提升，但郑州市8 a间增幅达0.447，高值区极化效应加剧，与周边梯度差距持续拉大。

空间联系网络实现了从“局部集聚”到“全域联动”的转变。2013年关联以东部弱联系为主，至2021年已形成以济南、郑州、西安为多核心的辐射格局，中西部城市关联活跃度明显提升。这一变化的深层动力在于数字经济的低空间摩擦成本，使创新成果得以跨行政边界扩散，生态反馈信号也通过数字化渠道向上游传递。

驱动机制从前期政府主导逐步转向多元协同。研究初期，政府干预程度（$C_4$）是主导驱动力；至2021年，对外开放水平（$C_2$）跃居解释力最强的单一因子。同时，交通区位（$C_6$）与产业结构（$C_5$）的交互作用（$q$=0.981）凸显了基础设施网络对产业转型的支撑效应。所有因子交互均呈双因子增强或非线性增强特征，表明多元协同的政策体系是提升NDE系统协调度的关键路径。

**参考文献：**


[1]　习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利，2019(20)：1-3.

[2]　刘同超.沿黄地区新质生产力与生态效率耦合协调发展特征及空间关联分析[J].水利经济，2025，43(3)：75-83.

[3]　文丰安，肖华健.新质生产力推动经济社会高质量发展探析[J].烟台大学学报(哲学社会科学版)，2024，37(2)：13-23.

[4]　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)：65-76.

[5]　刘彦随，夏军，王永生，等.黄河流域人地系统协调与高质量发展[J].西北大学学报(自然科学版)，2022，52(3)：357-370.

[6] 刘治彦.文旅融合发展:理论、实践与未来方向[J].人民论坛·学术前沿,2019(16):92-97.
[7] 孙继琼.黄河流域生态保护与高质量发展的耦合协调:评价与趋势[J].财经科学,2021(3):106-118.
[8] 李世寒,刘晓平.数字经济对黄河流域生态保护的影响研究:基于产业结构升级的视角[J].中国商论,2024(11):146-150.
[9] 戚聿东,刘翠花,丁述磊.数字经济发展、就业结构优化与就业质量提升[J].经济学动态,2020(11):17-35.
[10] 何维达,温家隆,张满银.数字经济发展对中国绿色生态效率的影响研究:基于双向固定效应模型[J].经济问题,2022(1):1-8,30.
[11] 葛世帅,李婉琪,刘建华,等.黄河流域数字经济-生态保护-文旅融合协调发展评价及障碍因子[J].西北大学学报(自然科学版),2025,55(4):808-821.
[12] 裴玉龙,李凤,龙迎红,等.黄河流域数字经济与生态效率时空演化及协调发展分析[J].鲁东大学学报(自然科学版),2024,40(1):14-25.
[13] 阮连杰,李媛,任保平.黄河流域数字经济、绿色技术创新与生态保护的三元协调研究[J].人民黄河,2025,47(1):28-34.
[14] 郑明贵,罗曾茜,康仪婷.数字化转型对中国资源型企业碳减排绩效的影响研究[J].黄金科学技术,2025,33(2):417-430.
[15] 周文,叶蕾.新质生产力与数字经济[J].浙江工商大学学报,2024(2):17-28.
[16] 焦勇,齐梅霞.数字经济赋能新质生产力发展[J].经济与管理评论,2024,40(3):17-30.
[17] 顾华详.数字经济赋能中国(新疆)自贸试验区发展新质生产力研究[J].新疆社会科学,2024(5):74-90.
[18] 姚树洁,王洁菲.数字经济推动新质生产力发展的理论逻辑及实现路径[J].烟台大学学报(哲学社会科学版),2024,37(2):1-12.
[19] 张森,温军.数字经济赋能新质生产力:一个分析框架[J].当代经济管理,2024,46(7):1-9.
[20] 倪庆东.数字经济赋能新质生产力发展的实践路径[J].人民论坛·学术前沿,2024(8):106-110.
[21] 黄群慧,盛方富.新质生产力系统:要素特质、结构承载与功能取向[J].改革,2024(2):15-24.
[22] 周文,许凌云.论新质生产力:内涵特征与重要着力点[J].改革,2023(10):1-13.
[23] 刘洋,李浩源.新质生产力赋能高质量发展的逻辑理路、关键着力点与实践路径[J].经济问题,2024(8):11-18,129.
[24] 齐承水.如何理解"新质生产力本身就是绿色生产力"[J].经济学家,2024(7):15-23.
[25] 王妍,马蓝.数字经济与新质生产力对黄河流域生态效率的影响[J].人民黄河,2025,47(8):39-45.
[26] 冯翊宁,孟天赐,张立华.区域差异视角下数字经济与新质生产力耦合协调发展与时空演化特征:基于我国省域面板数据的实证检验[J].时代经贸,2025,22(7):166-172.
[27] 薛明月.黄河流域经济发展与生态环境耦合协调的时空格局研究[J].世界地理研究,2022,31(6):1261-1272.
[28] 孙倩,李素英.京津冀数字金融对城市生态效率的驱动研究:理论框架、效率测度与组态路径[J].中国流通经济,2025,39(4):99-114.
[29] 单永娟,姜书强,张家俊.京津冀区域新质生产力与碳排放效率协调发展研究[J].河北环境工程学院学报,2024,34(6):1-7.
[30] 郭旻申,方先明.绿色金融、数字经济与工业碳减排[J].现代经济探讨,2025(7):50-61.
[31] 余东升,余娟娟,李小平.中国省级碳排放与新质生产力的耦合协调测度及收敛性[J].环境科学,2026(3):1413-1420.
[32] 周文慧,钞小静.黄河流域数字基础设施、经济发展韧性与生态环境保护的耦合协调发展分析:基于三元系统耦合协调模型[J].干旱区资源与环境,2023,37(9):1-9.
[33] 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.
[34] 白云朴,赵鸿洋.数字经济政策赋能新质生产力:基于大数据综合试验区的准自然实验[J/OL].科学学与科学技术管理,2025 [2025-09-25]. https://doi. org/10.20201/j. cnki. ssstm. 20250923.002.
[35] 刘鑫.生态文明视角下的新质生产力:理论构建、战略价值与转化路径[J].技术经济与管理研究,2024(9):62-68.
[36] 初丽霞,岳远媛.数字经济对黄河流域生态效率的影响[J].人民黄河,2023,45(8):47-53.
[37] 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.
[38] 徐维祥,张凌燕,刘程军,等.城市功能与区域创新耦合协调的空间联系研究:以长江经济带107个城市为实证[J].地理科学,2017,37(11):1659-1667.
[39] 张嘉贝,王珂珂,施天乐,等.黄河流域生态保护、数字经济与文旅融合耦合协调发展研究[J].资源开发与市场,2023,39(12):1684-1692.
[40] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

# Spatio-temporal differentiation and driving mechanisms of the triadic coupling and coordination among new-quality productive forces, digital economy, and ecological efficiency in the Yellow River Basin

Wang Shengxia, Wu Xinru

(*School of Business Administration, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou* 730000, *China*)

**Abstract**: Clarifying the synergistic mechanisms among new-quality productive forces, digital economy, and ecological efficiency (NDE system) is of significant strategic importance for achieving a green transition in the development model and a shift in growth drivers in the Yellow River Basin. Taking the 57 prefecture-level cities in the Yellow River Basin as the research subjects, this study constructs an NDE system evaluation index system and comprehensively employs methods such as the coupling coordination model, the gravity model, and the geodetector to conduct an empirical analysis of the coupling coordination among the three elements and their evolution patterns from 2010 to 2021. The study reveals that: (1) The coupling coordination of the NDE system exhibits an overall upward trend, forming a pattern characterized by high levels in the southeast and low levels in the northwest, with significant spatial differentiation; (2) The spatial connectivity network has evolved from "local agglomeration" to "region-wide linkage," forming a multi-core radiation pattern; (3) The driving mechanism has shifted from early government-led initiatives to a diversified synergy driven by opening-up; the interactive effect between transportation location and industrial structure ($q$=0.981) has become a key driving force, with the interaction among various factors exhibiting nonlinear amplification characteristics. While the coordinated development of the NDE system in the Yellow River Basin has achieved results, it remains uneven. There is an urgent need to implement differentiated regional strategies, optimize diversified driving mechanisms, and improve the spatial coordination network.

**Key words**: Yellow River Basin; new-quality productive forces; digital economy; ecological efficiency; spatiotemporal differentiation; driving mechanisms