

# 数字技术时空分布及对生态环境的影响

张雷, 余庆玲, 谢菲菲\*

重庆工商大学公共管理学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月28日; 录用日期: 2026年5月25日; 发布日期: 2026年6月10日

## 摘要

基于2006~2021年中国30个省级行政区面板数据和中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ), 从数字基础设施、数字技术应用和数字技术创新三个维度构建数字技术发展水平综合指数, 运用熵值法、莫兰指数和双向固定效应模型, 考察数字技术发展的时空特征及其对生态环境质量的影响。结果表明: 样本期内中国数字技术发展水平持续提升, 整体呈现东部高于中部、中部高于西部的梯度格局; 各数字技术测度指标整体空间相关性较弱, 但局部空间分异明显; 双向固定效应回归和稳健性检验结果均表明, 数字技术发展水平对生态环境质量具有显著正向影响。

## 关键词

数字技术, 生态环境质量, 空间分布, 双向固定效应模型, 稳健性检验

# Spatial and Temporal Distribution of Digital Technologies and Their Impact on Ecological Environments

Lei Zhang, Qingling Yu, Feifei Xie\*

School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing

Received: April 28, 2026; accepted: May 25, 2026; published: June 10, 2026

## Abstract

Based on panel data from 30 province-level administrative regions in China from 2006 to 2021 and the High-Resolution Ecological Environment Quality Dataset (CHEQ) in China, this study constructed an index of digital technology development level from three dimensions: digital infrastructure, digital technology application, and digital technology innovation. Using entropy value method, Moran

\*通讯作者。

index, and two-way fixed-effect model, the study examined the spatial and temporal characteristics of digital technology development and its impact on ecological environment quality. The results show that the level of digital technology development in China has continued to rise over the sample period, with the overall pattern being a gradient of higher levels in the east than in the central region and higher levels in the central region than in the west. While the spatial correlation of various digital technology metrics is generally weak, there are significant local spatial differences. Both the two-way fixed-effect regression and robustness tests indicate that the level of digital technology development has a significant positive impact on ecological environment quality.

## Keywords

Digital Technology, Ecological Environment Quality, Spatial Distribution, Two-Way Fixed Effects Model, Robustness Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着互联网、大数据、人工智能、云计算等数字技术的持续发展,数字技术已逐步嵌入经济社会运行的各个领域,并在产业升级、效率提升和区域发展格局演化中发挥着日益重要的作用[1]-[4]。从区域层面看,新型数字基础设施布局和数字技术应用产业集聚表现出明显的空间差异,数字技术发展已成为影响区域竞争力和高质量发展路径的重要因素[5][6]。与此同时,生态环境质量始终是高质量发展进程中的重要议题。现有研究表明,生态环境质量的时空演变并非由单一因素决定,而是受到自然条件与人类活动等多重因素共同影响,气温、降水、地形地貌及人类活动强度等均可能对区域生态环境质量产生显著作用[7]-[10]。在这一背景下,传统治理方式在信息获取、动态监测和协同治理等方面的局限性逐渐显现,如何借助数字技术提升生态环境治理能力,已成为值得进一步讨论的重要问题。

围绕数字技术与生态环境之间的关系,现有研究已形成一定基础。一方面,相关文献指出,数字技术能够通过环境监测、信息流动、资源配置优化及治理机制重构等途径推动生态环境治理与绿色低碳发展[11][12];在城乡环境治理和农业绿色转型等领域,数字技术也被证明有助于缓解信息不对称、提升治理效率并改善环境绩效[13][14]。另一方面,也有研究指出,数字技术扩张并不必然带来单一正向的环境后果,其发展过程可能伴随能源消耗增加、碳排放上升以及电子废弃物累积等问题,从而对资源环境系统形成新的压力[15][16]。此外,数字技术在生态保护和生物多样性保护中的应用,也表明其在生态环境治理中具有较强的拓展潜力[17]。由此可见,数字技术的生态环境效应具有一定复杂性,其实际影响仍有赖于具体尺度和研究对象的进一步检验。

从现有研究看,学界已较为充分地讨论了数字技术的经济社会效应、生态环境质量的影响因素以及数字技术的环境效应,但相关研究仍存在进一步深化的空间。一方面,关于数字技术发展的研究多集中于产业转型、应用场景和区域经济效应,对其空间分布格局的系统刻画相对不足;另一方面,关于数字技术与生态环境关系的研究虽已取得一定进展,但数字技术能否显著改善生态环境质量,以及这一影响在省际尺度上是否稳定存在,仍缺乏基于长期面板数据的系统检验[1][5][11][13]。在这一研究背景下,从省际尺度出发考察数字技术发展的时空特征及其生态环境效应,具有进一步研究的必要。依托2006~2021年中国30个省级行政区(除港澳台和西藏外)面板数据和中国高分辨率生态环境质量数据集

(CHEQ),从数字基础设施、数字技术应用和数字技术创新三个维度构建数字技术发展水平综合指数,在刻画其时空分异特征的基础上,进一步采用双向固定效应模型检验数字技术与生态环境质量之间的关系[18][19]。结合既有研究关于信息流动、缓解信息不对称、优化资源配置和提升治理协同等作用机制的讨论[20][21],数字技术发展水平提升预期将对生态环境质量产生正向影响。

## 2. 研究方法

### 2.1. 数据来源与样本范围

本文选取 2006~2021 年中国 30 个省级行政区(除港澳台和西藏外)作为研究对象,构建省际平衡面板数据。考虑到港澳台地区统计口径与内地存在差异,相关数据可比性不足,未将其纳入研究范围;同时,西藏自治区由于连续年份数据缺失较多,予以剔除。

在变量设定上,本文将生态环境质量作为被解释变量,将数字技术发展水平作为核心解释变量,并引入人类活动程度、自然因素、气温、人口数量和人口密集程度作为控制变量。其中,生态环境质量由中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ)提取形成省级面板数据;数字技术发展水平由数字基础设施、数字技术应用和数字技术创新三个维度综合测算得到;控制变量中,人类活动程度以夜间灯光数据表征,自然因素以年平均降水量表征,气温以年平均气温表征,人口数量以年总人口表征,人口密集程度以人口密度表征。各变量定义及描述性统计结果见表 1。

Table 1. Variable definitions and descriptive statistics

表 1. 变量定义与描述性统计

变量类型	变量名称	变量定义	数据来源	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	生态环境质量 (CHEQ)	由 CHEQ 值提取形成省级面板数据	中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ)	480	0.48	0.13	0.19	0.72
核心解释变量	数字技术发展水平	用于衡量区域数字技术发展程度的综合变量,具体测度方法见下文	《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》及各省、市统计年鉴	480	0.09	0.11	0.00	0.91
控制变量	人类活动程度	由夜间灯光数据表示	国家地球系统科学数据中心	480	0.00	0.00	0.00	0.01
	自然因素	由年平均降水量表示	国家地球系统科学数据中心	480	6.73	8.83	0.07	46.42
	气温	由年平均气温表示	国家地球系统科学数据中心	480	13.54	5.59	1.47	25.56
	人口数量	由年总人口表示	《中国统计年鉴》	480	4534	2784	548	12684
	人口密集程度	由人口密度表示	《中国统计年鉴》	480	459.01	676.29	7.59	3925.87

### 2.2. 研究方法

#### 2.2.1. 数字技术综合指数构建

现有研究对于数字技术发展水平的量化测度尚未形成统一标准。随着数字经济的持续发展,数字技术的内涵已由传统信息化条件扩展至基础设施支撑、技术应用扩散与创新能力提升等多个层面。已有研究认为,数字基础设施是数字技术运行与扩散的基本条件,长途光缆线路长度、互联网宽带接入端口等

指标能够在一定程度上反映区域数字化基础[18][19];也有学者从数字基础设施、数字技术应用和数字技术创新三个维度对数字技术发展水平进行综合测度[1]。基于既有研究的测度思路,并结合数据可得性,本文从数字基础设施、数字技术应用和数字技术创新三个维度构建数字技术发展水平指标体系,以综合刻画各地区数字技术发展水平。

具体而言,数字基础设施维度主要反映数字技术发展的网络承载能力与硬件支撑条件,选取互联网普及率、长途光缆线路长度、互联网宽带接入端口、移动电话交换机容量和移动电话普及率五项指标加以衡量;数字技术应用维度主要反映数字技术在经济社会中的普及程度与应用广度,选取互联网域名数、电信业务总量、邮政业务总量、技术市场成交额和数字经济企业数量五项指标予以表征;数字技术创新维度主要反映数字技术领域的研发投入与创新产出水平,选取规模以上工业企业 R&D 人员全时当量、R&D 经费支出和专利申请授权数量三项指标进行刻画。上述指标均为正向指标,具体指标体系见表 2。

**Table 2.** Index system for the level of development of digital technology

**表 2.** 数字技术发展水平指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位	指标属性
数字技术发展水平综合指数	数字基础设施	互联网普及率	%	+
		长途光缆线路长度	万公里	+
		互联网宽带接入端口	十万个	+
		移动电话交换机容量	万元	+
		移动电话普及率	部/百人	+
	数字技术应用	互联网域名数	万个	+
		电信业务总量	亿元	+
		邮政业务总量	亿元	+
		技术市场成交额	万元	+
		数字经济企业数量	个	+
	数字技术创新	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量	人年	+
		R&D 经费支出	十亿元	+
		专利申请授权数量	千项	+

为避免主观赋权对测度结果产生干扰,本文采用熵值法对各项指标进行加权处理,以测算 2006~2021 年中国 30 个省级行政区(除港澳台和西藏外)数字技术发展水平综合指数。熵值法能够根据各指标所包含的信息差异客观确定权重,因而适用于多指标综合评价。

具体而言,首先对原始指标进行标准化处理。由于本文所选指标均为正向指标,其标准化公式为:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

其中,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个样本在第  $j$  个指标上的原始值,  $z_{ij}$  表示标准化后的指标值。

在此基础上,为避免标准化结果出现零值对后续计算造成影响,进一步对数据进行平移处理:

$$z'_{ij} = z_{ij} + 1 \quad (2)$$

其中,  $z'_{ij}$  表示平移后的指标值。

随后, 计算第  $j$  项指标下第  $i$  个样本的比重:

$$p_{ij} = \frac{z'_{ij}}{\sum_{i=1}^m z'_{ij}} \quad (3)$$

其中,  $m$  表示样本总数,  $p_{ij}$  表示第  $i$  个样本在第  $j$  项指标中的比重。

进一步地, 计算各指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, k = \frac{1}{\ln m} \quad (4)$$

其中,  $e_j$  表示第  $j$  项指标的熵值, 且  $0 \leq e_j \leq 1$ 。

在获得熵值后, 计算各指标的差异系数:

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

其中,  $d_j$  表示第  $j$  项指标的信息差异程度。

据此, 可进一步得到各指标权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

其中,  $w_j$  表示第  $j$  项指标的权重,  $n$  表示评价指标总数。

最后, 计算各地区数字技术发展水平综合指数:

$$Digital_i = \sum_{j=1}^n w_j z'_{ij} \quad (7)$$

综合指数越大, 表明该地区数字技术发展水平越高; 反之, 则表明其数字技术发展水平相对较低。基于上述步骤, 本文测算得到 2006~2021 年中国 30 个省级行政区(除港澳台和西藏外)数字技术发展水平综合指数, 并将其作为后续实证分析的核心解释变量。

### 2.2.2. 空间自相关分析

空间自相关分析旨在识别地理单元属性值在空间上的关联程度。鉴于数字技术发展水平可能存在区域集聚与邻近溢出特征, 本文采用莫兰指数对数字技术发展水平测度指标进行空间相关性检验。全局莫兰指数用于判断研究区域整体上的空间依赖程度; 局部莫兰指数则用于识别局部地区的空间关联类型, 从而进一步揭示数字技术发展在省际尺度上的集聚特征与空间异质性, 其计算公式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

其中,  $n$  为样本地区数量,  $x_i$  和  $x_j$  分别表示地区  $i$  与地区  $j$  的观测值,  $\bar{x}$  为样本均值,  $W_{ij}$  为空间权重矩阵元素,  $S_0$  空间权重矩阵之和。一般而言, 当  $I > 0$  时, 表明空间上存在正相关关系; 当  $I < 0$  时, 表明空间上存在负相关关系; 当  $I$  接近于 0 时, 则说明整体空间相关性较弱。结合全局与局部检验结果, 可以较为完整地把握数字技术发展水平的空间分布特征。

### 2.2.3. 双向固定效应模型

在计量识别方面, 考虑到不同省级行政区在经济基础、资源禀赋和治理能力等方面存在相对稳定但

难以直接观测的差异，同时各年份还可能共同受到宏观政策环境与外部冲击的影响，本文采用双向固定效应模型控制地区效应与时间效应，以识别数字技术发展对生态环境质量的影响。模型设定如下：

$$CHEQ_{it} = \alpha + \beta Digital_{it} + \sum \gamma_k Control_{kit} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

其中， $i$  表示省级行政区， $t$  表示年份； $CHEQ_{it}$  为被解释变量，表示第  $i$  个省级行政区在第  $t$  年的生态环境质量； $Digital_{it}$  为核心解释变量，表示数字技术发展水平综合指数； $Control_{kit}$  为一组控制变量，包括人类活动程度、自然因素、气温、人口数量和人口密集程度； $\mu_i$  表示省级行政区固定效应，用以控制地区层面不随时间变化的个体差异； $\lambda_t$  表示年份固定效应，用以控制年度层面的共同冲击； $\varepsilon_{it}$  为随机误差项。参数  $\beta$  为本文关注的核心系数，其符号与显著性反映数字技术发展对生态环境质量的影响方向及影响强度。

### 3. 实证分析

#### 3.1. 数字技术发展的时空特征

##### 3.1.1. 数字技术发展水平测算结果

依据熵值法测算结果，2006~2021 年中国 30 个省级行政区(除港澳台和西藏外)数字技术发展水平整体呈上升态势，但区域差异始终存在。结合指标权重、综合得分、区域均值及空间自相关分析结果，可以看出，我国数字技术发展在时间维度上表现出持续提升特征，在空间维度上则呈现较为稳定的梯度差异与局部分异格局。

如表 3 所示，从指标权重看，数字技术应用维度的权重最高，为 53.94%；数字技术创新和数字基础设施的权重分别为 24.02% 和 22.03%。这一结果表明，在本文所构建的评价体系中，各地区数字技术发展水平差异主要体现于技术应用的广度和活跃程度，而非单纯取决于基础设施存量或创新投入规模。进一步观察二级指标权重，邮政业务总量、技术市场成交额、长途光缆线路长度和专利申请授权数量所占比重相对较高，说明这些指标对于识别省际数字技术发展差异具有较强代表性。

**Table 3.** Weightings of the indicators in the digital technology indicator system

**表 3.** 数字技术指标体系指标权重

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重
数字技术发展水平	数字基础设施	22.03%	互联网普及率(%)	1.21%
			长途光缆线长度(万公里)	11.82%
			互联网宽带接入端口(十万个)	4.92%
			移动电话交换机容量(万元)	2.75%
			移动电话普及率(部/百人)	1.33%
	数字技术应用	53.94%	互联网域名数(万个)	8.18%
			电信业务总量(亿元)	9.30%
			邮政业务总量(亿元)	16.33%
			技术市场成交额(万元)	12.18%
			数字经济企业数量(个)	7.95%
	数字技术创新	24.02%	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量_人年	7.23%
			R&D 经费支出(十亿元)	7.44%
			专利申请授权数量(千项)	9.35%

由图 1 和图 2 可以看出, 2006~2021 年各省级行政区数字技术发展水平总体呈上升态势, 但不同地区的增长幅度和发展水平存在明显差异。从图 1 的热力图来看, 样本期内大多数省级行政区的数字技术综合指数均随时间推移而逐步提高, 但省际差异始终较为显著。其中, 广东、浙江、江苏等省级行政区长期处于较高水平, 颜色变化也更为明显, 表明其数字技术发展速度和发展水平整体领先于其他地区; 北京、上海、山东等省级行政区亦保持在相对较高水平。相比之下, 甘肃、宁夏、青海、新疆等省级行政区综合指数长期处于较低区间, 增长幅度相对有限, 说明数字技术发展仍在较大程度上受经济基础、区位条件和创新资源配置差异的影响。

图 3 进一步从分组变化趋势展示了各省级行政区数字技术发展水平的演进特征。高值组省级行政区整体增长较快, 且组内头部省级行政区与其他省级行政区之间的差距较为明显, 其中广东的上升幅度最为突出, 至 2021 年综合指数达到 0.91, 显著高于其他省级行政区; 浙江和江苏分别达到 0.59 和 0.56, 也表现出较强的增长趋势。中值组省级行政区整体保持稳步上升, 组内差异相对适中; 低值组省级行政区虽总体上呈增长态势, 但综合指数水平整体偏低, 增长速度相对较缓。

图 3 显示, 2006~2021 年中国整体及东中西部数字技术发展水平得分均值总体呈上升态势, 反映出

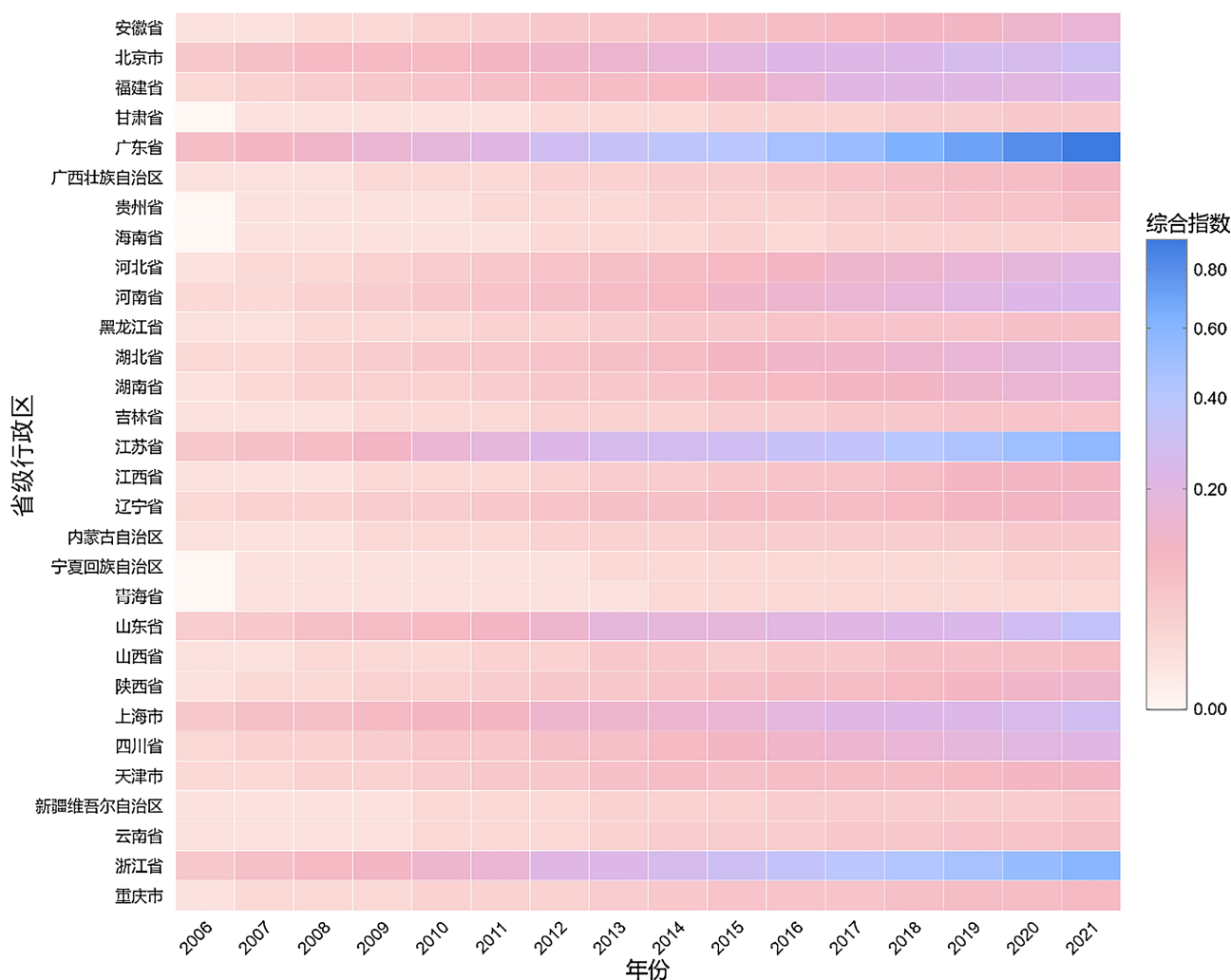


Figure 1. Heatmap of the comprehensive index of digital technology development levels by province-level administrative regions, 2006~2021  
图 1. 2006~2021 年各省级行政区数字技术发展水平综合指数热力图

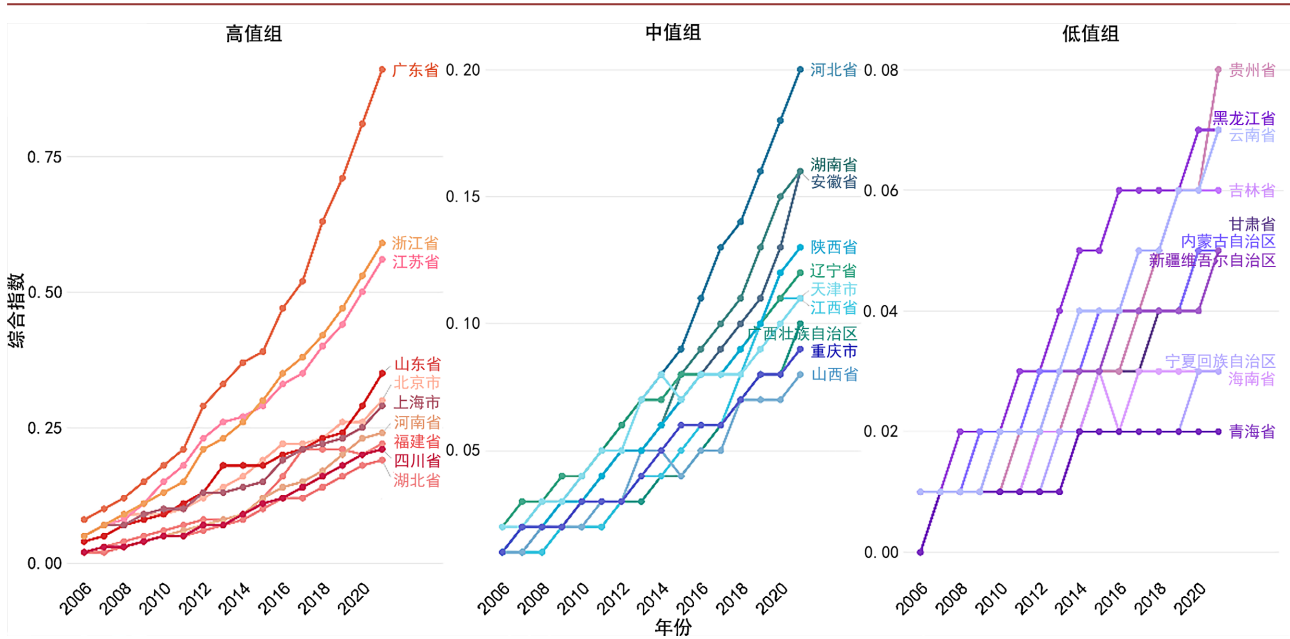


Figure 2. Line chart grouping by level of digital technology development  
图 2. 数字技术发展水平分组折线图

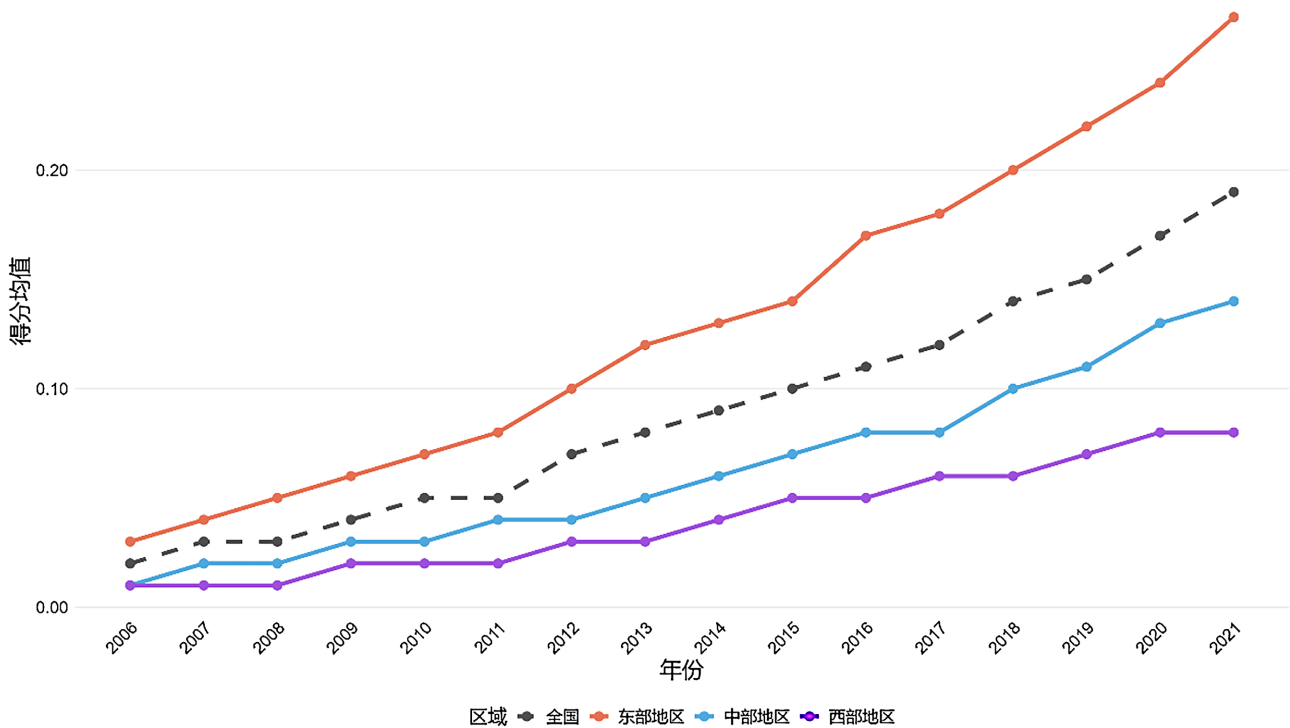


Figure 3. Trend of the average score changes in the overall and regional (eastern, central, and western) digital technology development levels in China from 2006 to 2021  
图 3. 2006~2021 年中国整体及东中西部数字技术发展水平得分均值变化趋势

样本期内我国数字技术发展持续推进。全国均值由 2006 年的 0.02 提高至 2021 年的 0.19，说明数字技术发展整体取得了较为明显的进展。分区域看，东部地区始终保持最高水平，其得分均值由 0.03 增至 0.27；中部地区由 0.01 增至 0.14；西部地区由 0.01 增至 0.08。整体而言，数字技术发展水平在全国范围内普遍

提升,但东部、中部和西部之间的梯度差异仍较为显著。图中四条曲线虽均呈上升趋势,但区域间相对差距并未明显缩小,表明我国数字技术发展的区域非均衡特征仍然较为突出。

### 3.1.2. 全局自相关分析

从整体空间相关性看,各数字技术测度指标的空间集聚特征并不强。表4显示,在13个测度指标中,技术市场成交额、移动电话交换机容量和互联网域名数的莫兰指数为负,其余指标为正,但绝大多数指标的莫兰指数均接近于0,说明省际尺度上的整体空间依赖程度有限。其中,互联网普及率和R&D经费支出的莫兰指数相对较高,分别为0.12和0.10,表明基础性接入条件和创新投入在空间上更易表现出一定程度的同质集聚。相较之下,技术市场成交额和互联网域名数等指标则呈现出一定的空间异质性,反映出不同地区在数字技术应用和市场活跃度方面存在较强差别。

**Table 4.** Global autocorrelation analysis of various digital technology indicators

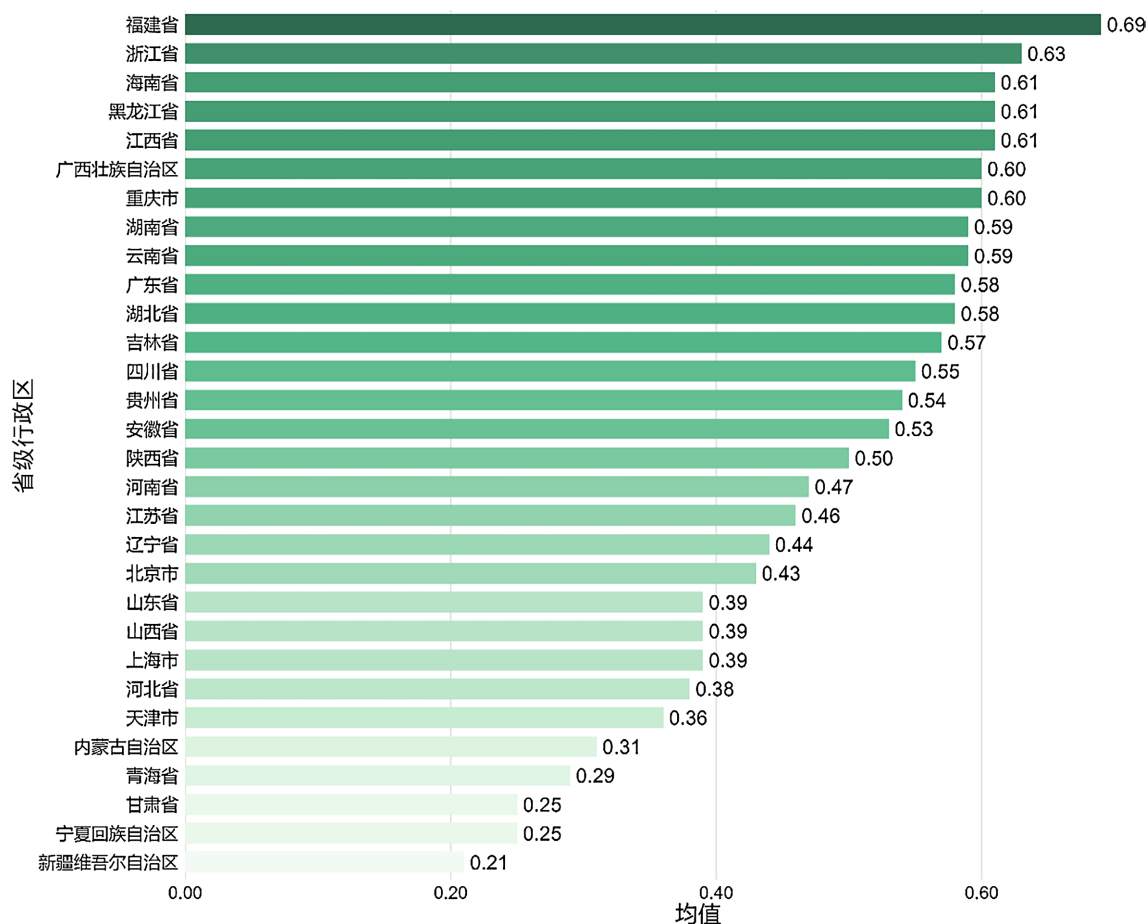
**表 4.** 各数字技术指标全局自相关分析

数字技术指标	Moran I 指数	Z 得分	P 值
规模以上工业企业 R&D 人员全时当量	0.09	1.79	0.07
数字经济产业企业个数	0.05	1.24	0.22
技术市场成交额	-0.07	-0.70	0.49
移动电话交换机容量	-0.05	-0.22	0.82
专利申请授权数量	0.07	1.51	0.13
互联网宽带接入端口	0.03	0.83	0.41
长途光缆线路长度	0.08	1.65	0.10
互联网普及率	0.12	2.06	0.04
移动电话普及率	0.01	0.66	0.51
互联网域名数	-0.04	-0.02	0.99
电信业务总量	0.05	1.17	0.24
邮政业务总量	0.05	1.35	0.18
R&D 经费支出	0.10	1.93	0.05

## 3.2. 生态环境质量的时空特征

基于中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ),提取了中国30个省级行政区(除港澳台和西藏外)2006年、2011年、2016年和2021年的生态环境质量数据,并计算了2006~2021年的均值。图4展示了各省级行政区生态环境质量均值的排序结果。可以看出,样本期内中国各省级行政区生态环境质量存在较为明显的省际差异,其中福建、浙江、江西等省级行政区均值较高,生态环境质量整体处于较优水平;而新疆、甘肃、宁夏等省级行政区均值偏低,生态环境质量相对较弱。由此表明,中国生态环境质量在空间上具有较为稳定的区域差异。

由表5从分时点结果看,2006年生态环境质量最高的省级行政区为福建,CHEQ值为0.72;生态环境质量相对较低的省级行政区主要包括新疆、甘肃、青海、宁夏和内蒙古,CHEQ值介于0.22~0.31之间,其中新疆最低,仅为0.22。2011年,福建和浙江仍处于全国领先水平,CHEQ值分别达到0.71和0.62以上,其中福建略高于浙江;生态环境质量较低的地区仍主要集中于新疆、青海、甘肃、宁夏和内蒙古,



**Figure 4.** Ranking chart of the average quality of the ecological environment  
**图 4.** 生态环境质量均值排序图

**Table 5.** Environmental quality data values and average rankings of 30 province-level administrative regions in China for 2006, 2011, 2016, and 2021

**表 5.** 2006 年、2011 年、2016 年、2021 年中国 30 个省级行政区生态环境质量数据值及均值排名

省级行政区	2006 年	2011 年	2016 年	2021 年	均值	排名
安徽省	0.53	0.53	0.54	0.53	0.53	15
北京市	0.40	0.42	0.43	0.45	0.43	20
福建省	0.68	0.67	0.70	0.72	0.69	1
甘肃省	0.26	0.24	0.24	0.25	0.25	29
广东省	0.56	0.56	0.60	0.62	0.58	10
广西壮族自治区	0.55	0.58	0.63	0.64	0.60	7
贵州省	0.52	0.52	0.56	0.59	0.54	14
海南省	0.58	0.59	0.62	0.64	0.61	5
河北省	0.37	0.37	0.39	0.39	0.38	24
河南省	0.47	0.47	0.46	0.47	0.47	17
黑龙江省	0.59	0.62	0.64	0.60	0.61	4

续表

湖北省	0.58	0.57	0.58	0.58	0.58	11
湖南省	0.59	0.59	0.60	0.61	0.59	8
吉林省	0.55	0.58	0.58	0.58	0.57	12
江苏省	0.47	0.45	0.46	0.45	0.46	18
江西省	0.62	0.60	0.63	0.63	0.61	3
辽宁省	0.44	0.44	0.44	0.45	0.44	19
内蒙古自治区	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	26
宁夏回族自治区	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	28
青海省	0.29	0.29	0.27	0.27	0.29	27
山东省	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	22
山西省	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	23
陕西省	0.51	0.49	0.51	0.52	0.50	16
上海市	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	21
四川省	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	13
天津市	0.35	0.36	0.36	0.37	0.36	25
新疆维吾尔自治区	0.22	0.21	0.21	0.20	0.21	30
云南省	0.59	0.59	0.61	0.62	0.59	9
浙江省	0.63	0.63	0.63	0.65	0.63	2
重庆市	0.58	0.58	0.62	0.64	0.60	6

CHEQ 值介于 0.21~0.31 之间, 新疆仍为最低值地区, 且较 2006 年进一步下降。2016 年, 福建继续保持最高水平, CHEQ 值为 0.70; 生态环境质量较低的地区主要为新疆、甘肃、宁夏和内蒙古, 其中新疆仍处于最低水平, CHEQ 值为 0.21。2021 年, 福建再次位居首位, CHEQ 值回升至 0.72; 生态环境质量较低的地区则主要集中于新疆、青海、甘肃和宁夏, 其中新疆仍为全国最低, CHEQ 值降至 0.20。

从空间格局看, 生态环境质量高值区主要分布于东部沿海及部分南方地区, 低值区则主要集中于西部地区, 区域分异特征较为明显。福建在四个时点上均保持较高水平, 说明其生态环境质量具有较强稳定性; 浙江、江西等也长期处于较高水平。相较之下, 新疆始终处于低值区, 且 CHEQ 值呈持续下降趋势, 说明其生态环境质量改善压力较大。由此可见, 2006~2021 年中国生态环境质量总体呈现出“东部较高、西部较低”的空间分布特征, 且高值区与低值区的地域分布较为稳定。

### 3.3. 基准回归分析

通过 Stata 17 软件进行回归估计, 数字技术发展水平对生态环境质量影响效应的结果如表 6 所示。在两种模型设定下, 数字技术发展水平的回归系数均为正, 表明数字技术与生态环境质量改善之间存在稳定的正向关系。

具体来看, 在未加入控制变量时, 数字技术发展水平的回归系数为 0.0299, 标准误为 0.0127, Z 值为 2.35, P 值为 0.019, 在 5% 的统计水平上显著。加入控制变量后, 数字技术发展水平的回归系数为 0.0262, 标准误为 0.0125, Z 值为 2.09, P 值为 0.037, 仍在 5% 的统计水平上显著为正。与不含控制变量相比, 含

控制变量列中核心解释变量的系数有所减小，但其符号与显著性并未发生实质变化，说明在控制相关因素后，数字技术发展水平对生态环境质量的正向影响依然存在。

控制变量的估计结果进一步表明，人类活动程度、自然因素和气温的回归系数分别为 0.8290、0.000156 和 0.000563，均为正值；人口数量和人口密集程度的回归系数分别为-0.000000166 和-0.00000461，均为负值。就回归方向而言，人类活动程度、自然因素和气温与生态环境质量之间表现为正向关系，而人口规模扩大及人口集聚程度提高则表现为负向关系。

基于上述结果，数字技术发展水平提升与生态环境质量改善之间存在较为稳定的正向关联。即使在加入控制变量后，这一关系仍然成立，表明核心回归结果具有较好的稳定性。

**Table 6.** Fixed effect results

**表 6.** 固定效应结果

CHEQ	不含控制变量	加入控制变量
数字技术发展水平	0.0299**	0.0262**
人类活动程度	-	0.829
自然因素	-	0.000156
气温	-	0.000563
人口数量	-	-0.000000166
人口密集程度	-	-0.00000461
标准误	0.0127	0.0125
Z 值	2.35	2.09
P 值	0.019	0.037

注：\*\*表示  $P < 0.05$ 。

### 3.4. 稳健性检验与结果讨论

为进一步检验基准回归结果的可靠性，本文采用替换变量法和双侧缩尾处理两种方式进行稳健性检验。具体而言：一是分别以移动电话普及率和互联网域名数替代原有数字技术发展水平综合指数，作为核心解释变量重新进行回归；二是对全部变量按前 12.5% 和后 12.5% 的分位点进行双侧缩尾处理后再次估计模型。相应结果见表 7。

从稳健性检验结果看，无论采用替换变量法还是双侧缩尾处理，核心解释变量的回归系数均保持为正，且均通过显著性检验。其中，以移动电话普及率替代综合指数后，回归系数为 0.000244，在 5% 的

**Table 7.** Results of the robustness test on the impact of digital technology on the ecological environment

**表 7.** 数字技术对生态环境的影响的稳健性检验结果

被解释变量	移动电话普及率	互联网域名数	双侧缩尾处理
影响系数	0.000244**	0.00004***	0.0508*
标准误	0.0001114	0.00000995	0.0201
Z 值	2.19	4.02	2.52
P 值	0.029	0	0.012

注：\*\*\*表示  $P < 0.01$ ，\*\*表示  $P < 0.05$ ，\*表示  $P < 0.1$ 。

统计水平上显著；以互联网域名数替代综合指数后，回归系数为 0.00004，在 1% 的统计水平上显著；在对全部变量进行双侧缩尾处理后，回归系数为 0.0508，并在 10% 的统计水平上显著。尽管不同模型中的系数数值存在差异，但这主要与变量度量方式和处理尺度不同有关，并不影响结果方向的判断。

结合基准回归结果可以看出，在不同稳健性检验设定下，核心解释变量的符号和显著性并未发生实质性变化，说明数字技术发展对生态环境质量的正向影响并非由特定变量设定或极端样本值所驱动。换言之，数字技术发展水平提升与生态环境质量改善之间的正向关系具有较好的稳定性，前文基准回归所得结论是可靠的。

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 研究结论

基于 2006~2021 年中国 30 个省级行政区(除港澳台和西藏外)面板数据和中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ)，本文从数字技术发展的时空特征及其生态环境效应两个层面展开分析，得到以下结论。

第一，样本期内中国数字技术发展水平整体持续提升，但区域差异较为显著。无论从综合指数变化还是从区域均值看，数字技术发展水平平均呈现逐年上升趋势，且整体表现出东部高于中部、中部高于西部的梯度格局。省际层面上，广东、江苏、浙江、北京、上海等地区数字技术发展水平始终处于较高水平，而西部及部分边疆地区相对偏低，表明数字技术发展仍具有较强的区域非均衡特征。

第二，数字技术相关指标在空间上整体相关性较弱，但存在明显的局部空间分异。

第三，数字技术发展水平对生态环境质量具有显著正向影响。基准回归结果显示，在未加入控制变量和加入控制变量的两种模型设定下，数字技术发展水平的估计系数均为正，且通过显著性检验。稳健性检验进一步表明，在替换核心解释变量和双侧缩尾处理后，核心解释变量的回归系数符号及显著性并未发生实质性变化，说明数字技术发展对生态环境质量改善的促进作用具有较好的稳健性。

### 4.2. 讨论与不足

本文结果表明，数字技术不仅体现为经济社会转型的重要推动力量，也在生态环境质量改善中发挥了积极作用。这说明，数字技术的作用并不限于产业升级和信息传递层面，还可能通过提升环境监测能力、优化资源配置方式以及增强治理协同程度，对生态环境治理产生持续影响。

同时，本文仍存在一定局限。其一，研究尺度主要停留在省级层面，难以进一步揭示更细空间尺度上的区域差异；其二，数字技术发展水平虽通过综合指数加以刻画，但不同维度及具体指标之间的作用机制尚未展开更细致的识别；其三，本文主要采用双向固定效应模型进行经验检验，尚未进一步引入空间计量模型或机制检验方法，对数字技术影响生态环境质量的传导路径仍有待深化。

### 4.3. 政策建议

结合实证结果与数字技术发展的区域差异、环境效应特征，应实行分区精准施策，推动数字环保与区域绿色协调发展深度融合。

东部地区依托数字产业与技术优势，在重点工业行业布局数字化治污示范试点，搭建污染溯源、实时监测、应急处置一体化智慧环保体系，形成成熟可复制的治理模式。同时依托东西部协作机制，常态化向中西部输出技术方案、平台运维与管理经验，发挥区域辐射带动作用。

中部地区以工业园区为主要抓手，补齐市县两级环境数字监测基础设施短板。对高耗能、高排放企业数字化节能降碳改造给予财政补贴，推动排污、能耗在线监测全覆盖；依托省会及中心城市承接数字环保产业转移，培育区域性环保数字产业集群。

西部地区聚焦重点生态功能区, 统筹布局卫星遥感、地面物联网一体化生态监测网络, 布设低成本常态化监测终端。立足生态资源禀赋, 搭建绿色农产品溯源、智慧生态旅游监管数字化平台, 兼顾生态保护与特色产业发展。

此外, 中央应设立中西部数字环保专项补助资金, 重点支持县域环境监测站点数字化升级, 常态化开展基层人员实操培训。搭建全国统一生态环境数据共享平台, 破除地域数据壁垒, 建立跨区域污染联防联控、联动处置机制。制定环保领域数字化应用规范标准, 通过税费减免、设备补贴激励企业主动开展环保数字化技改。健全高校复合型人才培养与东部人才对口支援机制, 聚焦环境监测、生态修复等实用技术开展科研攻关, 推动科技成果落地转化。

## 基金项目

重庆工商大学大学生国家级创新创业训练计划项目, 202411799010, 绿色创新视角下重污染行业PM2.5减排路径及福祉效应研究。

## 参考文献

- [1] 赵巍. 数字技术驱动制造业产业链现代化的效应与机制[J]. 中国流通经济, 2024, 38(4): 3-12.
- [2] 陈秀英, 刘胜, 沈鸿. 以数字化转型赋能提升新质生产力[J]. 新疆社会科学, 2024(2): 41-45.
- [3] 孙梅. 数字技术赋能大学生思想政治教育的风险隐忧与推进策略[J]. 汉江师范学院学报, 2025, 45(4): 97-102.
- [4] 熊飞雪, 游成勋, 朱述斌. 数字技术应用对粮农绿色生产技术采纳行为的影响研究[J/OL]. 中国农业资源与区划: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240325.1624.024.html>, 2024-05-01.
- [5] 王姣娥, 杜方叶, 肖凡. 新型基础设施的空间布局模式研究——以大型数据中心为例[J]. 地理学报, 2023, 78(2): 259-272.
- [6] 王浩力, 向静, 黄庆华. 成渝地区双城经济圈数字技术应用业时空演化特征及驱动因素[J]. 世界地理研究, 2024, 33(3): 131-146.
- [7] 张睿, 刘修国, 徐栋, 等. 2001-2019年洞庭湖流域生态环境质量时空变化及其影响因素[J]. 测绘通报, 2023(2): 1-8.
- [8] 牟风云, 黄淇, 陈林. 基于优化地理探测器的生态环境质量驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 440-449.
- [9] 赵体侠, 朱连奇, 王丽园, 等. 中国生态环境质量与人类活动耦合机制及其影响因子[J/OL]. 环境科学: 1-15. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202307046>, 2024-05-01.
- [10] 王宇白, 耿佳, 周宇宇, 等. 中国北方地区生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应[J]. 测绘通报, 2022(8): 14-21+35.
- [11] 陈伟雄, 李宝银, 杨婷. 数字技术赋能生态文明建设: 理论基础、作用机理与实现路径[J]. 当代经济研究, 2023(9): 99-109.
- [12] 魏春城, 林治宇, 赵晨, 等. 数字技术赋能绿色低碳发展的举措与建议[J]. 环境保护, 2022, 50(20): 28-30.
- [13] 程莉, 林琼. 数字技术能否改善中国城乡环境治理效率? [J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 2023, 37(3): 66-79.
- [14] 白婉婷, 陈建成, 侯建, 等. 数字化转型如何影响农业碳生产率?——来自中国的经验证据[J/OL]. 中国农业资源与区划: 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240307.1036.002.html>, 2024-05-03.
- [15] 中国信通院. ICT行业绿色低碳发展报告[EB/OL]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202312/P020231228759315861293.pdf>, 2026-06-09.
- [16] Li, C., et al. (2019) E-Waste Management: Challenges and Opportunities. *Waste Management*, 30, 567-580.
- [17] 数字技术赋能生态文明建设的逻辑机理与实施路径[EB/OL]. [https://cpms.ssap.com.cn/skwx\\_cmr/initDatabaseDetail?contentId=7501855&contentType=literature&siteId=23](https://cpms.ssap.com.cn/skwx_cmr/initDatabaseDetail?contentId=7501855&contentType=literature&siteId=23), 2026-06-09.
- [18] 许宪春, 张美慧. 中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J]. 中国工业经济, 2020(5): 23-41.
- [19] 刘洋, 董久钰, 魏江. 数字创新管理: 理论框架与未来研究[J]. 管理世界, 2020, 36(7): 198-217+219.
- [20] 马鑫. 数字技术对环境保护财政支出绩效的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [21] 黄璜, 谢思娴, 姚清晨, 等. 数字化赋能治理协同: 数字政府建设的“下一步行动” [J]. 电子政务, 2022(4): 2-27.