Advances in Applied Mathematics 应用数学进展, 2026, 15(11), 139-151
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aam
https://doi.org/10.12677/aam.2026.1511438

Hans汉斯

银发经济与数字经济协同发展的时空演化与驱动机制

——基于2015~2024年省级面板数据的实证分析

张福原

青岛科技大学数理学院，山东 青岛

收稿日期：2026年10月11日；录用日期：2026年11月4日；发布日期：2026年11月17日

摘　要

在人口老龄化与数字化转型同步推进的背景下，银发经济与数字经济的协同发展已成为扩大内需、优化养老服务供给和培育新增长动能的重要议题。本文基于2015~2024年中国省级面板数据，从产业规模、基础设施、应用水平和创新环境四个维度构建综合评价体系，采用熵值法确定权重，并运用耦合协调度模型测度两大系统的协同水平。在此基础上，利用空间杜宾模型考察数字基础设施、养老政策支持等因素与协同水平的空间关联，并结合LightGBM和SHAP方法开展短期预测与特征解释。结果表明，2015~2024年全国平均耦合协调度由0.32提高至0.56，整体由失调向协调演进，但区域差异仍较明显，呈现东部较高、中西部较低的梯度格局。数字基础设施估计系数为0.23，养老政策强度为0.15，数字基础设施空间滞后项为0.11，空间自回归系数为0.34且在1%水平上显著，说明协同发展具有明显的空间依赖与外溢特征。LightGBM模型的RMSE、MAE和R^2分别为0.048、0.036和0.892，样本省份短期预测总体上升，数字康养平台、智能穿戴、智慧医疗和远程诊疗等变量具有较高解释贡献。研究表明，提升两大系统的协同水平，需要同步强化数字基础设施和适老化服务建设，完善区域协同机制，提升老年群体数字包容水平，并加强跨部门数据治理。

关键词

银发经济，数字经济，耦合协调度，空间杜宾模型，LightGBM，SHAP

Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanisms of the Coordinated Development of the Silver Economy and Digital Economy

—An Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data from 2015 to 2024

文章引用: 张福原. 银发经济与数字经济协同发展的时空演化与驱动机制[J]. 应用数学进展, 2026, 15(11): 139-151.
DOI: 10.12677/aam.2026.1511438

Fuyuan Zhang

School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: October 11, 2026; accepted: November 4, 2026; published: November 17, 2026

Abstract

Against the backdrop of concurrent population aging and digital transformation, the synergistic development of the "silver economy" and the digital economy has emerged as a key issue for expanding domestic demand, optimizing the provision of elderly care services, and fostering new drivers of economic growth. Based on provincial panel data from China for the period 2015~2024, this study constructs a comprehensive evaluation system across four dimensions: industrial scale, infrastructure, application level, and innovation environment. Indicator weights are determined using the entropy weighting method, and a coupling coordination degree model is employed to measure the level of coordination between the two systems. On this basis, a Spatial Durbin Model is used to examine the spatial associations between coordination and such factors as digital infrastructure and elderly-care policy support. LightGBM and SHAP are further introduced for short-term forecasting and feature interpretation. The results show that the national average coupling coordination degree increased from 0.32 in 2015 to 0.56 in 2024, indicating an overall transition from disorder toward coordination. Nevertheless, substantial regional disparities remain, with a clear gradient pattern characterized by higher coordination in eastern China and lower coordination in central and western China. The estimated coefficients of digital infrastructure, elderly-care policy intensity, and the spatial lag of digital infrastructure are 0.23, 0.15, and 0.11, respectively. The spatial autoregressive coefficient is 0.34 and is statistically significant at the 1% level, indicating pronounced spatial dependence and spillover effects in the coordinated development of the two systems. The LightGBM model achieves an RMSE of 0.048, an MAE of 0.036, and an R^2 of 0.892. Short-term forecasts for the sampled provinces generally indicate an upward trend, while variables related to digital elderly-care platforms, smart wearable devices, smart healthcare, and telemedicine exhibit relatively high explanatory contributions. The findings suggest that improving the coordination between the silver economy and the digital economy requires strengthening digital infrastructure and age-friendly service provision in a coordinated manner, improving regional coordination mechanisms, enhancing digital inclusion among older adults, and reinforcing cross-departmental data governance.

Keywords

Silver Economy, Digital Economy, Coupling Coordination Degree, Spatial Durbin Model, LightGBM, SHAP

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

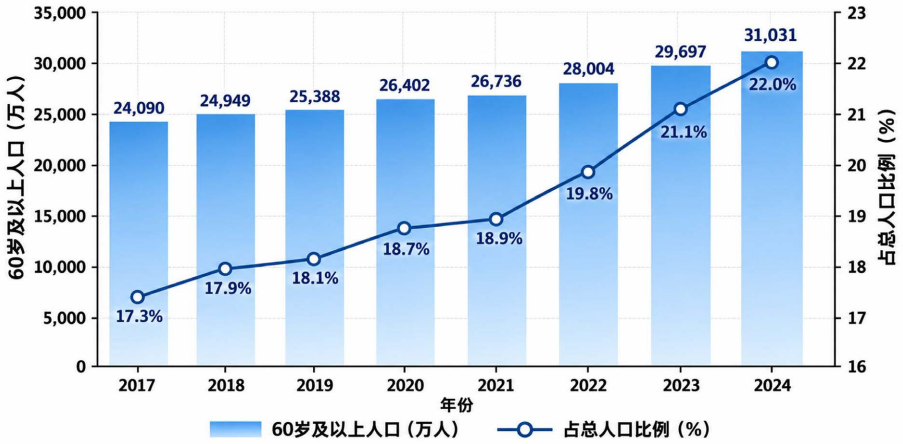
1. 引言

1.1. 研究背景与问题提出

人口老龄化与数字化转型正在同步重塑中国经济社会发展的需求结构与供给方式。国家统计局数据显示，2024 年末我国 60 周岁及以上人口达到 3.1031 亿人，占总人口的 22.0%，其中 65 周岁及以上人口

为 2.2023 亿人，占 15.6% [1]。国务院办公厅于 2024 年印发《关于发展银发经济增进老年人福祉的意见》，将银发经济界定为向老年人提供产品或服务以及为老龄阶段做准备等一系列经济活动的总和，并提出推动银发经济规模化、标准化、集群化和品牌化发展[2]。由此可见，银发经济已由传统养老服务的延伸逐步发展为兼具民生保障、消费升级和产业创新属性的综合性经济形态。

与此同时，数字经济已成为提升资源配置效率和培育新业态的重要力量。中国信息通信研究院测算显示，2023 年我国数字经济规模达到 53.9 万亿元，数字技术对生产、流通、消费和公共服务的渗透持续深化[3]。数字技术能够降低信息搜寻、交易、复制、运输和验证等多类经济成本，并通过网络基础设施、平台服务、大数据和人工智能等方式重塑传统产业的组织逻辑。对于银发经济而言，数字化既拓展了远程医疗、智慧养老、智能穿戴和在线消费等应用场景，也有助于改善供需匹配效率，提升养老服务的可及性、及时性与精准性[4] (见图 1)。



注：根据国家统计局相关年度统计公报整理。

Figure 1. Population size and proportion aged 60 and above in China, 2017~2024
图 1. 2017~2024 年中国 60 岁及以上人口规模及占比

人口结构变化持续释放健康、养老、康复、文旅、金融和适老化产品等领域需求，数字基础设施和智能服务的普及则不断拓展银发产业的供给边界，为银发经济与数字经济形成更深层次的产业联动提供现实基础。

需要注意的是，数字经济的发展并不会自然转化为银发经济的发展红利。老年群体在终端使用能力、数字技能、风险识别和网络可及性方面存在明显差异，数字鸿沟可能削弱技术进步的普惠效应。已有研究发现，数字经济能够通过提高支付便利度、降低信息搜寻成本和增强社会互动促进老年群体消费升级，但不同地区、不同人力资本和数字素养群体之间的数字红利存在显著异质性。因此，仅分别考察银发经济或数字经济难以充分解释二者共同演进的区域差异，有必要在统一评价框架下测度协同发展水平，并进一步识别其空间关联特征与关键驱动因素[5]-[7]。

1.2. 文献综述

关于银发经济的研究，相关文献主要围绕人口结构变化、产业机会与社会创新展开。OECD 将人口结构转变视为推动社会创新、组织创新和技术创新的重要契机，强调通过制度改革释放长寿经济潜力[8]。欧盟委员会从市场规模、技术创新、健康服务和社会包容等维度系统讨论银发经济的发展空间[9]。国内政策研究则更加重视银发经济的民生属性与产业属性，强调通过产品创新、养老服务扩容、智慧健康养

老和适老化改造培育新的经济增长点。

数字经济研究已经形成较为系统的理论与实证框架。Goldfarb 和 Tucker 从经济成本视角指出，数字技术通过降低搜索、复制、运输、追踪和验证成本改变经济活动的组织方式[10]。国内研究更多关注数字经济对高质量发展的作用机制。赵涛等发现，数字经济能够通过提高创业活跃度促进城市高质量发展，并表现出空间溢出特征。郭峰等通过编制数字普惠金融指数，揭示了数字金融发展的空间集聚性与区域异质性。这些研究为分析数字化对区域经济发展和居民福利的影响提供了重要理论基础。

在老龄化与数字化交叉领域，研究重点逐渐由数字鸿沟转向数字包容与数字红利。He 等利用中国互联网 + 指数与 CHARLS 数据发现，数字经济能够促进老年群体消费升级，但数字红利在城市规模、人力资本和数字素养等维度上存在明显差异[11]。这一结论表明，数字化对银发经济的促进作用具有条件性，基础设施、数字技能和公共服务供给共同影响老年群体分享数字化收益的程度。

现有研究为分析银发经济与数字经济协同发展提供了较为扎实的理论基础。银发经济具有跨产业、跨部门和强政策关联特征，数字经济能够通过基础设施、平台、数据和创新机制改善资源配置效率，数字化影响又具有明显的空间异质性与群体异质性。与此同时，已有研究仍较少在统一框架下同时测度银发经济与数字经济的协同水平，对省域协同发展的空间依赖和外溢特征关注不足，传统线性计量方法对复杂非线性关系的刻画也相对有限。基于此，本文将耦合协调度、空间杜宾模型与 LightGBM 解释框架结合起来，从协同水平测度、空间驱动机制和短期趋势预测三个层面展开分析。

1.3. 研究贡献

本文的研究价值主要体现在评价框架、空间机制识别和非线性解释的有机衔接。研究在统一维度下构建银发经济与数字经济综合评价体系，使综合评价、耦合协调测度与驱动因素分析保持清晰的逻辑边界。在空间分析中，将本地解释变量与空间滞后变量纳入同一模型，避免把回归系数简单等同于百分比贡献，并据此识别区域协同的空间依赖特征。在预测分析中，引入 LightGBM 刻画变量之间可能存在的非线性关系，并通过 SHAP 增强模型可解释性，从而为识别不同地区的差异化驱动因素提供补充证据。

2. 理论机制与分析框架

银发经济与数字经济并非彼此独立的经济系统。银发经济以老年群体及其延伸需求为基础，数字经济则通过信息技术、网络平台、数据要素和智能算法改变供给方式、交易方式与服务边界。两大系统在基础设施连接、数字包容、产业创新和空间扩散等方面持续发生作用，由此形成相互促进、相互约束的协同关系。

5G、宽带网络、云计算平台和智能终端是数字服务进入养老、医疗、康复和社区场景的重要基础。数字基础设施能够降低信息传递成本和服务半径约束，使线上问诊、远程健康监测和智慧养老平台等服务突破传统地理边界。网络覆盖和数字设施越完善，银发产业的数字化供给能力越强，数字经济向养老服务和老年消费场景渗透的条件也越充分。

老年群体的数字接入能力与数字技能决定了数字产品能否有效转化为真实消费和福利改善。数字支付、线上购物、网络社交和健康信息获取能够降低交易成本并拓展服务选择，但数字技能不足、界面不友好和风险感知偏高也可能形成新的使用障碍。银发经济与数字经济的协同发展不仅取决于数字技术供给，还取决于技术能否被老年群体获得、理解并持续使用。

人工智能、大数据和物联网能够提高健康风险识别、需求预测和资源调度能力，并推动养老、医疗、保险和消费服务向智能化、平台化方向升级。数字技术的持续渗透使银发经济由传统养老服务逐步延伸至智能穿戴、远程医疗、数字文娱、养老金融和适老化终端等多元场景，进而拓展产业边界并形成新的增长空间。

数字基础设施、平台服务和政策试点具有较强的网络效应与示范效应。一个地区数字化能力的提升，可能通过跨区域平台服务、产业链协作、技术扩散和政策模仿影响周边地区，使银发经济与数字经济的协同水平表现出空间相关性。空间计量方法能够同时考察本地因素和空间滞后因素，为解释省域协同发展的区域差异提供更具针对性的实证框架。

3. 研究设计

3.1. 数据来源与处理

本文使用 2015~2024 年中国省级面板数据，主要数据来源包括《中国统计年鉴》[1]、国家统计局公开统计数据及民政部[2]、工业和信息化部、国家卫生健康委等部门发布的统计资料，并参考中国信息通信研究院数字经济相关报告、中国互联网络信息中心(CNNIC)发布的互联网发展统计报告及中国健康与养老追踪调查(CHARLS)等公开调查数据。2024 年老年人口抚养比、企业电子商务销售额、企业电子商务采购额和国内三种专利授权量均取自《中国统计年鉴 2025》[3]相应分省表，为当年实际统计值。为提高跨地区和跨年份数据的可比性，本文统一指标名称、统计单位与统计口径，对异常值和缺失值进行清洗，对负向指标进行同向化处理，并采用极差标准化消除量纲影响。对于正向指标，标准化形式为

$$z_{ijt}=\frac{x_{ijt}-\min\left(x_j\right)}{\max\left(x_j\right)-\min\left(x_j\right)} \tag{1}$$

其中，x_{ijt} 表示地区 i 在年份 t 的第 j 项原始指标，z_{ijt} 为标准化结果。对于负向指标，先进行方向转换，再进入统一标准化流程，以保证各指标作用方向一致。

3.2. 评价指标体系构建与熵值赋权

3.2.1. 指标体系构建依据与筛选流程

本文以产业规模、基础设施、应用水平和创新环境作为一级维度，下设银发经济规模、数字经济规模、数字基础设施、养老设施、数字应用、服务效能、科技投入和政策支持 8 类核心二级指标。指标设置兼顾数据可得性、跨地区可比性与研究主题的一致性，并以能够稳定识别和复核的代表性三级指标为基础进行综合评价，具体指标及权重见表 1。

Table 1. Core evaluation indicators for coordinated development of the silver and digital economies
表 1. 银发经济与数字经济协同发展核心评价指标

一级维度	二级指标	代表性三级指标	综合权重
产业规模	银发经济规模	老年人口占比、养老机构数量	0.18
产业规模	数字经济规模	数字经济增加值、电商交易额	0.15
基础设施	数字基础设施	5G 基站密度、宽带普及率	0.22
基础设施	养老设施	每千名老人床位数、社区养老中心覆盖率	0.12
应用水平	数字应用	老年人互联网使用率、智能设备渗透率	0.16
应用水平	服务效能	远程医疗覆盖率、在线公共服务使用率	0.09
创新环境	科技投入	R&D 经费占比、专利授权量	0.05
创新环境	政策支持	银发经济专项政策数	0.03

注：政策支持指标以省级政府及省级民政、发展改革等部门当年公开发布且明确涉及银发经济、养老服务体系、智慧养老或适老化改造的专项政策文件数据构造，剔除转发与重复发布后作对数变换并进行极差标准化。

[1] https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
[2] https://www.mca.gov.cn/n156/index.html
[3] https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm

指标体系沿循需求基础、供给能力、数字连接、应用转化、创新支撑与政策环境的作用链条构建。人口老龄化形成银发需求基础，养老与数字基础设施决定服务供给边界，数字应用反映技术向养老和消费场景的转化程度，科技投入与政策环境则提供持续创新与制度保障。候选指标优先从统计年鉴和部门公开资料中筛选，并依次检验统计口径一致性、跨地区可比性、缺失情况和信息冗余，剔除难以连续获取、跨省口径明显不一致或与同层指标高度重复的变量后形成最终指标体系。

3.2.2. 熵值赋权与综合指数测算

为降低主观判断对权重结果的影响，本文采用熵值法确定指标权重。熵值法属于客观赋权方法，其基本思路是利用指标在样本中的离散程度衡量信息贡献，某一指标在地区间或年份间的取值差异越大，所携带的信息量越多，对应权重也越高，反之则越低。相较于专家打分等主观赋权方式，熵值法能够减少人为判断对结果的影响，使权重更多由数据本身的分布特征决定，从而提高综合评价的可比性与可重复性。设第 j 项指标在样本中的比重为

$$p_{ijt} = \frac{z_{ijt}}{\sum_{i,t} z_{ijt}} \tag{2}$$

第 j 项指标的熵值为

$$e_j = -k \sum_{i,t} p_{ijt} \ln p_{ijt} \tag{3}$$

$$k = \frac{1}{\ln N} \tag{4}$$

其中，N 表示有效观测数。根据熵值进一步计算差异系数，并据此得到各指标的最终权重。差异系数越大，表明该指标在样本中的取值差异越明显，对综合评价的区分作用越强，因而对应权重也越高。

$$g_j = 1 - e_j \tag{5}$$

指标权重为

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^{m} g_j} \tag{6}$$

在此基础上，分别测算银发经济与数字经济两个子系统的综合发展指数

$$E_{it} = \sum_{j \in J_E} w_j z_{ijt} \tag{7}$$

$$D_{it} = \sum_{j \in J_D} w_j z_{ijt} \tag{8}$$

其中，E_{it} 与 D_{it} 分别表示地区 i 在年份 t 的银发经济与数字经济综合发展指数，J_E 与 J_D 分别对应两个子系统的指标集合。

3.3. 耦合协调度模型

耦合度用于刻画银发经济与数字经济两个子系统之间相互作用的紧密程度。为保证指标取值区间与后续协调度测算具有一致的数学含义，本文采用取值范围为 0 到 1 的两系统耦合度标准化表达式。该表达式能够反映两个子系统在发展水平上的匹配程度，当二者数值较为接近且均处于较高水平时，耦合度

相应较高，当二者差距较大时，耦合度则趋于下降。

$$C_{it}=\frac{2\sqrt{E_{it}D_{it}}}{E_{it}+D_{it}} \tag{9}$$

综合发展指数为

$$T_{it}=\alpha E_{it}+\beta D_{it} \tag{10}$$

进一步将耦合度与综合发展指数结合得到耦合协调度，基准情景取 $\alpha=0.6$、$\beta=0.4$，并设置 $\alpha=\beta=0.5$ 与 $\alpha=0.4$、$\beta=0.6$ 两组敏感性情景，以检验权重设定对协调度结果的影响。

$$\mathrm{CCD}_{it}=\sqrt{C_{it}T_{it}} \tag{11}$$

耦合协调度越接近 1，表明两大系统的协同程度越高。本文参照协调发展度研究中的常用分级方法，将 0.30 以下划分为中度及以上失调，0.30 到 0.40 划分为轻度失调，0.40 到 0.50 划分为濒临失调，0.50 到 0.60 划分为勉强协调，0.60 到 0.70 划分为初级协调，0.70 到 0.80 划分为中级协调，0.80 以上划分为良好及以上协调。统一的分级标准有助于保持不同地区与不同年份结果解释的一致性。

3.4. 空间杜宾模型

为考察本地协同水平是否受到邻近地区发展水平以及解释变量空间分布的影响，本文采用空间杜宾模型进行估计。空间杜宾模型同时纳入被解释变量的空间滞后项、解释变量及其空间滞后项，能够在控制空间自相关的基础上识别本地因素与邻近地区因素对协同水平的共同作用，相比普通面板模型更适合处理存在空间依赖的研究对象[12] [13]。

$$\mathrm{CCD}_{it}=\rho\sum_{j}w_{ij}\mathrm{CCD}_{jt}+X_{it}\beta+\sum_{j}w_{ij}X_{jt}\theta+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \tag{12}$$

空间权重矩阵 W 采用行标准化一阶 Queen 邻接矩阵。若两个省级地区共享边界则取值为 1，否则为 0，海南采用与广东最近邻修正以避免零邻接行。该矩阵用于刻画基础设施互联、平台服务扩散、产业协作和政策模仿等地理邻近渠道，并避免在基准模型中引入同期经济距离可能带来的额外内生性。

模型中 ρ 为空间自回归系数，X_{it} 为解释变量向量，$\sum_{j}w_{ij}X_{jt}$ 为空间滞后解释变量，地区效应和时间效应用于控制不可观测的区域差异与共同时间冲击。空间杜宾模型中的估计系数反映统计关联，不能直接解释为百分比贡献。

3.5. LightGBM 预测与 SHAP 解释

LightGBM 是一种基于梯度提升决策树的高效机器学习算法，能够刻画非线性关系和变量之间的复杂交互[14]。相比传统线性模型，LightGBM 在处理高维变量和非线性关系时具有更强的拟合能力，并能够通过特征重要性和 SHAP 值对变量贡献进行解释。本文沿用现有模型参数设置，学习率为 0.1，最大树深度为 6，迭代次数为 500，叶节点数为 31，特征抽样比例为 0.9，样本抽样比例为 0.8，目标函数采用回归任务。模型性能采用 RMSE、MAE 和 R^2 进行评价。

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2} \tag{13}$$

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|y_i-\hat{y}_i\right| \tag{14}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{15}$$

为增强模型解释能力，本文采用 SHAP 方法衡量不同特征对预测结果的边际影响。SHAP 方法基于合作博弈论中的 Shapley 值思想，将模型预测结果分解为各特征贡献的加总，从而在保持模型预测精度的同时提供具有一致性的特征解释[15]。考虑到现有结果能够支持的预测区间主要覆盖 2025 到 2026 年，本文将机器学习部分定位为短期趋势识别，不对更长时期作确定性外推。

4. 实证结果与分析

4.1. 协同水平的时空演化

耦合协调度测算结果显示，2015 到 2024 年全国平均协调度由 0.32 提高至 0.56，银发经济与数字经济的关系由失调区间逐步进入勉强协调区间，说明两大系统在样本期内的联动有所增强。协调度持续上升表明，数字基础设施完善、智慧养老服务扩展和数字应用场景增加正在强化两大系统之间的相互作用，但全国整体协调水平仍处于由低水平向更高水平过渡的阶段，尚未进入稳定协调状态。

从空间分布看，东部地区协调度整体较高，部分中西部地区仍处于失调或低水平协调区间。表 2 列示了具有代表性的高位与低位省份。按照本文统一的分级标准，北京和上海处于中级协调区间，浙江处于初级协调区间，甘肃、宁夏和青海仍处于轻度失调区间。区域梯度特征表明，银发经济与数字经济协同发展具有较明显的空间不均衡性，高位省份多具备较强的数字经济基础和较完善的养老服务市场，低位省份则普遍受制于数字基础设施薄弱与养老产业规模有限。

Table 2. Coupling coordination degree of selected areas in 2024
表 2. 2024 年部分地区银发经济与数字经济协调度

地区	协调度	协调状态
北京	0.78	中级协调
上海	0.75	中级协调
浙江	0.68	初级协调
甘肃	0.39	轻度失调
宁夏	0.36	轻度失调
青海	0.33	轻度失调

这一空间格局与区域数字基础设施、经济发展水平、养老服务供给能力和创新资源禀赋具有较高一致性。东部地区在网络基础设施、平台企业、医疗资源和研发投入等方面具备较强基础，数字技术更容易转化为面向老年群体的产品和服务。部分中西部地区则同时面临数字基础设施相对薄弱、服务供给半径较大和适老化应用渗透不足等约束。由此可见，提高协同水平不能依赖单一产业规模扩张，而应同步改善技术条件、公共服务能力与老年群体的数字可及性。

4.2. 权重敏感性与空间稳健性检验

本文进一步开展多情景权重敏感性检验。选取四项核心代理序列，按同一标准化与熵值流程重构代理协同指数，并在三组 α、β 情景下重新计算。以 $\alpha = 0.6$、$\beta = 0.4$ 为基准，$\alpha = \beta = 0.5$ 和 $\alpha = 0.4$、$\beta = 0.6$

两种情景与基准情景的全样本 Spearman 秩相关系数分别为 0.9979 和 0.9930，三种情景下全国均值均由 2015 年的 0.2813~0.3210 提高至 2024 年的 0.4723~0.5282，且 2024 年东部均值始终高于中部、西部和东北，说明核心时序趋势与区域梯度不依赖单一权重组合。

在此基础上进一步进行固定效应空间模型复核。Wald-SAR = 48.705、Wald-SEM = 48.800，LR-SAR = 50.240、LR-SEM = 49.583，四项检验均 $p < 0.001$，因此拒绝将 SDM 简化为 SAR 或 SEM，这一结果与主模型采用 SDM 的设定方向一致。

针对内生性问题，本文进一步开展空间工具变量稳健性检验。采用空间二阶段最小二乘法，以 W^2X 和 W^3X 作为空间滞后因变量的排除型工具变量。第一阶段排除工具变量联合 $F = 26.17$，$p < 0.001$，IV 估计的空间滞后系数 $\rho = 0.636$，标准误 0.138，$p < 0.001$，空间相关方向保持为正。该检验作为对主模型空间设定与方向稳定性的补充证据，不替代主模型系数本身。

4.3. 空间杜宾模型结果

空间杜宾模型核心估计结果见表 3。数字基础设施系数为 0.23，P 值为 0.002，政策支持指数系数为 0.15，P 值为 0.018，二者均表现出显著正向关联。数字基础设施空间滞后项系数为 0.11，P 值为 0.042，说明一个地区数字基础设施改善与周边地区协同水平提升之间存在显著空间关联。老年教育水平系数为 0.09，P 值为 0.112，在 5%显著性水平下未通过检验。上述结果表明，数字基础设施与政策支持是影响本地协同水平的重要正向因素，数字基础设施还表现出跨区域外溢关联。

Table 3. Core estimation results of the Spatial Durbin Model
表 3. 空间杜宾模型核心估计结果

变量	估计系数	P 值	统计判断
数字基础设施	0.23	0.002	显著正向
政策支持指数	0.15	0.018	显著正向
数字基础设施空间滞后项	0.11	0.042	显著空间关联
老年教育水平	0.09	0.112	不显著
空间自回归系数 ρ	0.34	<0.010	显著空间依赖

空间自回归系数 ρ 在 1%水平上显著，表明银发经济与数字经济协同发展存在明显空间依赖。区域协同水平不仅与本地经济和技术条件有关，还可能受到数字基础设施互联、平台服务扩散、产业链合作和政策示范等跨区域因素影响。因而，加强跨区域基础设施互联、数据标准协同和公共服务共享，更有利于释放空间外溢效应。

4.4. LightGBM 短期预测结果

LightGBM 模型的 RMSE 为 0.048，MAE 为 0.036，R^2 为 0.892，表明模型在现有样本上具有较好的拟合与预测表现。考虑到不同计算口径下 2024 年基准值与耦合协调度结果不宜直接混用，本文仅报告 2025~2026 年的短期预测值及验证误差(见表 4)。

预测结果显示，7 个样本省份在 2025~2026 年均呈上升趋势，但不同地区的初始条件和改善空间存在差异。浙江、江苏和广东的预测值相对较高，湖北、四川、辽宁和云南则表现出较大的追赶空间。该结果用于识别短期变化方向，不应解释为政策实施后的确定性增长率(见图 2)。

Table 4. Short-term LightGBM forecasts of coordination degree
表 4. LightGBM 协调度短期预测结果

省份	2025 预测值	2026 预测值	误差率(±%)	关键特征及 SHAP 值
浙江	0.902	0.928	1.80	数字康养平台覆盖率(0.142)
江苏	0.886	0.913	2.10	银发直播电商渗透率(0.136)
广东	0.869	0.894	2.40	智能穿戴设备使用率(0.129)
湖北	0.798	0.832	3.20	社区智慧医疗覆盖率(0.118)
四川	0.784	0.817	3.50	适老化 APP 活跃度(0.112)
辽宁	0.713	0.746	4.70	养老机构数字化率(0.103)
云南	0.672	0.703	5.30	远程诊疗接入率(0.097)

由表 4 可知，2025~2026 年七个样本省份的耦合协调度预测值均呈上升趋势，其中浙江、江苏和广东的预测水平相对较高，2026 年预测值分别达到 0.928、0.913 和 0.894。湖北、四川、辽宁和云南的预测值也有所提高，反映出不同地区在数字基础设施、智慧养老服务和数字化应用方面仍具有一定的发展空间。从模型解释结果看，各省份对应的关键特征存在差异，说明协同水平的短期变化并非由单一因素主导。为进一步展示不同特征对模型预测结果的影响，图 2 给出了代表性关键变量的 SHAP 值。

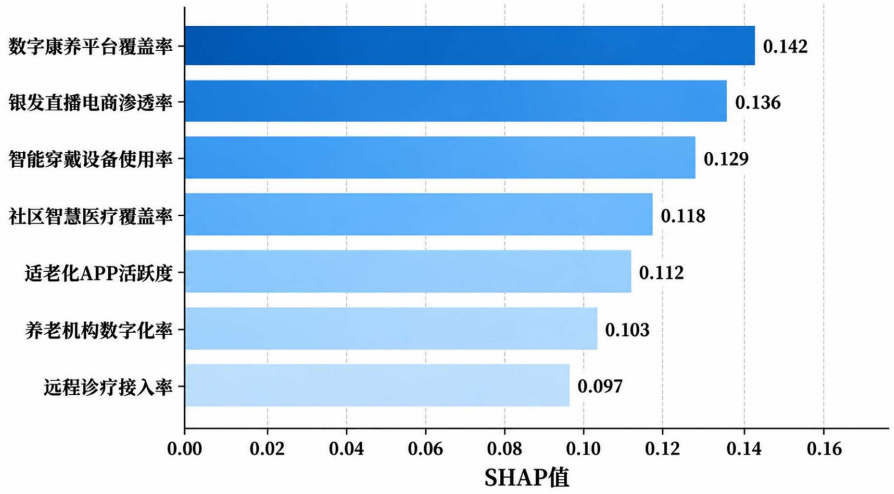


Figure 2. Representative SHAP values of key variables in LightGBM forecasting
图 2. LightGBM 预测中代表性关键变量的 SHAP 值

SHAP 结果显示，数字康养平台覆盖率、银发直播电商渗透率、智能穿戴设备使用率、社区智慧医疗覆盖率、适老化 APP 活跃度、养老机构数字化率和远程诊疗接入率均具有较高解释贡献。代表性特征的 SHAP 值介于 0.097~0.142 之间，说明这些变量对模型预测具有不同程度的边际影响。由于 SHAP 值反映的是特征对具体模型输出的贡献，其大小应结合样本分布和模型结构进行解释，不宜简单设定统一阈值。

从区域差异看，东部地区的关键因素更多体现为数字平台和新型消费场景，中西部地区及部分老工业基地省份的改善空间则更多与养老机构数字化、社区智慧医疗和远程诊疗等基础型服务相关。不同地区的关键特征结构并不完全一致，说明数字经济赋能银发经济具有明显的区域异质性。协调水平较高地区应更加重视技术应用质量和产业创新效率，协调水平较低地区则需要优先补齐基础设施与公共服务短板。

5. 研究结论与政策启示

5.1. 研究结论

研究结果表明，2015~2024 年银发经济与数字经济的协同水平持续改善，全国平均耦合协调度由 0.32 提高至 0.56，两大系统由失调状态逐步进入勉强协调阶段。区域差异仍然明显，东部地区在数字基础设施、产业基础和创新资源方面具有相对优势，协同水平总体较高，部分中西部地区仍受到数字基础设施和养老服务供给能力不足等因素约束。整体来看，协同水平提升与区域差距并存，是样本期内银发经济与数字经济互动关系的基本特征。

空间计量结果显示，数字基础设施和政策支持指数与协同水平之间存在显著正向关联，数字基础设施空间滞后项同样达到统计显著水平，空间自回归系数显著为正。由此可见，协同发展具有较强的区域关联特征，数字基础设施既是本地银发产业数字化的重要支撑，也可能通过平台服务扩散、技术传播和产业协作影响周边地区。权重敏感性、Wald/LR 模型选择检验及空间 IV 复核进一步表明，主要时序趋势、区域梯度和正向空间依赖方向具有较好的稳健性。

机器学习结果进一步揭示了驱动因素的区域差异。LightGBM 模型在现有样本上的 RMSE、MAE 和 R^2 分别为 0.048、0.036 和 0.892，短期预测显示多数样本省份协调度仍具有上升空间。SHAP 解释结果表明，数字康养平台、智能穿戴、智慧医疗、适老化应用和远程诊疗等变量在不同地区的重要性存在差异。

5.2. 政策启示

数字基础设施建设应与适老化公共服务提升同步推进。协调度相对较低地区需要优先改善网络覆盖、基层医疗数字化能力、社区智慧养老终端和远程诊疗接入条件。协调度较高地区则可逐步由基础设施普及转向高质量应用，推动人工智能、可穿戴设备和数据分析在健康管理、养老服务和风险预警中的规范应用。

区域政策应充分考虑空间依赖与发展基础差异。城市群、都市圈和跨省服务网络可以成为释放数字技术外溢效应的重要载体。东部地区可强化技术创新、标准输出与平台辐射，中部地区可重点提升数字技能培训和智慧医疗覆盖，西部地区需要继续补齐数字基础设施和基层服务短板，并通过跨区域数据互联和服务协作降低重复建设成本。

数字包容应纳入银发经济政策体系。数字经济促进银发经济发展的前提在于老年群体能够有效接入并持续使用数字产品和数字服务。终端设计、信息呈现、身份验证、支付流程和风险提示应进一步强化适老化原则，社区层面的数字技能支持也应持续扩大，同时保留必要的线下服务渠道。对高龄、低教育程度、农村和数字技能较弱群体，需要提供更具针对性的支持，避免数字化扩张造成新的消费和公共服务不平等。

银发经济数据治理与安全保障需要同步完善。银发经济涉及健康、养老、支付和身份等敏感数据，在推动医疗、民政、养老机构和平台企业合理共享数据的同时，应明确数据授权边界、用途限制和安全责任。通过统一基础数据标准、提高跨部门数据质量并完善隐私保护机制，可以为识别老年群体需求、优化公共资源配置和开展科学评价提供更可靠的数据基础。

5.3. 研究局限与展望

本文仍存在一定局限。现有指标体系主要基于省级宏观数据，难以充分反映老年群体在收入、教育、健康和数字技能方面的内部异质性，后续研究可进一步融合 CHARLS、CLASS 等微观调查数据开展多层次分析。本文通过多情景权重、Wald/LR 模型选择和空间 IV 稳健性检验，验证了主要结论的方向与模型

设定的合理性。未来可在获得更完整的城市级、微观和空间距离数据后，继续开展直接效应、间接效应与总效应分解，并比较不同空间权重矩阵下的结果稳定性。

参考文献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2025.

[2] 国务院办公厅关于发展银发经济增进老年人福祉的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6926088.htm, 2024-01-15.

[3] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展研究报告(2024 年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2024.

[4] 中国互联网络信息中心. 第 54 次《中国互联网络发展状况统计报告》[R]. 北京: 中国互联网络信息中心, 2024.

[5] 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.

[6] 郭峰, 王靖一, 王芳, 等. 测度中国数字普惠金融发展: 指数编制与空间特征[J]. 经济学(季刊), 2020, 19(4): 1401-1418.

[7] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177.

[8] OECD and Global Coalition on Aging (2014) The Silver Economy as a Pathway for Growth. OECD.

[9] European Commission, Oxford Economics and Technopolis Group (2018) The Silver Economy. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

[10] Goldfarb, A. and Tucker, C. (2019) Digital Economics. *Journal of Economic Literature*, **57**, 3-43. https://doi.org/10.1257/jel.20171452

[11] He, Y., Li, K. and Wang, Y. (2022) Crossing the Digital Divide: The Impact of the Digital Economy on Elderly Individuals' Consumption Upgrade in China. *Technology in Society*, **71**, Article 102141. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102141

[12] Elhorst, J.P. (2014) Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels. Springer.

[13] LeSage, J.P. and Pace, R.K. (2009) Introduction to Spatial Econometrics. CRC Press.

[14] Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. and Liu, T.Y. (2017) LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. *Proceedings of the* 31*st International Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, 4-9 December 2017, 3149-3157.

[15] Lundberg, S.M. and Lee, S.I. (2017) A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Proceedings of the* 31*st International Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, 4-9 December 2017, 4768-4777.

附　录

附录 1. 耦合协调度分级说明

协调度区间	状态
$0 \le CCD < 0.30$	中度及以上失调
$0.30 \le CCD < 0.40$	轻度失调
$0.40 \le CCD < 0.50$	濒临失调
$0.50 \le CCD < 0.60$	勉强协调
$0.60 \le CCD < 0.70$	初级协调
$0.70 \le CCD < 0.80$	中级协调
$0.80 \le CCD < 0.90$	良好协调
$0.90 \le CCD \le 1.00$	优质协调

附录 2. LightGBM 核心参数

```
boosting_type = 'gbdt'
objective = 'regression'
metric = ['l1', 'l2']
num_leaves = 31
max_depth = 6
learning_rate = 0.1
n_estimators = 500
feature_fraction = 0.9
bagging_fraction = 0.8
verbose = −1
```