

【供应链管理】

中国数智供应链发展评价研究

——基于 CRITIC-G1 法和 Bonferroni 算子

聂昀秋 马晓君 肖潇

【摘要】基于对数智供应链内涵的界定,从数字化、智能化和供应链发展水平三方面构建数智供应链评价指标体系,采用 CRITIC-G1 法和 Bonferroni 算子对省际数智供应链发展水平进行评价与排序。选取部分文献对数字经济、数字物流、智能化和高质量发展的评价结果与本文结论进行对比分析,以验证本方法的合理性。

【关键词】数智供应链;评价指标;CRITIC 赋权法;G1 法;Bonferroni 算子

【作者简介】聂昀秋(1995-),女,辽宁大连人,东北财经大学统计学院博士研究生,研究方向:数字物流、数智供应链与流通经济;马晓君(1978-),女,辽宁抚顺人,东北财经大学统计学院博士生导师,教授,国家社科基金重大项目首席专家,研究方向:数字经济与全球价值链、绿色低碳与能源环境统计、国民经济核算;肖潇(通讯作者)(1990-),女,辽宁阜新人,东北财经大学统计学院办公室副主任,科研秘书,研究方向:数字经济与绿色创新统计、国际关系、国家安全(大连 116012)。

【原文出处】《物流研究》(京),2024.2.15~28

【基金项目】国家社会科学基金重大项目(21&ZD148);全国统计科学研究重点项目(2023LZ024);辽宁省社会科学规划基金重大委托项目(L23ZD053)。

1 引言

近年来,逆全球化和地缘冲突逐渐加剧,复杂、易变的全球经济环境成为制约各国经济持续发展的主要因素。在不确定性的环境中,供应链通过数字化、智能化技术创造了新的增值机会,带动传统经济形态向数智经济转型,也提升了经济抵御冲击的能力。数智供应链的发展,其本质是响应生产、仓储、运输和交付等各流通环节高效率、低成本的现实需求,意味着其既具有数字化的特征,又具有智慧化的效能,从供给侧和需求侧同时推动了社会经济的深刻变革。因此,工业和信息化部提出,采用信息技术推动数据赋能全产业链协同转型,推进我国供应链数字化转型是未来发展的重要方向;要着力推动数字经济和产业供应链服务体系的融合发展,构建数字驱动、协同共享的数智化供应链服务体系,这从国

家战略高度为数智供应链在“十四五”时期的发展提供了强大内生动力。在此现实背景下,探讨数智供应链评价指标体系及评价方法,对促进我国供应链数智化转型、助力我国数智供应链高质量发展以及制定科学合理的数字供应链发展政策而言具有重大意义,亟须学界展开深入探究。

目前,我国关于数智供应链的研究较为匮乏,主要从空间和时间视角提出供应链生态系统的定义,探究数智化对其运营管理的赋能情况(陈剑等,2021),以及供应链生态系统分析框架(谢玉勋,2023);还有部分文献从数智化供应链角度对零售业创新发展水平(姜姝宇,2022)、市场绩效影响(张于,2023)等方面展开论述,关于数智供应链评价指标选取与体系构建的研究尚且欠缺。同时,由于统计口径与评价方法均不同,学界对于与数智供应链息息

相关的数字经济、数字物流、智能化与高质量发展等的评价也往往呈现不同结论。那么,数智供应链的评价体系应由哪些维度与指标构成?应对数智供应链评价指标采用哪些评价方法?数智供应链的发展与该地区数字经济、数字物流、智能化和高质量发展的相关性如何?本文即围绕这些问题展开研究。可能的边际贡献在于:第一,对数智供应链的内涵进行界定;第二,构建数智供应链评价指标体系,并创新性地采用CRITIC-G1法和Bonferroni算子对2020年我国省际数智供应链发展水平进行评价;第三,将本文所得结果与其他文献对我国各省份数字经济、数字物流、智能化和高质量发展的评价结果进行对比分析,对本文所用方法的客观性和合理性进行验证,并剖析数智供应链与其他各对比项在不同地区的差异,为我国未来数智供应链发展战略的制定实施提供参考。

本文结构安排如下:第二部分为理论内涵与文献回顾,通过对相关文献进行梳理总结,界定数智供应链的内涵;第三部分为评价指标选取与数据处理,详细探讨本文对数智供应链评价指标的选取依据、数据来源和标准化处理方式;第四部分为评价模型与方法,通过CRITIC-G1法和Bonferroni算子对各指标进行主客观赋权并测算出综合权重;第五部分为评价结果分析,总结并分析我国省际数智供应链发展水平综合评价价值和排序,以及该结论相比其他文献对数字经济、数字物流、智能化和高质量发展省际评价结果的异同,从而验证本文所采用评价方法的客观性、合理性以及各对比项与数智供应链发展的关联性。

2 理论内涵与文献回顾

Porter(1985)在20世纪80年代首次提出了价值链(Value Chain)一词,最初只是表示将企业各项价值活动作为一个整体进行测评。进入20世纪90年代,企业基于价值链这一概念开始着眼于商品的全流通过程,对运营管理的优化也从“点”拓展至整个生产链条,逐渐形成了供应链的概念,并延伸出了与不同属性商品相匹配的供应链矩阵理论(Fisher, 1997)。

21世纪以来,随着全球社会经济全面数字化,数字技术与智能技术是其变革的关键要素,也为供应链的学术理论和管理实践提供了强有力的技术支撑。企业将数字技术与智能技术以及前瞻性的人工智能战略相结合,改善了客户体验,提高了流通效率,甚至促进了新商业模式的诞生(Reier Forradellas et al., 2021)。因此,能够同时反映供应链数字化与智能化融合趋势的数智供应链应运而生。物理空间和数字空间的密集交织,既使供应链管理面临新的挑战,也为其创造了更多机会,使得供应链系统变得更加灵活(Weill et al., 2015)。数智化打破了供应链各环节中的行业壁垒,既加速了竞争,又为其提供了强有力的支撑,发挥着降低成本、提高灵活性和生产率等积极作用,优化了供应链效能,提高了供给侧的生产力和需求侧的竞争力。面对供应链数据量呈指数增长的态势,数智化能够全面助力数据的产生、获取、取值和分析等环节(Orenstein, 2020)。数智化从聚焦单个企业到供应链,再到面向供应链网络,不但颠覆了由制造商、供应商、批发商到零售商的传统线性垂直供应链结构,还将其演化为动态、复杂、虚实结合的供应链网络(Mišć et al., 2020)。综上所述,本文从数字化水平、智能化水平和供应链发展水平三个方面对数智供应链相关研究进行文献回顾。

2.1 数字化水平

产业数字化是新一轮技术革命的重要特征之一,而物理空间信息的数据化对数智供应链有着特殊意义。数据作为一种新型生产要素,具备“7V”特征,即Volume(规模性)、Variety(多样性)、Velocity(高速性)、Veracity(真实性)、Vitality(动态性)、Value(价值性)和Visualization(可视性),奠定了数智供应链的基础(Mayer-Schönberger et al., 2013)。数字化的价值并不仅在于数据资源本身,更多的是数据与具体常规流程相结合而产生的驱动效应(孙新波等, 2019)。根据实际需求对供应链上的数据进行收集、处理和分析,充分挖掘利用数据价值,驱动其在生产、流通、消费等环节的数字化,能够缩短全链信息传输距离,精准对接市场需求与生产要素投入,实现产销一体化

(Cappa et al., 2021)。同时,数字化可推动人、设备和系统等要素的联结,形成新的价值创造链,引导供应链应用数字信息技术将大量隐性知识显性化,压缩各环节间技术、知识交流的时空距离,并以此推动供应链的发展与进步(Erevelles et al., 2016)。在全球范围内,数字技术改变了制造业与服务业的产业供应链结构(吕斌等, 2016),并向全链各环节广泛渗透,引导传统供应链逐步向数字化、信息化转变,形成产业需求、数字产品与服务供给的良性循环(汪斌等, 2004)。同时,进一步深化了供应链供给侧的结构性改革,为供应链数智化转型注入活力。总而言之,数字技术的应用带动了供应链数字化转型,是数智供应链发展的基石。

2.2 智能化水平

供给侧的智能化发展较早。自20世纪60年代开始,工业智能机器人便让生产制造业实现了流程自动化管理。如今,智能化正在改变人类与科技的互动方式以及供应链的运作模式,从供给侧与需求侧同时推动产品个性化与服务升级。尤其是第二产业的供给侧,智能化能够从三方面对其变革产生影响。第一,形成数据信息嵌入式全周期技术开发与生产管理(Lambert et al., 2000),即运用动态数字存储器的感知和通信能力承载整个供应链周期中各必需信息,使得供应链系统实现自组织式生产,自动匹配产品供给与用户需求,提升供给侧的柔性生产能力(肖静华等, 2020);第二,实现自组织的产业生态化生产,集成所有产业主体形成跨条线、跨部门、跨地区的产业共同进化的生产体系,同时实现自组织的价值生产和产业网络竞争力的提升(Moore, 1993);第三,以智慧服务与智能技术为核心,以服务供应商、服务集成商以及受众客户为节点,通过监控、管理、分解与集成流程链接等方式从垂直结构、水平结构等维度构建从初始供应商到终端客户的复杂网络,以拓展供应链服务化网络(Thomas et al., 1996)。如何优化资源配置效率,使得正确的数据在正确的时间以正确的方式传递给人和机器,是供应链智能化的关键因素。对此,智能技术可有效支持大量工

业设备的注册管理、访问控制、数据传输等,实现设备之间的智能自组织及自治,促进机器与机器、机器与人、人与人的协同运作,从而带动全链协调运作(Liu et al., 2012)。智能化改变着产品的生产过程,并将推动供应链朝着更加一体化、智慧化的方向发展。面对消费革命,供应链的智能化转型能够调整自身结构,创造出一种新的、更具生产力的联结型运作模式(陈冬梅等, 2020)。

2.3 供应链发展水平

供应链的主要目的在于优化整体供应流程,满足客户需求,增加效益,表现形式有物流、信息流和资金流等(Gunasekaran et al., 2004)。其中,物流是供应链最直接的载体,也是供应链发展水平最直观的表现形式。物流支撑着数智供应链各环节间的交互与流通,其高效与否则直接决定了数智供应链的发展速度和质量(Chakkol et al., 2014)。与此同时,商业流通水平同样影响着供应链的数智化变革进程。随着社会经济逐步向全面数智化转变,网络媒体、搜索引擎、电子商务和移动互联网所组成的云端化商业生态链催生了云商业供应链的形成,具体表现为:第一,PC端与移动端、可穿戴设备等物理端口均可共享同一媒介资源,同时,物流、服务、信息和金融等要素高度融合,构成了集 Socialization(社交)、Location(位置)、Motion(移动端)于一体的“SoLoMo”智慧供应链平台(Zaušková et al., 2020)。第二,催生了云商业时代下独有的C2B商业模式,让消费者得以直接接触生产企业。该模式迎合了用户追求个性的需求,将原本成本高昂的私人订制变成了普通消费者可以享受的服务,将多种创意形态转化为真实的商品和服务,使得用户需求与生产信息全链流通的空间和时间成本均大大降低(Simone et al., 2023)。第三,营销智能化,即整合搜索引擎优化、插件营销、跨媒体数据源处理、客户关系管理、社交营销等市场营销与服务过程,实现客户搜索、挖掘与筛选的智能化,为需求侧的交易和服务提供客户池(Kimber et al., 2021)。物流与商业流通作为供应链的直观表现,其发展水平的提升能促进数智供应链无边界化程度

的加深,有助于打造更为通畅的经济环境,为数智服务和产品实现真正的全球化奠定基础。

通过对上述文献的梳理总结,本文认为数智供应链以数字信息为核心要素,以智能化和供应链发展水平为支撑,通过数字化、智能化技术颠覆传统供应链的单线条垂直结构,将其演变为互通、动态、多变且虚实结合的数智化流通网络,是产业转型升级、经济成本降低、社会运转效率提高的重要驱动力。同时,数字化水平、智能化水平与供应链发展水平三大领域的建设是供应链数智化转型的关键,也是数智供应链评价指标选取的重要参照。

3 评价指标选取与数据处理

3.1 指标选取

结合数据可得性,在对数智供应链内涵进行界定的基础上,将数智供应链评价指标体系分解为数字化水平、智能化水平和供应链发展水平三个维度。其中,数字化水平、智能化水平两个维度均从发展基础、发展影响两个角度衡量,供应链发展水平则从供给侧、流通侧、需求侧三方面进行衡量,相应的评价

指标体系如表1所示,本文以此对我国各省份2020年的数智供应链发展水平进行全面度量。

首先,从发展基础、发展影响角度衡量数字化水平,选择城镇数字从业人员占比(X_1)、互联网宽带接入用户数(X_2)、移动互联网接入流量(X_3)三个指标来衡量数字化基础(修文群,2002);选择人均电信业务量(X_4)、每百家企业拥有网站数(X_5)、电子商务销售额(X_6)三个指标衡量数字化影响(茶洪旺等,2016)。数字化水平指标数值越高,表明地区数字化水平越高,更利于供应链的数字化转型。

在各省份的智能化基础方面,选择上市公司人工智能业从业人数(X_7)、人工智能企业数(X_8)两个指标进行衡量;在智能化影响方面,则选择嵌入式系统软件收入(X_9)、人工智能设备账面价值(X_{10})、人工智能专利数(X_{11})三个指标进行评价。同数字化水平指标选取思路一样,由于不同省份人口基数、企业数基数均不相同,因此对 X_7 取对应原始数据与地区总人口数的比值、对 X_8 取对应原始数据与第二、第三产业法人单位总数比值作为评价数据;由于 X_9 在观测年

表1 数智供应链发展水平评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	符号	单位	属性
数字化水平	数字化基础	城镇数字从业人员占比	X_1	%	正向
		互联网宽带接入用户数	X_2	万人	正向
		移动互联网接入流量 ^①	X_3	万吉字节	正向
	数字化影响	人均电信业务量	X_4	万元	正向
		每百家企业拥有网站数	X_5	个	正向
		电子商务销售额	X_6	亿元	正向
智能化水平	智能化基础	上市公司人工智能业从业人数	X_7	万人	正向
		人工智能企业数	X_8	个	正向
	智能化影响	嵌入式系统软件收入 ^②	X_9	万元	正向
		人工智能设备账面价值 ^③	X_{10}	亿元	正向
		人工智能专利数 ^④	X_{11}	个	正向
供应链发展水平	供给侧	第二产业法人单位数	X_{12}	万个	正向
	流通侧	物流业从业人数	X_{13}	万人	正向
		货运周转量 ^⑤	X_{14}	亿吨/千米	正向
		货运量 ^⑥	X_{15}	万吨	正向
	需求侧	批发和零售业从业人数	X_{16}	万人	正向
		住宿和餐饮业法人单位数	X_{17}	个	正向
社会消费品零售总额 ^⑦		X_{18}	亿元	正向	

注:为方便计算,①、②、③、④、⑤、⑥、⑦七项指标均采用对应原始数据的对数值纳入测算过程。

份内缺失海南地区数据,因此取云南、广西、广东、福建、湖南五个临近省份对应指标的数据,并采用平均插值法对原始数据进行补充。智能化水平数值越高,表明地区智能化产业基础越雄厚,越能促进供应链的智能化发展。

此外,在供应链发展水平方面,本文结合供应链的结构特点,从供给侧、流通侧和需求侧分别选择合适的评价指标。供给侧处于整个产业链的始端,包括资源的挖掘和原材料的提取,以供应业及零部件生产业为主,具有基础性、原料性的特点,选择第二产业法人单位数(X_{12})进行衡量;流通侧对物流运输有着较强依赖性,故选择物流业从业人数(X_{13})、货运周转量(X_{14})和货运量(X_{15})三个指标衡量该省份供应链流通侧现状;需求侧处于整个产业链的终端,选择批发和零售业从业人数(X_{16})、住宿和餐饮业法人单位数(X_{17})、社会消费品零售总额(X_{18})三个指标进行评价。其中, X_{12} 、 X_{13} 、 X_{16} 取对应原始数值与该省份人口数的比值作为评价数据, X_{17} 取对应原始数值与该省份第三产业法人单位数的比值作为评价数据。供应链发展水平指标数值越高,则代表该省份供应链基础越牢靠,在供应链的数字化、智能化上越具备先发红利。

3.2 数据来源与标准化处理

本文对各省份2020年的相关数据开展研究,得到30个省份(不包括港澳台地区及西藏自治区)的均衡面板观测数据,部分指标的数据来源如表2所示。

除表2所列指标以外的其他各个指标数据均来自各省份的统计年鉴。为了方便指标之间的比较,本

文采用线性无量纲法中的阈值法对指标数据进行标准化。由于所选指标均为效益型指标,因此首先对原始数据进行0-1标准化处理,计算公式如下。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j x_{i,j}}{\max_j x_{i,j} - \min_j x_{i,j}} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第*i*个省份第*j*个指标的原始数据; y_{ij} 为 x_{ij} 经标准化处理之后的数据。

4 评价模型与方法

4.1 CRITIC 赋权法

CRITIC 赋权法是一种对各指标进行客观赋权的方法(Diakoulaki et al., 1995),其特点在于用标准差来衡量指标间的对比强度,并用指标相关性来呈现其冲突性(王建军等,2018)。近年来,CRITIC 赋权法在运筹、经济管理、图书情报等众多领域均得到了广泛应用(吴忠等,2019),本文即将该方法应用到对数智供应链发展水平的评价中,并首先以此确定数智供应链各指标的客观权重,计算公式如下。

$$\hat{w}_j = \frac{\sigma_j \sum_{k=1}^M (1 - \rho_{j,k})}{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M (1 - \rho_{j,k})} \quad (2)$$

式中: \hat{w}_j 为数智供应链评价体系中第*j*个指标的客观权重; M 为评价指标总数, σ_j 为第*j*个指标数据的标准差, $\rho_{j,k}$ 为第*j*个与第*k*个指标间的皮尔逊相关系数。将CRITIC 赋权法应用于数智供应链发展水平的评价,一方面,可以用 σ_j 衡量所选指标的相对强度以考虑各指标所含信息量;另一方面,用 $\rho_{j,k}$ 来衡量指标冲突程度以评估各指标协调性。因此,采用CRITIC 赋权法对用于评价数智供应链发展水平的各指标进行客观赋权,能够更好地引导数智供应链发展策略的构建。

表2 部分指标的数据来源说明

三级指标	符号	数据来源	发布单位
上市公司人工智能业从业人数	X_7	上市公司年报	各上市公司
人工智能企业数	X_8	《2020年中国人工智能产业白皮书》	艾媒咨询
人工智能专利数	X_{11}	依据《战略性新兴产业分类与国际专利分类参照关系表(2021)》中的人工智能专利分类号检索得到	国家知识产权局
物流业从业人数	X_{13}	《中国物流年鉴(2021)》	中国物流与采购联合会
货运周转量	X_{14}		
货运量	X_{15}		

4.2 G1法与密度算子

由于面板数据的片面性,仅采用CRITIC赋权法对指标进行客观赋权不足以描述其对被评价对象的完整影响力,而G1法可以有效弥补此不足。G1法首先根据重要度对各指标进行定性排序,再根据排序结果进行相邻指标间重要度的比较判断,最后计算各指标主观权重,是一种计算过程简洁、不需要进行一致性检验的层次分析法(张发明等,2011)。本文首先邀请15位专家学者为各指标的重要度进行评分,最终对各指标的重要度先后顺序达成了一致观点,依次为: $X_7 > X_8 > X_5 > X_2 > X_3 > X_1 > X_{10} > X_{11} > X_{12} > X_{13} > X_{18} > X_{16} > X_{17} > X_9 > X_6 > X_{15} > X_{14} > X_4$;其次,利用密度算子对决策专家给各相邻指标间的相对重要度评分进行集结,计算出指标间相对重要度综合评分;最后,将综合评分通过G1法公式进行计算得出数智供应链各评价指标的主观权重。密度算子的基本原理是利用系统聚类法进行聚类分析,将近似度较高的评价指标划分到同一类中,再利用归一化方法弱化分类中各指标间的相关性,使得类中指标集结效果更为合理,并基于评价指标疏密度确定密度权重,以真实反映客观事实。为了能够充分评估群体共识度,在此过程中引入密度算子,其详细计算步骤如下。

第一,确定子群凝聚度。首先,依据concor法对评价指标进行子群聚类(Wasserman et al., 1994);其次,计算子群内平均联系强度 e 和各子群间平均联系强度 f ;最后,确定子群凝聚度 d ,公式如下。

$$e_u = \frac{\sum_{j=1}^{m_u} \sum_{k=1, j \neq k}^{m_u} g_{j,k}^u}{m_u(m_u - 1)} \quad (3)$$

$$f_u = \frac{\sum_{j=1}^{m_u} \sum_{k=1}^{m_v} g_{j,k}}{m_u m_v} \quad (4)$$

表3 各子群凝聚度、权重与密度权重

子群	(1)	(2)	(3)	(4)
指标符号	$X_2, X_3, X_5, X_7, X_8, X_{11}, X_{13}, X_{16}$	X_1, X_4, X_6, X_{17}	X_9, X_{10}, X_{12}	X_{14}, X_{15}, X_{18}
子群凝聚度	1.4274	1.3143	1.6908	1.1150
子群权重	0.2613	0.3094	0.2419	0.2047
子群密度权重	0.8313	0.0986	0.0411	0.0700

$$d_u = e_u + f_u \quad (5)$$

式(3)~式(5)中: m_u 为第 u 个子群内的指标个数, m_v 为其余子群内的指标总数; $g_{j,k}^u$ 为 u 子群内第 j 个指标和第 k 个指标的联系数。计算结果将数智供应链评价指标分为四个子群,如表3所示。子群(1)包含 $X_2, X_3, X_5, X_7, X_8, X_{11}, X_{13}, X_{16}$ 八个指标,子群凝聚度为1.4274;子群(2)包含 X_1, X_4, X_6, X_{17} 四个指标,子群凝聚度为1.3143;子群(3)包含 X_9, X_{10}, X_{12} 三个指标,子群凝聚度为1.6908;子群(4)包含 X_{14}, X_{15}, X_{18} 三个指标,子群凝聚度为1.1150。

第二,通过对子群凝聚度 d 进行归一化处理,得到子群权重 η ,对应公式如下。

$$\eta_u = \frac{d_u}{\sum_{u=1}^r d_u} \quad (6)$$

式中: r 为聚类分析所得出的子群数量; η_u 为第 u 个子群的权重,且满足 $\eta_u \in [0, 1]$ 和 $\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \dots + \eta_r = 1$ 。

第三,将子群权重 η 和传统密度强度 θ 进行乘法归一化处理,得出密度权重 ξ 。

$$\theta_u = \frac{(m_u/M)(m_u/M)^\alpha}{\sum_{u=1}^r (m_u/M)(m_u/M)^\alpha} \quad (7)$$

$$\xi_u = \frac{\eta_u \theta_u}{\sum_{u=1}^r \eta_u \theta_u} \quad (8)$$

式(7)~式(8)中: ξ_u 为第 u 个子群的密度权重,且满足 $\xi_u \in [0, 1]$ 和 $\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \dots + \xi_r = 1$; M 为评价指标总数; α 为评价信息的疏密度,取值1.5。各子群权重与密度权重如表3所示。

第四,利用密度算子对各相邻指标间的相对重要度评分进行集结,得到指标间相对重要度综合评分,对应公式如下。

$$y_j^* = \sum_{u=1}^r \xi_u \left(\sum_{j=1}^{m_u} \hat{w}_j^{(u)} y_j^{(u)} \right) \quad (9)$$

指标间相对重要度综合评分依次为:1.460,1.640,

1.780, 1.365, 1.480, 1.097, 1.031, 1.259, 1.030, 1.360, 1.289, 1.534, 1.286, 1.003, 1.155, 1.300, 1.430, 1.570。将评分引入G1法计算公式,最终得出数智供应链各评价指标的主观权重,计算公式如下。

$$\bar{w}_j = \left(1 + \sum_{k=2}^M \prod_{j=k}^M y_j^*\right)^{-1} \quad (10)$$

$$\bar{w}_{j-1} = y_j^* \bar{w}_j \quad (11)$$

式(10)~式(11)中: \bar{w}_j 为第j个指标的主观权重;M为评价指标总数, y_j^* 为第j个指标相较于第j-1个指标的重要度评分。由于已对各指标重要度进行排序,因此j值越小,表明该指标重要度越高,各评价指标主观权重如表4所示。

4.3 乘法归一化法

数智供应链评价指标的客观权重有效表明了指标原始数据间的差别,而主观权重则充分体现了决策专家对各指标的判断。为了在兼顾以上两种权重的同时减少客观权重的随机性与主观权重的随意性,本文随即采用乘法归一化法合成各评价指标的主客观权重,得出各指标组合权重,其计算公式如下,合成后的各指标组合权重如表4所示。

表4 各评价指标的客观权重、主观权重和组合权重

指标符号	客观权重	主观权重	组合权重
X ₁	0.0401	0.0911	0.1514
X ₂	0.0632	0.1525	0.1747
X ₃	0.0486	0.1464	0.1082
X ₄	0.0424	0.0146	0.0589
X ₅	0.0895	0.1700	0.1606
X ₆	0.0396	0.0165	0.0614
X ₇	0.0555	0.2727	0.2458
X ₈	0.0674	0.2302	0.2076
X ₉	0.0460	0.0214	0.0364
X ₁₀	0.0535	0.0797	0.0747
X ₁₁	0.0612	0.0506	0.0463
X ₁₂	0.0377	0.0478	0.0607
X ₁₃	0.0743	0.0469	0.0331
X ₁₄	0.0450	0.0169	0.0649
X ₁₅	0.0561	0.0191	0.0805
X ₁₆	0.0659	0.0330	0.0583
X ₁₇	0.0472	0.0253	0.0397
X ₁₈	0.0486	0.0369	0.0294

$$w_j = \frac{\hat{w}_j \bar{w}_j}{\sum_{j=1}^M \hat{w}_j \bar{w}_j} \quad (12)$$

4.4 Bonferroni 算子

在对数智供应链发展水平进行综合评价的过程中,各指标并不是完全独立的,相互间应存在一定影响作用。Bonferroni算子的引入能够缓解其相互影响与依赖效应,使得评价结果尽量客观公正(Liang et al., 2019),计算公式如下。

$$Y_i = \left[\frac{\sum_{j,k=1, j \neq 1}^M (w_j x_{i,j})^p (w_k x_{i,k})^q}{\sum_{j,k=1, j \neq 1}^M (w_j)^p (w_k)^q} \right]^{\frac{1}{p+q}} \quad (13)$$

式中: w_k 为与第j个指标相邻的第k个指标的组权重; $p=q=1$, $x_{i,j}$ 和 $x_{i,k}$ 为相应的经过0-1标准化后的数值; Y_i 为i省份的数智供应链发展水平综合评价值。

5 评价结果分析

2020年各省份数智供应链发展水平综合评价如图1所示。其中,广东、上海、江苏和北京的数智供应链发展水平遥遥领先,同时排名首位的广东的综合评价(0.8103)是排名末位的青海的综合评价

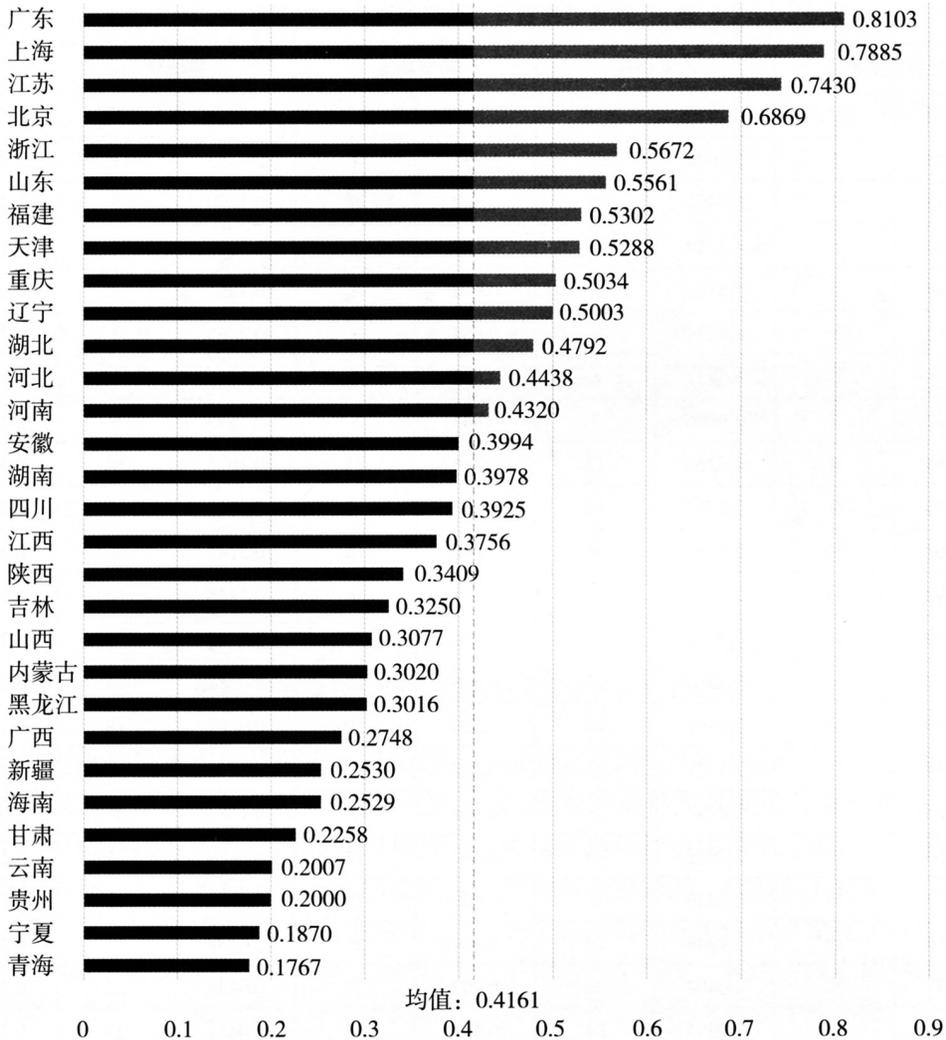


图1 2020年各省份数智供应链发展水平综合评价值

(0.1767)的4倍以上,意味着各省份数智供应链发展水平呈现两极分化态势,使得我国面临着巨大的“数智鸿沟”。

与此同时,各评价价值还在不同数值区间内呈聚集现象。各省份数智供应链发展阶段划分情况如表5

所示,共分为4个发展阶段,即数智供应链高度发达、数智供应链中度发达、数智供应链低度发达和数智供应链欠发达。其中,高度发达阶段对应的评价价值在均值的1.6倍以上,中度发达阶段对应的评价价值在均值至1.4倍均值之间,低度发达阶段对应的评价价值与均

表5 各省份数智供应链发展阶段划分情况

发展阶段	省份
数智供应链高度发达	广东(0.8103)、上海(0.7885)、江苏(0.7430)、北京(0.6869)
数智供应链中度发达	浙江(0.5672)、山东(0.5561)、福建(0.5302)、天津(0.5288)、重庆(0.5034)、辽宁(0.5003)、湖北(0.4792)、河北(0.4438)、河南(0.4320)、
数智供应链低度发达	安徽(0.3994)、湖南(0.3978)、四川(0.3925)、江西(0.3756)、陕西(0.3409)、吉林(0.3250)、山西(0.3077)、内蒙古(0.3020)、黑龙江(0.3016)、
数智供应链欠发达	广西(0.2748)、新疆(0.2530)、海南(0.2529)、甘肃(0.2258)、云南(0.2007)、贵州(0.2000)、宁夏(0.1870)、青海(0.1767)

值的差值在0.1左右,其余省份处于欠发达阶段。

表5中,有13个省份的数智供应链发展水平综合评价价值高于全国均值,其中多位于东部地区,是我国数智供应链高水平地区。然而,依然有17个省份的数智供应链发展水平低于全国平均水平,基本均位于中西部地区和东北地区,意味着数智供应链发展水平与各地区经济增长水平相符,形成了明显的“马太效应”:东部地区雄厚的经济基础为数智供应链的发展提供了先发优势,经济增长和数智供应链发展形成

了相互促进的良性循环;中西部地区薄弱的经济基础不但限制了产业数字化、智能化的进程,其相对滞后的规章制度等同样制约了数字化资本的进入。

为了验证本文评价方法的有效性与上述结论的合理性,故将本文所得评价价值分别与已有文献所得出的数字经济、数字物流、智能化和高质量发展四项与数智供应链关系密切的指标的评价价值进行对比分析,具体如表6所示。

基于表6中的评价价值整合情况,本文对数智供应

表6 数智供应链与相关指标评价结果对比

省份	数智供应链		数字经济		数字物流		智能化		高质量发展	
	评价价值	排序	评价价值	排序	评价价值	排序	评价价值	排序	评价价值	排序
广东	0.8103	1	5.6608	2	0.871	1	0.7243	1	0.3934	5
上海	0.7885	2	5.6402	3	0.588	6	0.2690	5	0.4671	2
江苏	0.7430	3	4.3510	5	0.672	2	0.5417	2	0.3787	6
北京	0.6869	4	5.8786	1	0.652	4	0.4867	3	0.5961	1
浙江	0.5672	5	4.6274	4	0.654	3	0.2365	7	0.3965	3
山东	0.5561	6	3.2821	6	0.634	5	0.2650	6	0.2738	9
福建	0.5302	7	2.9966	7	0.544	8	0.1545	9	0.2894	8
天津	0.5288	8	2.5262	12	0.385	25	0.1025	12	0.3958	4
重庆	0.5034	9	2.5767	10	0.467	17	0.0768	15	0.2629	11
辽宁	0.5003	10	2.5042	13	0.468	16	0.2744	4	0.2534	15
湖北	0.4792	11	2.4079	14	0.514	9	0.1448	10	0.2673	10
河北	0.4438	12	2.3914	15	0.501	12	0.0747	16	0.2158	22
河南	0.4320	13	2.3380	17	0.498	13	0.0884	14	0.2031	23
安徽	0.3994	14	2.3694	16	0.513	10	0.0689	18	0.2505	16
湖南	0.3978	15	2.1322	18	0.502	11	0.0950	13	0.2541	13
四川	0.3925	16	2.8192	9	0.565	7	0.1657	8	0.2451	18
江西	0.3756	17	2.0015	23	0.467	17	0.0479	21	0.2581	12
陕西	0.3409	18	2.8229	8	0.459	19	0.1352	11	0.2902	7
吉林	0.3250	19	1.8848	26	0.384	26	0.0732	17	0.2475	17
山西	0.3077	20	2.0404	20	0.402	23	0.0446	22	0.1930	26
内蒙古	0.3020	21	2.0395	21	0.444	20	0.0437	23	0.2538	14
黑龙江	0.3016	22	1.7957	29	0.408	22	0.0645	19	0.2168	21
广西	0.2748	23	1.8380	28	0.481	14	0.0516	20	0.1967	25
新疆	0.2530	24	1.7596	30	0.401	24	0.0415	26	0.1903	28
海南	0.2529	25	2.5601	11	0.359	28	0.0182	29	0.2214	20
甘肃	0.2258	26	1.8814	27	0.339	29	0.0301	27	0.1971	24
云南	0.2007	27	2.0351	22	0.472	15	0.0431	24	0.1884	29
贵州	0.2000	28	1.9701	25	0.426	21	0.0427	25	0.1906	27
宁夏	0.1870	29	2.1303	19	0.275	30	0.0183	28	0.1847	30
青海	0.1767	30	1.9902	24	0.379	27	0.0142	30	0.2449	19

注:受限于相关研究结果的可检索性,表中作为对比项的数字经济为2015-2018年各省份年平均价值;数字物流为2018年各省份耦合协调度值;智能化为2001-2016年各省份平均值;高质量发展为2020年各省份对应值。

链以及其他四个对比项进行数据可视化处理,以更直观地进行对比分析,具体如图2所示。设定2020年我国数智供应链发展水平综合评价值排名为基准轴,将各省份数字经济、数字物流、智能化和高质量发展四个对比项对应的排名数值减去其数智供应链的排名数值,所得差值采用不同趋势线加以区分,通过各趋势线的纠缠密度以及各趋势线相对于基准轴的偏离情况来呈现其他文献研究结果与本文研究结果的异同。

从图2中可以看出,广东、上海、江苏、北京、浙江、山东、福建等省份的趋势线纠缠密度显著偏高,相对于基准轴的偏离幅度较小,说明上述各省份其他对比项的评价排名与数智供应链发展水平综合评价排名相近。东部地区作为我国经济较为发达的地区,不仅在数字经济、数字物流、智能化和高质量发展4个对比项上多处于第一梯队,并且采用表1所示指标体系进行评价后,发现该地区的数智供应链发展水平依然领先,是引领我国数智供应链持续高速发展的排头兵。天津、重庆、辽宁、河北、河南、江西等省份的趋势线偏离幅度较大,且数值大多位于基准轴上方,说明这些地区的数智供应链发展水平显著高于其数字经济、数字物流、智能化和高质量

发展水平;湖南、四川、陕西、海南、云南、贵州、宁夏、青海等省份的趋势线偏离幅度较大,且数值大多位于基准轴下方,表明这些地区的数智供应链发展水平显著低于其数字经济、数字物流、智能化和高质量发展水平。对此,需要将数智供应链发展水平单独与每个对比项进行详细比较分析,从而深入探究造成上述差异的原因。

5.1 数字经济与数智供应链评价结果对比分析

在数字经济方面,刘军等(2020)从信息化发展、互联网发展和数字交易发展三个维度将数字经济这一指标进行分解。其采用线性无量纲法中的阈值法对原始数据进行标准化处理;考虑到指标分类存在明显递进关系,故参考NBI指数权重确定法对各指标进行赋权;采用线性加权法计算得出表中各省份数字经济发展水平的综合评价。各省份数字经济与数智供应链评价结果差值情况如图3所示。天津、重庆、辽宁、湖北、河北、河南、安徽、湖南、山西、内蒙古等省份的数字经济发展水平排名与各自的数智供应链发展水平排名相同或接近,差值均不超过5位;四川、江西、吉林、黑龙江、新疆等省份的差值均大于5,表明这几个省份的数字经济发展与数智供应链发展间的均衡性较差。陕西、海南两省份在两种评价体

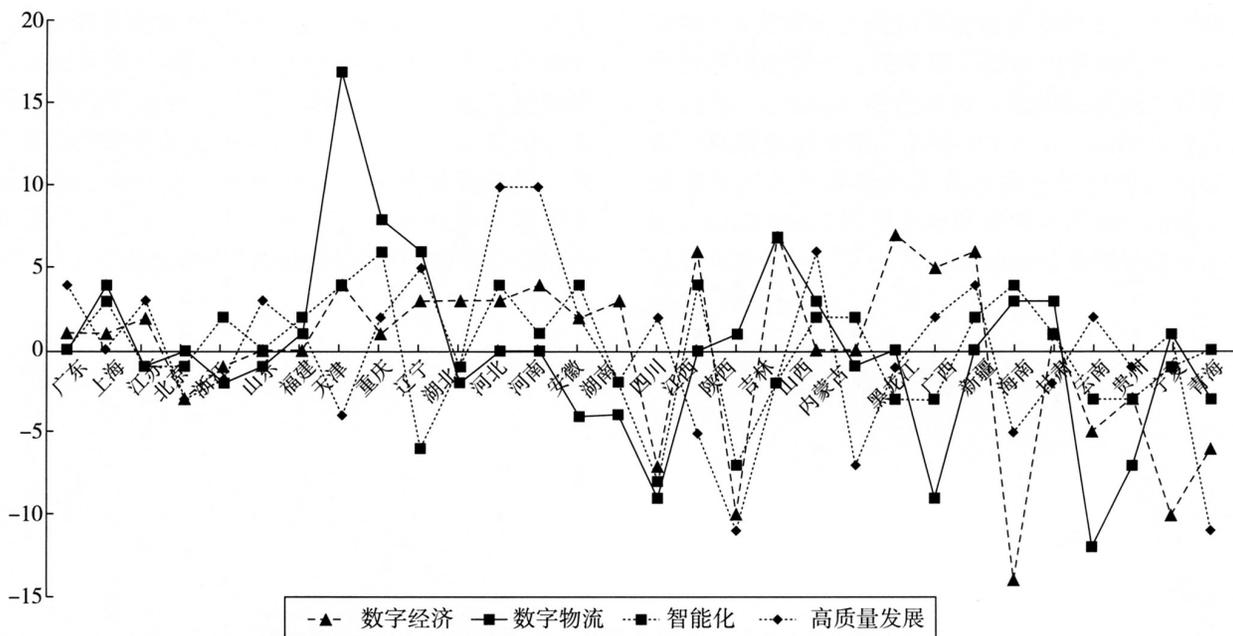


图2 各省份各对比项与数智供应链评价结果差值情况

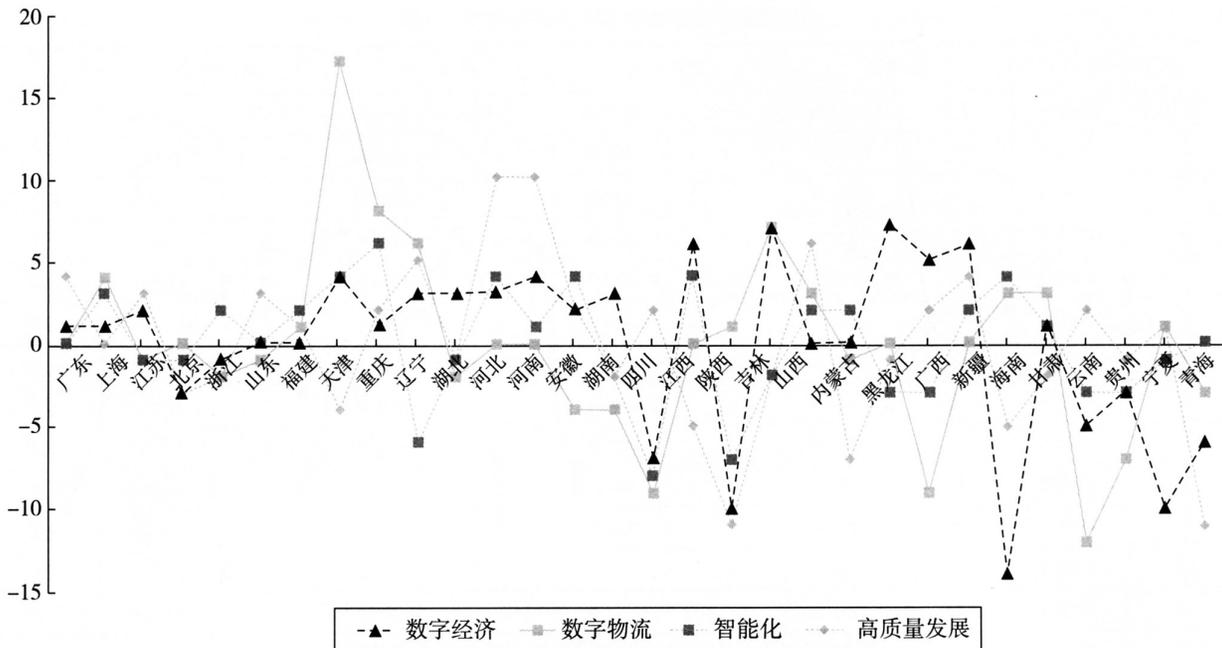


图3 各省份数字经济与数智供应链评价结果差值情况

系统中的排序分别相差10位和14位,分析其主要原因,认为在于刘军等(2020)所构建的数字经济指标评价体系仅涵盖了信息化、互联网和数字交易三个维度,其评价核心依然是互联网基础设施建设水平,指标体系多样性不强。结合本文所构建的评价体系,经查,陕西、海南两省份的人工智能设备账面价值、人工智能专利数两个指标的原始数值相对较小。由于人工智能设备账面价值、人工智能专利数均能在一定程度上反映地区的智能化发展水平,因此本文选取这两个指标对数智供应链进行评价是合理的。

5.2 数字物流与数智供应链评价结果对比分析

对于数字物流评价,李晓梅等(2022)构建了数字物流、区域经济、碳环境治理的耦合协调度指标体系;用面板数据熵权法确定各指标权重,并利用耦合协调模型计算出各地区数字物流耦合协调度指数。各省份数字物流与数智供应链评价结果差值情况如图4所示。天津的数字物流与数智供应链排名差值达到了17位;四川、广西和云南的排序差值也在10位左右。对于天津,虽然其各项指标的原始数据在30个省份中均不突出,但是考虑到天津作为直辖市,其城镇数字从业人员、电子商务销售额、人工智能企

业数、嵌入式系统软件收入、人工智能专利数等指标相对于城市基数的占比较高,且所有指标数值较为均衡,不存在某一项极低的问题,因此本文采用Bonferroni算子可以有效缓解这些指标间的相互影响和依赖。对于四川,虽然其各项指标原始数据都不低,但是由于其人口基数较大,再加上地理形态以及成都市“一城独大”的问题,使得四川数智供应链发展水平综合评价价值较低,这也符合四川省内各地区发展水平不均的现状。对于广西、云南两省份,其各项指标原始数据都处于较低水平,每百家企业拥有网站数的原始值较低,分别位居倒数第2、第3。因此,广西、云南两省份的数智供应链排名远低于数字物流,也表明采用Bonferroni算子能够让多指标信息集结的结果更为客观。

5.3 智能化与数智供应链评价结果对比分析

对于智能化发展评价,李健旋(2020)从智能技术、智能应用和智能效益三个层面构建了我国制造业智能化发展评价体系,继而用熵权法对各指标进行衡量,评价了中国制造业智能化程度和省际智能化发展水平差异。各省份智能化与数智供应链评价结果差值情况如图5所示。可以看出,该趋势线相较

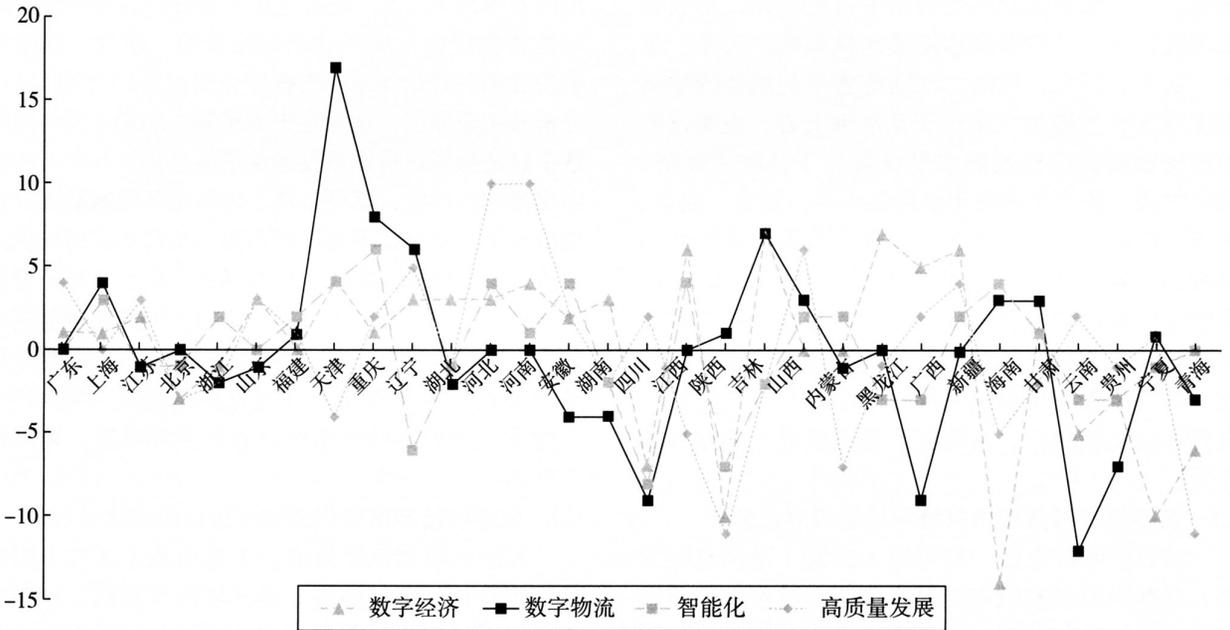


图4 各省份数字物流与数智供应链评价结果差值情况

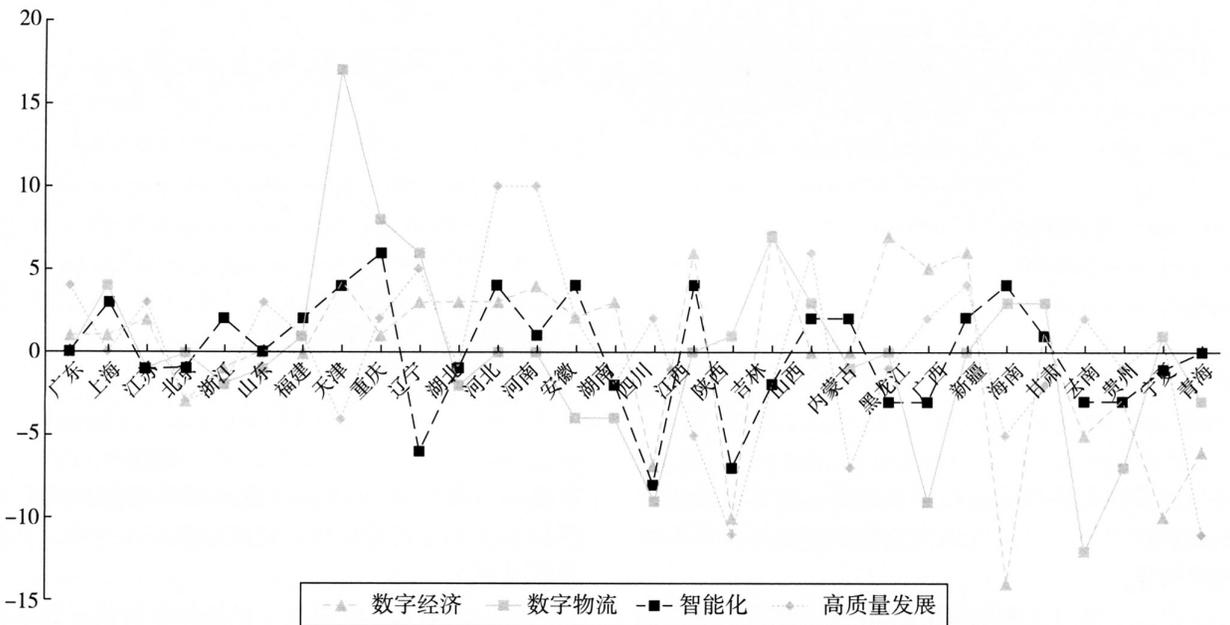


图5 各省份智能化与数智供应链评价结果差值情况

于数字物流呈现更加平缓的走势,仅有重庆、辽宁、四川、陕西四省份的排序差值大于5位,且差值最大的四川对应数值的绝对值也仅为8。本文评价方法与其的差异主要在于评价智能化所采用的熵权法仅考虑了指标的客观权重,本文则利用G1法融入15位决策专家的权威观点作为指标主观权重的依据,并结合CRITIC赋权法计算出的客观权重对各指标综

合权重进行评价。不仅如此,CRITIC-G1赋权法还能够弱化各指标间的对比强度与冲突性,从而使评价结果与采用熵权法不尽相同。例如,李健旋(2020)所选取的智能化金融发展水平指标客观权重为0.0466,本文所选的近似指标人工智能设备账面价值组合权重为0.0747,存在较大差异。尽管如此,其余各省份的排名差值均在5位以内浮动,表明数智供应

链与智能化协调度较高,且在空间上存在较强的正相关性,可认为智能化发展水平是影响数智供应链发展水平的重要因素。

5.4 高质量发展与数智供应链评价结果对比分析

对于高质量发展评价价值,牛丽娟(2023)从经济、创新、协调、绿色、开放和共享六个方向构建了我国经济高质量发展评价指标体系,采用客观熵权法中的熵值法计算出各省份的高质量发展综合指数值。各省份高质量发展与数智供应链评价结果差值情况如图6所示,其中河北、河南、陕西、青海四省份的数智供应链与高质量发展排序差值均等于或大于10位。河北与河南的高质量发展排序分别为第22位和第23位,而本文所测其数智供应链发展水平分别为第12位和13位,与牛丽娟(2023)的评价结果存在一定差异;CRITIC-G1赋权法不仅能够弱化指标间的对比性和冲突性,还能结合决策专家的权威观点对指标进行主观赋权,让两省份的数智供应链发展水平回归中游,与两省实际经济发展位次较为契合。

6 结语

基于数智供应链内涵的界定,本文从数字化、智能化和供应链发展水平三方面构建省际数智供应链评价指标体系,采用CRITIC-G1法和Bonferroni算子

对其进行评测,将各省份数智供应链发展阶段划分为数智供应链高度发达、数智供应链中度发达、数智供应链低度发达和数智供应链欠发达四个阶段。与其他方法相比,本文算法具有以下特点。

第一,该算法考虑了各指标间的对比强度、冲突性和协调性等,采用CRITIC赋权法对数智供应链评价体系中的各指标进行客观赋权,计算出各指标的客观权重值,并以此作为数智供应链评价体系的构建引导。

第二,结合了密度算子的G1主观赋权法能够充分借鉴专家群体的理论知识与实践经验。本文将15位决策专家的权威观点纳入考量,得出各指标的主观权重值,并与CRITIC赋权法得出的客观权重值进行合成,进而得到各指标的组合同权重值,避免了定量评价的片面性。

第三,Bonferroni算子的引入能够有效消除多指标信息集结时产生的相互影响与依赖,使得对省际数智供应链发展水平的综合评价与排序更加客观公正。

由于我国学界尚且少对数智供应链的评价研究,考虑到数字经济、数字物流、智能化和高质量发展与数智供应链发展水平高度相关,本文便将数智供应链评价结果分别与其他学者关于数字经济、数

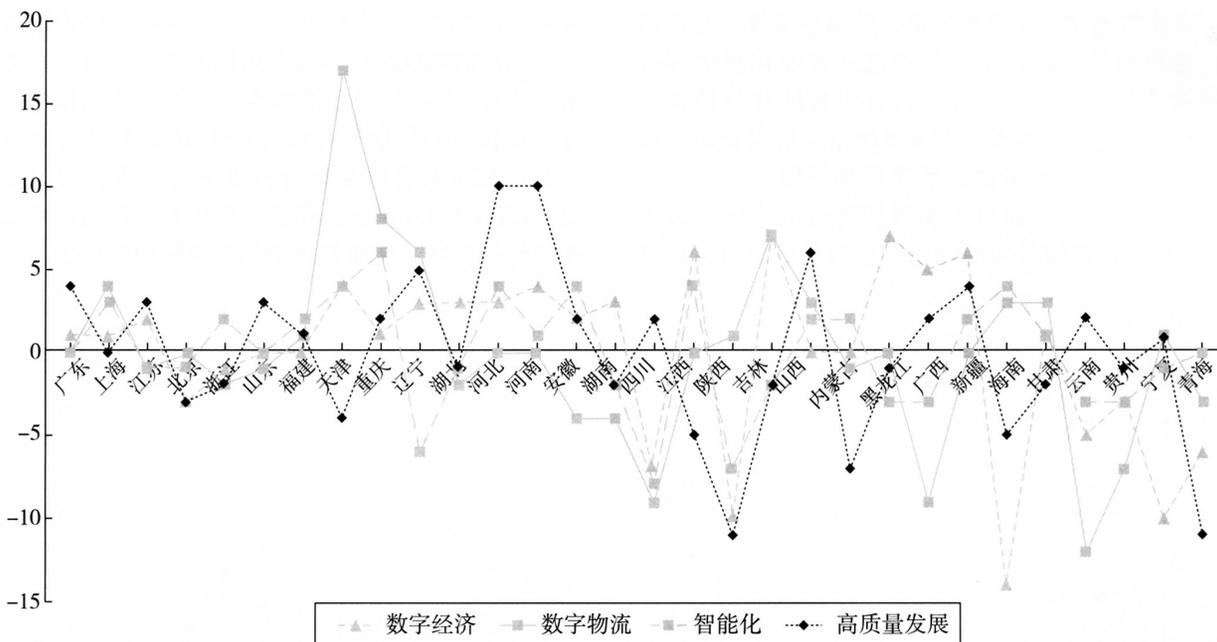


图6 各省份高质量发展与数智供应链评价结果差值情况

字物流、智能化和高质量发展四大视角的评价结果进行详细对比与分析。结果表明,东部地区在上述各视角中的评价价值多位列第一梯队,符合其经济增长水平;其他地区在智能化方面的排序与本文对数智供应链的评价结果最为近似,仅有四省份两指标的排序差值大于5位,最大也在8位以内,证明两者协调度较高,可以得出智能化水平是影响数智供应链水平的重要因素。此外,所选文献对数字经济、数字物流和高质量发展三方面的省际排序与本文对数智供应链的研究结果存在差异,分析其原因如下。

第一,相关文献对数字经济的评价指标选取仅涵盖了信息化、互联网和数字交易等维度,其评价核心依然是互联网发展水平,指标多样性不强;本文所构建的评价体系还考虑了智能化维度的信息量,由于部分指标原始数值相对较小,致使本文研究结果中陕西、海南两省份的排名落后于其在数字经济中的位次。

第二,本文部分省份的数智供应链排名与数字物流差值较大,如天津的部分指标基数较低,且各项指标数值相较于四川分布更均,数智供应链排名也更加靠前;广西、云南两省份的原始数据都处于较低水平,其数智供应链发展排名远低于数字物流,表明Bonferroni算子有效缓解了评价指标间的相互影响与依赖,让多指标信息集结的结果更为客观。

第三,本文对河北、河南、陕西、青海四省份的评价排序与相关文献关于高质量发展的结论存在差异。本文的评价结果与上述四省份各自的经济发定位次较为契合,且和其他文献对四省份在数字经济、数字物流、智能化发展三个视角的评价结论大体相符,再次验证了CRITIC-G1法对各指标进行主客观组合赋权的算法优势。

参考文献:

[1]陈剑,刘运辉.数智化使能运营管理变革:从供应链到供应链生态系统[J].管理世界,2021,37(11):227-240,14.
[2]谢玉勋.数智化技术构建供应链生态系统机制研究[J].商业经济研究,2023(20):115-118.

[3]姜姝宇.数智化供应链对零售业创新发展的影响——基于零售上市企业的经验分析[J].商业经济研究,2022(19):21-24.

[4]张于.流通企业数智化发展、供应链配置与市场绩效[J].商业经济研究,2023(20):151-154.

[5]PORTER M E. The competitive advantage: creating and sustaining superior performance[M]. New York: Free Press, 1985.

[6]FISHER M. What is the right supply chain for your product?[J]. Harvard Business Review, 1997, 75: 105-116.

[7]REIER FORRADELLAS R F, GARAY GALLASTEGUI L M. Digital transformation and artificial intelligence applied to business: legal regulations, economic impact and perspective[J]. Laws, 2021, 10(3): 1-22.

[8]WEILL P, WOERNER S L. Thriving in an increasingly digital ecosystem[J]. Sloan Management Review, 2015, 56(4): 26-34.

[9]ORENSTEIN P. The changing landscape of supply chain networks: an empirical analysis of topological structure[J]. Information Systems and Operational Research, 2020, 59(1): 53-73.

[10]MIŠIĆ V V, PERAKIS G. Data analytics in operations management: a review[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(1): 158-169.

[11]MAYER-SCHÖNBERGER V, CUKIER K. Big data: a revolution that will transform how we live, work, and think[M]. John Murray, 2013.

[12]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(9):133-151,200.

[13]CAPPA F, ORIANI R, PERUFFO E, et al. Big data for creating and capturing value in the digitalized environment: unpacking the effects of volume, variety and veracity on firm performance[J]. Journal of Product Innovation Management, 2021, 38(1): 49-67.

[14]EREVELLES S, FUKAWA N, SWAYNE L. Big data consumer analytics and the transformation of marketing[J]. Journal of Business Research, 2016, 69(2): 897-904.

[15]吕斌,李国秋.新一代信息技术的发展对信息化测度的影响[J].情报理论与实践,2016,39(4):1-7.

[16]汪斌,余冬筠.中国信息化的经济结构效应分析——基于计量模型的实证研究[J].中国工业经济,2004(7):21-28.

[17]LAMBERT D M, COOPER M C. Issues in supply chain management[J]. Industrial Marketing Management, 2000, 29(1):

65-83.

[18]肖静华,胡杨颂,吴瑶.成长品:数据驱动的企业与用户互动创新案例研究[J].管理世界,2020,36(3):183-205.

[19]MOORE J F. Predators and prey: a new ecology of competition[J]. Harvard Business Review, 1993, 71(3): 75-86.

[20]THOMAS D J, GRIFFIN P M. Coordinated supply chain management[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 94(1): 1-15.

[21]LIU H, HERR W A, HOBBS J E. A review of Chinese food safety strategies implement after several food safety incidents involving export of Chinese aquatic products[J]. British Food Journal, 2012, 114(2-3): 372-386.

[22]陈冬梅,王俐珍,陈安霓.数字化与战略管理理论——回顾、挑战与展望[J].管理世界,2020,36(5):220-236,20.

[23]GUNASEKARAN A, PATEL C, MCGAUGHEY R E. A framework for supply chain performance measurement[J]. International Journal of Production Economics, 2004, 87(3): 333-347.

[24]CHAKKOL M, JOHNSON M, RAJA J, et al. From goods to solutions: how does the content of an offering affect network configuration?[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2014, 44(1/2): 132-154.

[25]ZAUŠKOVÁ A, REZNÍČKOVÁ M. SoLoMo marketing as a global tool for enhancing awareness of eco-innovations in Slovak business environment[J]. Equilibrium, 2020, 15(1): 133-150.

[26]SIMONE F, URBINATI A. Managing resource loops in circular supply chains: a taxonomy of multi-sided platforms in the B2B setting[J]. Industrial Marketing Management, 2023, 115: 185-197.

[27]KIMBER D, GUESALAGA R, DICKMANN M. Are you international salespeople culturally intelligent? The influence of cultural intelligence on adaptive selling behavior with B2B customers [J]. Journal of Industrial & Marketing, 2021, 37(4): 734-747.

[28]修文群.区域信息化的测度与评价[J].情报学报,2002(2):197-208.

[29]茶洪旺,左鹏飞.中国区域信息化发展水平研究——基于动态多指标评价体系实证分析[J].财经科学,2016(9):53-63.

[30]DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.

[31]王建军,曹旭东,杨云峰.基于CRSG模型的山区公路风险隔离研究[J].中国公路学报,2018,31(9):119-128.

[32]吴忠,关娇,何江.最低工资标准测算实证研究——基于CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J].当代经济科学,2019,41(3):103-117.

[33]张发明,郭亚军,易平涛.序关系分析下的多阶段交互式群体评价方法[J].系统工程学报,2011,26(5):702-709.

[34]WASSERMAN S, FAUST K. Social network analysis: methods and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[35]LIANG D C, DARKO P A, XU Z S. Pythagorean fuzzy partitioned geometric Bonferroni mean and its application to multi-criteria group decision making with grey relational analysis [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2019, 21(1): 115-128.

[36]刘军,杨渊望,张三峰.中国数字经济测度与驱动因素研究[J].上海经济研究,2020(6):81-96.

[37]李晓梅,崔靛.数字物流、区域经济与碳环境治理耦合及影响因素——基于我国30个省级面板数据的实证检验[J].中国流通经济,2022,36(2):11-22.

[38]李健旋.中国制造业智能化程度评价及其影响因素研究[J].中国软科学,2020(1):154-163.

[39]牛丽娟.数字金融与经济高质量发展:理论分析与实证检验[J].西南民族大学学报(人文社会科学版),2023,44(1): 125-138.