

基于 TOE 框架的水利工程项目 BIM 应用影响因素研究

贺巧凤¹ 赵娜² 何潇蓉^{1*} 聂琳然¹ 黄鸿杰¹

1. 河北建筑工程学院 河北张家口 075000; 2. 张家口市水利发展规划中心 河北张家口 075000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17628

[摘要] 随着现代信息技术的快速发展, BIM 技术促进了水利工程建设效率和后期的运营维护。研究基于 TOE 框架和实际的调查研究, 从技术、组织、环境和效益四个方面出发, 构建水利工程 BIM 应用影响因素指标体系, 识别出 7 个影响 BIM 水利项目的因素, 运用结构方程模型进行数据分析。研究结果表明, 外部环境驱动力对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值影响最大, 组织和技术的影 响次之, 说明政府政策和行业竞争的影响显著。最后依据分析结果提出相应的对策建议, 实现以“BIM+N 应用场景”构建具有新质生产力数智服体系, 为水利工程的 建设运维方面做出贡献。

[关键词] 水利工程; BIM; 影响因素; TOE 框架; 结构方程模型

1 引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施, 在防洪、灌溉、发电、供水等方面发挥着重要作用。水利工程项目呈现出多源异构、规模庞大、动态变化等复杂特征, 在工程建设和后期的维护中面临诸多挑战^[1]; 随着国家提出“智慧水利”的政策, “天空地水工”为实现智慧水利提供了实时、精准的数据支持^[2]。BIM 技术的引入将水库建设和运维过程中的全要素信息进行数字化集成与动态模拟, 实现了工程项目的可视化、信息化管理。基于深汕合作区的水底山水库建设项目, 孙瑶、郑东玉^[3]研究了 BIM 三维协同设计, 以无人机倾斜摄影测量结合人工测绘的数据获取方式, 将水库项目的 BIM 数据相融合, 为项目提供了动态数据模型和技术参考; 黄博豪、程刚^[4]等人在新疆和田玉龙喀什水利枢纽工程中基于北斗技术, 探讨了 BIM 技术在水利水电工程施工管理中的智慧化水平。郭斌^[5]等人从技术和社会文化两个层面对 BIM 协同应用的障碍因素(缺乏较完善的 BIM 应用标准、部署 BIM 软件集成环境难度高、缺乏政府和行业主管部门的政策支持、行业的保守性和传统思想的束缚及对改变舒适惯例的抵制等 16 个因素)进行了研究; 张云宁、施陆燕^[6]等人基于 SEM 结构方程模型, 从经济、资源与能源、技术和管理 4 个维度构建了水利工程 BIM 应用效益评价模型; 袁敏^[7]使用 SEM 结构方程模型从技术、经济、认知和行业环境四个方面分析了 BIM

在水利工程中应用的影响机制。综上所述, 现有文献对 BIM 应用的研究已相当成熟, 从不同视角、用不同方法对 BIM 的应用进行了探讨分析。但是, 研究主要集中在建筑工程方面, 在水利工程领域, 关于 BIM 应用影响因素的研究还比较少, 且深度不足。研究在以往文献的基础上, 综合专家访谈和实地调查, 基于 TOE 框架, 梳理归纳并深入分析 BIM 技术在水利工程中应用的影响因素, 发现技术优势、技术复杂性、组织文化、政府政策等会对水利工程项目中 BIM 的应用产生影响。提出有助于提高 BIM 技术在水利工程项目中应用的对策建议, 进而在一定程度上降低设计变更、改善工程质量、促进水利改重项目运营, 为后期的预防和维护提供数据支撑。

2 理论基础与研究假设

1990 年, Tomatzky 和 Fleischer^[8]在《技术创新的流程》中提出 T(技术)-O(组织)-E(环境)框架, 这三个维度并非独立, 而是存在着复杂、动态且相互交织的互动关系。当一项新技术与组织的现有流程兼容, 且符合政府产业政策导向, 同时组织内部拥有资源并能应对市场竞争时, 创新成功的概率最大。该框架为分析新技术在组织中的应用提供了全面的视角, 有助于识别影响新技术采纳与应用的各种因素及其相互关系, 故研究采用该框架对水利工程项目中应用 BIM 的影响因素进行分析。

基于 TOE 理论框架, 研究采用文献研究法和实地水利工

程考察调研，对影响水利工程建设因素进行优化整合，归纳出 8 个影响因素作为预测变量，发现影响 BIM 应用的主要因素包括 BIM 技术的相对优势、兼容性、复杂性、高层管理者的支持、行业环境等方面，在技术维度，提出了技术相对优势 (S1)、技术管控 (S2)、技术兼容性 (S3) 和技术复杂性 (S4) 四个因素，S1 包括 BIM 的应用在水利工程项目的前期设计、施工、后期运维阶段体现出来的优势；S2 体现在对水利工程项目各个阶段的管理控制能力上，通过 BIM 实现对水利工程的动态控制；S3 指 BIM 技术本身与水利工程项目周边环境及软件之间是否兼容；S4 指 BIM 技术更容易被理解和使用的程度。在组织维度，提出了组织的准备程度 (S5)

和组织文化 (S6) 两个因素，S5 是指水利工程是否具备了使用 BIM 所需的资源等；S6 指组织模式对创新技术的开放与包容程度。在环境维度，提出了政府政策 (S7) 和竞争者压力 (S8) 两个因素，体现在政府颁布的政策以及同行业带来的压力对水利工程项目应用 BIM 的影响驱动。BIM 在水利工程的应用会为周边民众带来社会公益价值及在项目前期规划和后期运维阶段体现的应用价值是显著突出的，即综合效益价值 (S9)。

基于以上理论和对山西、河北的水利工程项目进行了实地调研，结合文献研究最终提出如下假设，见表 1：

表 1 水利工程项目中应用 BIM 技术的结构方程模型研究假设

分类	研究假设
技术	H1-1 技术相对优势对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响
	H1-2 技术管控对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响
	H1-3 技术兼容性对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响
	H1-4 技术复杂性对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生负向影响
组织	H2-1 组织的准备程度对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响
	H2-2 组织文化对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响
环境	H3-1 政府政策对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响
	H3-2 竞争者压力对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值产生正向影响

3 研究设计

3.2 研究方法

3.1 问卷设计

为精准捕捉水利工程项目中 BIM 应用影响因素的实际情况，研究基于前文构建的技术、组织、环境、效益框架设计并编制了调查问卷，问卷内容严格对应各维度下的潜在变量与观测指标。调查对象主要为河北省和山西省水利行业从业人员，涵盖监理单位、咨询单位、施工单位、设计单位等水利工程项目全生命周期各个参建主体，确保样本具有行业代表性与数据有效性。

调查问卷使用李克特五点度量法(1“完全不同意”至 5“完全同意”)，发放采用电子问卷形式，使用“问卷星”网站制作问卷，被调查者通过 QQ、微信、二维码或网络链接在线填写，分两次进行问卷发放，一共发放问卷 418 份，其中第一次发放 131 份作为探索性因子分析，经过探索性因子分析后剔除不合理题项；第二次收集 287 份进行验证性因子分析。

研究需同时分析多个潜在变量与观测变量的关系，以及各潜在变量对“综合效益价值”这一结果变量的作用机制，传统回归分析难以满足多变量交互与潜变量测量的需求，因此选用结构方程模型 (SEM) 作为核心分析方法。

结构方程模型兼具验证性因子分析与路径分析的双重优势，一方面可通过验证性因子分析检验量表的信度与效度，确保观测变量对潜在变量的测量有效性；另一方面能通过路径分析量化各影响因素对综合效益价值的作用强度，清晰揭示“技术-组织-环境”三维度因素与 BIM 应用效益间的因果关系链。

研究使用 SPSS 29.0 软件完成问卷数据的信度检验与探索性因子分析，初步筛选有效观测变量并修正研究维度；再通过 AMOS 28.0 软件构建结构方程模型，开展验证性因子分析与路径系数显著性检验，最终验证前文提出的研究假设，系统识别水利工程项目中 BIM 应用的关键影响因素。

表 2 调查对象群体一般资料特征描述

变量	选项	频率	百分比
工作单位类型	监理单位	58	13.9%
	咨询单位	98	23.4%
	施工单位	156	37.3%
	设计单位	42	10%
	其他	64	15.3%
BIM 技术了解程度	已使用过 BIM	279	66.7%
	未使用过 BIM 但非常了解	91	21.8%
	未使用过略有了解	35	8.4%
企业的 BIM 应用年限	不太清楚	13	3.1%
	两年以下	218	52.2%
	五年以内	103	24.6%
	五年以上	97	23.2%
	高中/中专/技校	5	1.2%
受教育程度	大专	75	17.9%
	本科	146	34.9%
	硕士及以上	192	45.9%
职业资格证书	造价工程师	131	31.3%
	注册建造师	98	23.4%
	注册结构师	19	4.5%
	土木工程师	48	11.5%
	全国 BIM 应用证书	94	22.5%
	其他	28	6.7%

4 数据分析

4.1 描述性统计

通过问卷的回收，对调查对象群体的基本信息资料进行统计，特征描述结果见表 2。

由上表可知：（1）从工作单位类型上来看，调查对象主要集中在施工单位、咨询单位和监理单位，三者占比高达 74.6%。（2）从 BIM 技术了解程度来看，了解 BIM 的人数占比非常高，说明本次调查人员符合问卷要求。（3）从企业应用 BIM 年限来看，总体调查 BIM 技术的应用经验较为丰富，主要在两年到五年以内的占比较高，说明此次调查问卷的数据具有一定的代表性。（4）从受教育程度来看，从事水利行业的调查对象学历集中在本科及以上，占比高达 80.8%。（5）从获得职业资格证书的情况来看，调查对象主要集中在造价工程师、建筑师和获得全国 BIM 应用证书的人员上，说明问卷有较高质量，能够精准地反映我国目前 BIM 技术应用情况。

4.2 探索性因子分析

KMO 和 Bartlett 球形度检验结果见表 3，研究数据表明适合探索性因子分析。对 46 个观测变量的样本数据进行探索性因子分析，共剔除了 9 个因子载荷低于 0.5 的条目，研究删除了这些题项后，继续对 37 个因子条目进行分析。采用最大方差法旋转的主成分分析方法，共选取了 8 个主成分，8 个主成分方差的累积贡献率为 69.275%，这可以解释大约 70% 的整体信息，表明提取 8 个因子具有良好的结构效度。

表 3 KMO 和巴特利特检验结果

KMO	Bartlett 的球形检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.866	4442.347	1035	0.000

经过探索性因子分析发现分析结果与预设的 9 个因子不符合，结果表明，预先定义的“政府政策”与“竞争者压力”维度中的测量题项聚合在同一个公共因子上，说明其题项高度相关。这一结果表明，在水利工程应用情境下，项目参与方感受到的外部压力来源具有一定的整合性，水利工程通常具有投资巨大、公益性强的特点，政府在其中扮演着更关键的角色，政府的政策要求本身就显著影响着行业内的竞争格局和企业的战略选择，导致这两种压力在企业的实际决策中被融合感知。故需要对此成分进行重新评估命名，结合理论背景与实证分析综合考虑，将此成分更名为外部环境驱动力，即感知到的来自政府政策法规强制性要求和行业竞争压力共同形成的、推动企业采用 BIM 技术的外部环境动力。经修正后的因素汇总如表 4：

表 4 水利工程项目中 BIM 技术应用影响因素

变量类型	测量变量	编号	BIM 应用影响因素
预测变量	技术维度	S1	技术相对优势
		S2	技术管控
		S3	技术兼容性
		S4	技术复杂性
组织维度	环境维度	S5	组织的准备程度
		S6	组织文化
结果变量	效益维度	S7	外部环境驱动力
		S8	综合效益价值

4.3 验证性因子分析

为探究技术相对优势、技术管控、技术复杂性等 7 个因素对水利工程项目中应用 BIM 的综合效益价值的影响关系，运用结构方程模型构建结构路径和计算路径系数，并对其进

行数据分析。

为了保证每个观测变量都能很好地反映潜在变量,首先对问卷数据使用 SPSS 29.0 软件进行信度和效度检验,然后使用 AMOS 28.0 建立结构方程模型,进行模型的检验和分析。

使用 Cronbach's α 系数来检验各个维度的内部一致性^[9, 10],当 Cronbach 的 Alpha 系数大于 0.6 且数值越高,可靠性越高。一般认为信度系数在 0.6 以下则认为不可信,需要重新设计问卷或尝试重新收集数据并再次进行分析^[11]。在本次分析中,信度分析的结果如表 5 所示,Cronbach's α 系数范围在 0.7~1 之间,说明研究所使用的量表均具有良好的内部一致性。

表 5 量表信度分析

影响因素	Cronbach's α	项数	可靠性
技术相对优势	0.871	8	通过
技术管控	0.786	3	通过
技术兼容性	0.868	4	通过
技术复杂性	0.813	5	通过
组织的准备程度	0.810	3	通过
组织文化	0.717	3	通过
外部环境驱动力	0.829	5	通过
综合效益价值	0.875	6	通过
总体数据	0.953	37	通过

根据模型适配检验结果,CMIN /DF (卡方自由度比) =1.878 在 1~3 的范围内,RMSEA (误差均方根) =0.065 在 < 0.08 的良好范围内,另外的 IFI、TLI 以及 CFI 的检验结果均达到了 0.8 以上的良好水平。因此,综合本次的分析结果可以说明,本研究构建的水利工程项目中应用 BIM 的影响因素量表验证因子分析具有良好的适配度。

收敛效度和组合信度见表 6。根据标准,AVE 值最低要求达到 0.5,CR 值最低要求达到 0.7,才能说明具有良好的收敛效度和组合信度。根据分析结果可以得出,本次量表效度检验中各个维度的 AVE 值均达到了 0.5 以上,CR 值均达到了 0.7 以上,综合说明各个维度均具有良好的收敛效度和组合信度。

据表 7 的分析结果可以看出在本次区别效度检验中,各个维度两两之间的标准化相关系数均小于维度所对应的 AVE 值的平方根,因此说明各个维度之间均具有良好的区别效度。

表 6 收敛效度和组合信度表

路径	Estimate	AVE	C. R.
RA8 <--- RA	0.787		
RA7 <--- RA	0.635		
RA6 <--- RA	0.663		
RA5 <--- RA	0.698	0.52	0.89
RA4 <--- RA	0.679		
RA3 <--- RA	0.806		
RA2 <--- RA	0.731		
RA1 <--- RA	0.750		
TC3 <--- TC	0.719		
TC2 <--- TC	0.794	0.56	0.79
TC1 <--- TC	0.726		
CP4 <--- CP	0.756		
CP3 <--- CP	0.775	0.59	0.85
CP2 <--- CP	0.794		
CP1 <--- CP	0.845		
C5 <--- C	0.646		
C4 <--- C	0.660		
C3 <--- C	0.817	0.52	0.83
C2 <--- C	0.776		
C1 <--- C	0.586		
OR3 <--- OR	0.780		
OR2 <--- OR	0.757	0.59	0.81
OR1 <--- OR	0.765		
OC3 <--- OC	0.618		
OC2 <--- OC	0.821	0.55	0.78
OC1 <--- OC	0.778		
EDF5 <--- EDF	0.741		
EDF4 <--- EDF	0.638		
EDF3 <--- EDF	0.661	0.51	0.83
EDF2 <--- EDF	0.769		
EDF1 <--- EDF	0.693		
BV6 <--- BV	0.742		
BV5 <--- BV	0.803		
BV4 <--- BV	0.817	0.55	0.88
BV3 <--- BV	0.681		
BV2 <--- BV	0.698		
BV1 <--- BV	0.712		

表 7 量表各个维度区别效度检验结果

因素	RA	TC	CP	C	OR	OC	EDF	BV
RA	0.721							
TC	0.532	0.748						
CP	0.613	0.567	0.768					
C	0.625	0.560	0.557	0.721				
OR	0.619	0.524	0.645	0.563	0.768			
OC	0.648	0.536	0.569	0.451	0.542	0.742		
EDF	0.596	0.616	0.688	0.563	0.615	0.608	0.714	
BV	0.574	0.602	0.576	0.614	0.625	0.536	0.611	0.742

4.3 结构方程模型分析

首先,对模型进行估计和评价。本文采用极大似然法对其进行检验,影响机理模型的路径系数如图 1 所示。在 AMOS28.0 中对模型路径系数的显著性进行了检验,结果如表 8 所示。

表 8 结构方程模型的标准化回归系数

变量间关系	标准化回归系数	SE.	C. R.	P	是否支持假设
综合效益价值 <--- 技术相对优势	0.350	0.058	5.532	0.000	是
综合效益价值 <--- 技术管控	0.312	0.071	4.917	0.000	是
综合效益价值 <--- 技术兼容性	0.268	0.062	4.077	0.000	是
综合效益价值 <--- 技术复杂性	-0.251	0.054	-4.463	0.004	是
综合效益价值 <--- 组织准备程度	0.212	0.059	3.802	0.000	是
综合效益价值 <--- 组织文化	0.195	0.061	3.526	0.000	是
综合效益价值 <--- 外部环境驱动力	0.424	0.068	5.987	0.000	是

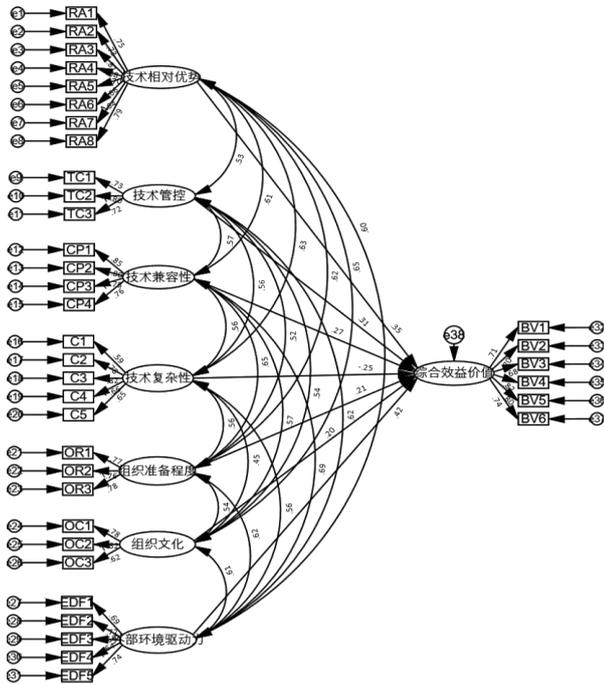


图 1 BIM 在水利工程项目中应用的影响机理模型

7 个潜在变量对因变量 BIM 在水利工程项目中应用的综合效益价值的假设均成立，通过分析可以得出，技术相对优势、技术管控、技术兼容性、技术复杂性等均对水利工程项目中 BIM 技术应用的综合效益价值产生不同程度的影响，影响程度从大到小依次是：外部环境驱动力 (0.424) > 技术相对优势 (0.350) > 技术管控 (0.312) > 组织的准备程度 (0.212) > 技术兼容性 (0.268) > 技术复杂性 (0.251) > 组织文化 (0.195)，故可以看出外部环境驱动力是其最为关键的因素，说明政府政策和竞争者压力对水利工程项目中应用 BIM 技术的综合效益价值影响最大，最后促使对组织产生影响，而技术复杂性和组织文化对水利工程项目中应用 BIM 技术的综合效益价值影响相对较小。

5 建议与结语

5.1 建议

(1) 环境层面

外部环境驱动力对 BIM 在水利工程项目中应用的影响程度最高，政府部门作为市场的管理者，应出台更有力的政策，明确要求在重大水利工程、政府投资项目全生命周期强制应用 BIM 技术。进一步完善 BIM 政策法规体系，加大政策扶持力度，如设立 BIM 应用专项资金、给予税收优惠等。出台相应的水利工程 BIM 技术标准，提高行业整体的 BIM 应用意识与水平。

(2) 组织层面

研究表明，组织利用“BIM+GIS+AI+遥感”的技术集成优势，引入人工智能、大数据、云计算等先进技术提升水利工程的数智化水平。实现在水利防控和日常维护具有自主迭代优化能力，因此，企业要有足够支持数字化云计算的能力，培养综合性的 BIM 人才，建立可持续的人才培养激励机制，以促进员工的学习积极性。培育创新型组织文化，实现适应快速变化的组织特点，以促进水利工程各参与方的协调和管理工作。

(3) 技术层面

分析结果显示，技术相对优势和技术管控的影响较大，为充分保证水库建设和后期除险加固的工程质量，可加大对 BIM 软件研发的投入，结合水利工程的特点开发专业功能模块，实现以“BIM+N 应用场景”构建具有新质生产力数智服务体系，促进不同软件间的兼容性和交互性。基于水利工程 BIM 模型，对水利工程场景进行三维仿真模拟；实现设备运行状态实时监测分析；实现作业面高效智能协同联动，保障水利工程智能化安全生产与综合效益价值最大化。

5.2 结语

水利工程是基于标准规范、风险应急防控及图像多光谱遥感影像等多模态的数据赋能，实现水利工程的风险识别、评估，为预案生成提供数据依据。BIM 技术在水利工程中的应

用具有显著的优势和潜力,是推动智慧水利建设和行业数字化转型的关键抓手。然而,其应用效果受到技术、组织、环境三方面因素的影响。因此,需要采取有效的优化策略,加强技术研发、人才培养和引进、制度完善以及成本控制等方面的工作,推动BIM技术在水利工程中的广泛应用和深入发展。

研究基于TOE框架对水利工程项目中BIM应用的影响因素进行了全面深入的分析,识别出技术、组织、环境和效益四个维度的关键测量变量,并通过结构方程模型分析验证了这些因素的重要性。为充分释放BIM价值,在技术层面,需聚焦水利行业痛点,深化专业研发,提升兼容互通;在组织层面,需高层引导变革,优化资源配置,完善激励机制,培育创新文化;在环境层面,尤其要强化政府的主导作用。这些研究成果有助于水利工程行业更好地理解 and 把握BIM应用的影响因素,为提高水利工程项目BIM应用水平提供了理论指导与实践参考,为推动水利工程建设行业的数字化转型与可持续发展提供了依据。

[参考文献]

[1]宋华君,曹连朋,付大庆,等.勘察规范对我国中小型水库除险加固工程的影响[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S1):560-568.

[2]钱峰,成建国,夏润亮,等.数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知体系构建与应用初探[J].中国水利,2024,(24):39-47.

[3]孙瑶,郑东玉.无人机倾斜摄影测量在水库BIM设计中的应用[J].中国农村水利水电,2022,(08):174-177+1[1]

[4]黄博豪,程刚,杜华冬.BIM技术在新疆和田玉龙喀什水利枢纽施工管理中的应用[J].土木工程信息技术,2025,17(04):33-37.

[5]郭斌,朱轲,冯涛.BIM协同应用障碍因素解释结构模型[J].土木工程与管理学报,2019,36(6):49-55.

[6]张云宁,施陆燕,秦韬,等.基于SEM和云物元的水利工程BIM应用效益评价[J].水利经济,2020,38(01):29-35+48+86.

[7]袁敏.基于SEM的水利工程BIM技术应用影响机制研

究[J].水利技术监督,2024,(02):55-59.

[8]Tomatzky, L G, Fleischer, M O. The processes of technological innovation. [M]. Lexington Mass: Lexington Books, 1990.

[9]MENG X. Research on residents' domestic waste classification behavior based on structural equations [J]. Resources Science, 2019, 41 (6): 1111-1119.

[10]HANG J L, FEI F, WEN Z G. Factors influencing residents' waste classification behavior in small and medium-sized cities: The case of Zhangjiagang City, China[J]. Environmental Science, 2022, 42(5): 4946-4953.

[11]OUM. Study on the influencing factors of urban waste source classification—Taking the inner-city district of Tianjin as an example[J]. Arid Zone Resources & Environment, 2020, 34 (4): 15-21.

[12]李维雨,张潇予.BIM技术在水利工程设计阶段成本控制中的应用研究[J].内蒙古水利,2025,(05):115-117.

作者简介:第一作者:贺巧凤(1998.06-)女,汉族,山西省忻州市,硕士研究生在读,河北建筑工程学院,研究方向:工程建造与管理。

第二作者:赵娜(1987.07-)女,汉族,河北省张家口市,本科,现就职张家口市水利发展规划中心,研究方向:工程建造与管理。

通讯作者:何潇蓉(1988.11-)女,汉族,黑龙江齐齐哈尔市,硕士研究生,讲师,河北建筑工程学院,研究方向:数字经济。

第四作者:聂琳然(1998.5-)女,汉族,河北省张家口市,硕士研究生在读,河北建筑工程学院,研究方向:工程建造与管理。

第五作者:黄鸿杰(1997.7-)男,汉族,河北省张家口市,硕士研究生在读,河北建筑工程学院,研究方向:工程建造与管理。

基金项目:河北省高等学校科学研究项目河北省数字经济与新质生产力耦合协调度的科学评价及动态演变研究(项目编号:QN2025868)。