

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2025.03.010

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:余宏亮,黄纯.基于动态模糊认知图的城市地下综合管廊项目可持续性评价[J].西安理工大学学报,2025,41(3):401-409.

YU Hongliang, HUANG Chun. Sustainability assessment of urban utility tunnel project based on dynamic fuzzy cognitive map[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2025, 41(3): 401-409.

基于动态模糊认知图的城市地下综合管廊项目可持续性评价

余宏亮^{1,2}, 黄纯¹

(1. 武汉科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430081; 2. 湖北产业政策与管理研究中心, 湖北 武汉 430065)

摘要:为进一步解决我国综合管廊项目的可持续发展问题,推动基础设施建设与运营的高质量发展,本文首先从项目的可持续性状况、能力和协调度入手构建了综合管廊项目可持续性评价指标体系,包括9个主要指标和23个细分指标。其次,考虑到评价指标间相关动态性的影响,引入基于Hebbian规则的动态模糊认知图评价模型。最后,利用MATLAB软件对项目实例进行可持续性评价,得到评价结果并预测其未来可持续发展挑战,为项目可持续发展提供有效建议。

关键词:综合管廊项目;可持续性评价;动态模糊认知图;Hebbian规则

中图分类号: F294

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2025)03-0401-09

Sustainability assessment of urban utility tunnel project based on dynamic fuzzy cognitive map

YU Hongliang^{1,2}, HUANG Chun¹

(1. School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Research Center for Industrial Policy and Management in Hubei Province, Wuhan 430065, China)

Abstract: This study is to further solve the problem by the sustainable development of urban utility tunnel projects in China and promote the high-quality development of construction and operation for infrastructure. Firstly, this paper constructs an urban utility tunnel project sustainability assessment index system starting from the project's sustainability status, capacity and coordination degree, including 9 main indicators and 23 sub-indicators. Secondly, considering the influence of relevant dynamics between evaluation indicators, a dynamic fuzzy cognitive map evaluation model based on Hebbian rules is introduced. Finally, the MATLAB software is used to evaluate the sustainability of the project example, obtain the evaluation results and predict its future sustainability challenges, and provide effective suggestions for the sustainable development of the project.

Key words: urban utility tunnel project; sustainability evaluation; dynamic fuzzy cognitive map; Hebbian rules

近年来,各地积极响应国家关于地下综合管廊建设的相关政策,这使得我国综合管廊建设呈现出快速规模化发展态势^[1]。截至2022年底,我国已建综合管

廊总计7 588.10 km^[2]。城市地下综合管廊的建设和运营对城市的经济发展和环境保护至关重要。随着管廊建设的推进,入廊率低、管线入廊后收费困难等现实

收稿日期: 2024-06-14; 网络首发日期: 2024-10-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20241011.1121.002>

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2020-K-129)

第一作者: 余宏亮,男,博士,高级工程师,研究方向为工程管理。E-mail: yuhongliang@wust.edu.cn

通信作者: 黄纯,女,硕士生,研究方向为工程管理。E-mail: huangchun@wust.edu.cn

问题逐渐显现,若对其置之不理,会造成公共资源的浪费,影响管廊项目的投资回报,并阻碍管廊项目的进一步建设和运营。因此,有必要建立科学有效的可持续性评估体系,为综合管廊的可持续发展提供指导。

城市建设及市政基础设施可持续性评价已成为国内外学者关注的重点,相关文献数量众多且内容丰富。在可持续性评价指标的确定上,白芙蓉等^[3]从工程、经济、管理、社会、环境五个维度,系统分析了综合管廊 PPP 项目可持续性风险的影响因素;陈志远^[4]基于利益相关者理论和全生命周期理论,构建了一套全面的综合管廊 PPP 项目可持续性影响因素清单,它涵盖了利益相关者、项目特性和外部环境。在研究方法上,文献^[5]针对当前基础设施评级制度中存在的弱点,将层次分析法和可持续发展综合评价模型(MIVES)相结合,构建了发展中国家可持续基础设施评价体系。Matar 等^[6]提出了一种基于系统工程概念和系统建模语言(SysML)的系统模型,用于量化和评估建筑项目的可持续性表现。宋佳慧等^[7]针对专家定性评价的随机性、模糊性及不确定性,提出了基于云模型的可持续性评价方法,实现了模糊性与定量数值之间的转换。

上述研究为本文提供了丰富的理论基础,但其研究主要集中在对基础设施项目的可持续性评价上,而针对综合管廊项目的可持续性评价研究相对较少;而且,从研究方法上来看,上述研究大多未考虑评价指标的动态变化以及指标之间的相互作用。在对城市地下综合管廊项目进行可持续性评价时,由于项目所面临的社会政策、经济发展、技术更新等因素在不断改变,为了使评价结果更准确,需要评价模型能模拟实际情况并适应环境的改变^[8]。动态模

糊认知图通过借助专家知识来分析指标变化对相关性矩阵的动态影响,并将动态变化反映到模型推理过程中,使模型能再现实际情况,从而提高评价结果的可靠性^[9]。因此,本文使用动态模糊认知图评价模型对城市地下综合管廊项目进行可持续性评价。本文研究结果既可为项目的规划、设计、施工和运营提供指导,帮助项目团队优化决策,又能为政府机构制定更具针对性的政策提供参考。

1 城市地下综合管廊项目可持续性评价标准及指标体系构建

城市地下综合管廊项目的可持续性是指在满足当前城市发展对地下管线基础设施需求的同时,不损害未来城市发展的需求,并为项目带来长期的经济、环境和社会效益^[10]。具体而言,经济可持续性要求管廊项目具有合理的投资回报率,并能为项目带来长期的经济效益;环境可持续性要求管廊项目有助于改善城市环境质量,并遵循绿色施工和运营理念;社会可持续性要求管廊项目能满足城市居民对安全、健康和舒适的生活环境的需求^[11]。这就要求项目在建设和运营管理上注重整体能力的提升^[12],确保管廊设施的安全、可靠、高效运行,从而为城市提供持续的服务和发展支持。由此可见,可持续发展旨在寻求环境、经济、社会各要素之间协调互补的发展模式,其保障在于能力建设,并通过兼顾经济、社会、环境效益,在既定条件下寻求整体最优的平衡点。因此,本文将从可持续性状况、可持续性能力及可持续性协调度三个维度来识别城市地下综合管廊的可持续性评价指标。城市地下综合管廊项目可持续性评价结构如图 1 所示。

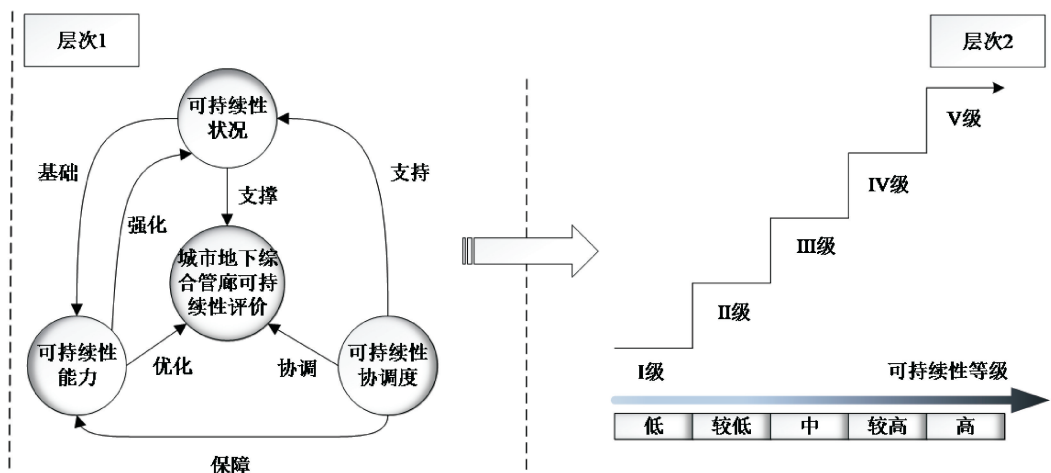


图 1 城市地下综合管廊项目可持续性评价结构

Fig. 1 Sustainability assessment structure for urban utility tunnel projects

城市地下综合管廊可持续性评价指标体系的构建应遵循科学、全面、实用、严谨和前瞻的原则^[13]。首先,基于上述可持续性评价结构中的三个维度,依据相关文献,初步分类并整理出一系列城市地下综合管廊可持续性评价指标。其次,结合综合管廊的社会、经济、环境影响及项目可行性分析,进一步细化和完善评价指标。最后,咨询专家意见,对指标做

进一步调整和优化。由此,本文所构建的评价指标体系以城市地下综合管廊的可持续性为总目标,从可持续性状况、可持续性能力和可持续性协调度3个维度展开,每个维度下设多个主题和指标,形成四级递阶层次,共计23个评价指标。根据评价指标体系,将城市地下综合管廊项目的各类可持续性指标划分为五个等级:I、II、III、IV、V,其中V级为最高等级,详情见表1。

表1 城市地下综合管廊项目可持续性评价体系及标准

Tab.1 Sustainability assessment system and criteria for urban utility tunnel projects

总目标	一级指标 U_i	二级指标 U_{ij}	三级指标 U_{ijk}	可持续性等级				
				I	II	III	IV	V
				[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]
城市地下综合管廊可持续性 U	可持续性状况 U_1	经济可持续性状况 U_{11}	投资回报率 U_{111} / %	<5	[5,10)	[10,15)	[15,20)	≥ 20
			定价和收费机制 U_{112} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		社会可持续性状况 U_{12}	公共安全控制 U_{121} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			公众认可度 U_{122} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			大气污染控制 U_{131} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		环境可持续性状况 U_{13}	土壤污染控制 U_{132}	≥ 3	[2,3)	[1,2)	[0.7,1)	<0.7
			废水排放合规率 U_{133} / %	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			固体废弃物处理合规率 U_{134} / %	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		可持续发展能力 U_2	资金来源多样性 U_{211} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			经济效益 U_{212} / %	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,12]
			管廊利用率 U_{213} / %	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			全生命周期投入成本控制能力 U_{214} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			技术创新能力 U_{221} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			人员管理 U_{222} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			运维管理 U_{223} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			安全管理 U_{224} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			环境保护能力 U_{23}	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			生态保护与恢复措施 U_{232} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		社会保障能力 U_{24}	社会参与和反馈机制 U_{241} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			政府激励与监督机制 U_{242} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
	可持续性协调度 U_3	规划与设计协调度 U_{31}	管廊规划合理性 U_{311} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
			与其他地下空间的协调性 U_{312} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		利益相关方协调度 U_{32}	利益相关方责任划分与协调 U_{321} / 分	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]

2 动态模糊认知图推理模型

2.1 数据处理方法

2.1.1 问卷调查法及数据标准化

鉴于评价体系涵盖定性和定量指标,本文采用两种方法获取指标初始值。对于定性指标,采用问

卷调查法收集数据。为确保调查结果具有代表性,采用加权平均法,其中不同评价对象的权重根据其可信度而定。其公式为:

$$\bar{v}_i = \sum_{j=1}^n q_j \times v_i \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n q_j = 1$$

式中: v_i 为第 j 位专家对第 i 个节点初始状态的评价值; q_j 为第 j 位专家的可信度。

为获得定量指标的初始值,通常需要回顾历史数据,并对这些数据进行标准化处理。其公式为:

$$\bar{v}_i = (v_{i, \text{real}} - v_{i, \text{min}}) / (v_{i, \text{max}} - v_{i, \text{min}}) \quad (2)$$

式中: $v_{i, \text{real}}$ 为第 i 个节点的实际观测值; $v_{i, \text{min}}$ 、 $v_{i, \text{max}}$ 分别为历史数据的最小值、最大值。

标准化过程将数据转化为统一的尺度,消除了单位差异,使数据更易于比较和分析。

2.1.2 三角模糊数法

三角模糊数法是一种用于处理模糊信息的数学方法,它通过 3 个关键参数(最小值、最大值和峰值)来描述模糊集合,以更准确地表示事物的隶属度,其优势在于能够有效处理不精确、不确定的信息^[14]。假设 ξ_k 为第 k 位专家给出的两个指标间相关性强度的隶属度,则 n 位专家的意见被综合为:

$$c = \sum_{k=1}^n \xi_k / n \quad (3)$$

式中: c 为综合 n 位专家的评价结果所得到的因果相关性强度。由所有相关性强度值组成的矩阵则为初始相关性矩阵,记为 C^{initial} 。

2.2 基于 Hebbian 规则的动态模糊认知图推理

模糊认知图(fuzzy cognitive map, FCM)是一种信息可视化工具,用于展示复杂概念之间的联系,尤其适用于概念关系模糊、多义或不确定的情况^[15]。FCM 推理规则为:

$$v_i^{t+1} = f(v_i^t + \sum_{j=1}^N v_j^t c_{ij}) \quad (4)$$

式中: v_i^t 、 v_i^{t+1} 分别为节点 D_i 在 t 、 $t+1$ 时刻的状态值; c_{ij} 为节点 D_i 和节点 D_j 之间的因果相关性强度; f 为阈值函数; N 为节点总数。

迭代过程中,为确保节点状态值介于 0 到 1 之间,需使用阈值函数 f 来处理数据。而 Sigmoid 函数的平滑特性使得它在梯度下降等优化算法中具有良好的可微性^[16],故本文选用 Sigmoid 函数对评价价值进行处理。其公式为:

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (5)$$

动态模糊认知图的推理与 FCM 类似,但它在推理过程中会不断调整相关性矩阵的权重,这是通过引入 Hebbian 规则来实现的。Hebbian 规则是一种非监督式学习方法,它无需事先清楚数据集的决策特征,旨在通过产生基于专家知识的权重矩阵来提高系统的准确性^[17],而且它可以动态更新各指标

间相关性矩阵的权重,从而开展动态的可持续性评价^[18-19]。此外,使用 Hebbian 规则的算法还具有普及性和对理想 FCM 状态的快速收敛性^[20]。非线性 Hebbian 算法的权值更新公式为:

$$\begin{cases} c_{ij}^t = c_{ij}^{t-1} + r \times (\Delta v_i^{t-1} \Delta v_j^{t-1} - c_{ij}^{t-1}), \Delta v_i^{t-1} \neq 0 \\ c_{ij}^t = c_{ij}^{t-1}, \Delta v_i^{t-1} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta v_i^{t-1} = v_i^t - v_i^{t-1}$$

$$\Delta v_j^{t-1} = v_j^t - v_j^{t-1}$$

式中: c_{ij}^t 、 c_{ij}^{t-1} 分别为节点 D_i 与节点 D_j 在第 t 次、第 $t-1$ 次迭代时的相关性强度; r 为学习参数,其值非常小,介于 0 到 0.1 之间; v_i^{t-1} 、 v_j^{t-1} 分别为节点 D_i 与节点 D_j 在第 $t-1$ 次迭代时的状态值。

由式(6)获得第 t 次迭代后所有指标间的相关性强度,并生成新一轮相关性矩阵,然后将其代入式(4)计算下一轮的状态值。当后一时刻状态值与前一时刻状态值之差小于预定的误差阈值 0.002 时,迭代过程停止^[21]。这时系统已达到稳定状态,推理过程也随之完成。

3 案例分析

3.1 项目介绍

本项目位于武汉洪山区礼和路,南起欢乐大道,北至友谊大道,全长 2.39 km。该工程沿线地势有一定起伏且临近高压铁塔、高压电线、居民楼房。

管廊标准段采用三舱断面,分别为综合舱(用于容纳通信线缆、电力电缆、给水管等)、高压电力舱(用于容纳电力管线)和热力舱(用于容纳热力管线)。

3.2 初始状态值和初始相关性矩阵

1) 初始状态值。为尽可能全面、深入了解本项目的相关情况,本研究邀请了 2 名建设管理专业人士及 3 名工程领域的高校教授,围绕评价指标体系进行深度访谈。其中,高校教授的研究方向均为工程管理,项目经理及监理总工程师均参与过 3 个以上大型综合管廊建设项目,而且这些专家在相关领域均有 10 年以上工作经验,因此,受访者的可靠性较高。假设 5 位专家的意见同等重要,故其可信度均为 0.2。以 U_{111} 为例,其初始值评价结果如表 2 所示。

表 2 专家评价结果

Tab. 2 Results of expert assessments

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
可信度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
评价价值	0.38	0.41	0.40	0.42	0.40

$C^{\text{steady}} =$

0	0.055	0	0	0	0	0	0	0.061	0.036	0.309	0	0	0	0	0	0	0	0.024	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.114	0	0.137	0.297	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.191	0	0	0.071	0	0	0.307	0.148	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.014	0	0	0	0	0	0	0	0	0.222	0.284	0	0	0	0	0
-0.198	0	0.310	0	0	0	0	0	0.294	0	0	0	-0.120	0	0	0	0.180	0	0	0	0	0	0	0
-0.213	0	0.184	0	0	0	0	0	0.322	0	0	0	-0.226	0	0	0	0.164	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.424	0	0	0	0	0	0.202	0	0	0	0	0	0	0	0.192	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.317	0	0	0	0	0	0	0	0.314	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.408	0	0	0	0	0.360
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.092	0	0	0	0.074	0.141	0	0	0	0.173	0	0	0	0	0
0.339	0	0	0	0.145	0.153	0	0	0.013	0.248	0	0	0	0	0	0	0	0.159	0.202	0	0	0	0	0
0.286	0	0	0.124	0	0	0	0	0	0.244	0	0	0	0	0	0	0	0.093	0.242	0	0	0.277	0	0
0.231	0	0	0	0	0	0	0.140	0	0.299	0.139	0	0	-0.043	-0.142	0.178	0	0	0.196	0	0.097	0.067	0	0
0.071	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.257	0.055	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.095	0.071	0.141	0	0	0	0.278	0	0	0.425	0.070	0
0	0	0	0	0.070	0.075	0	0	0.166	0	-0.196	0.062	0	0.233	0.290	0	0	0	0.239	0	0	0	0	0
0	0	0.312	0	0.110	0.087	0.128	0.107	0	0	0	0	0	0.170	0.162	0	0	0	0.157	0	0	0	0	0
0.078	0	0	0	0	0	0.134	0.145	0	0.061	0	0.356	0	0	0	0	0.202	0	0.176	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.227	0.230	0.167	0.132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.068	0.053	0	0	0	0	0
0	0	0	0.187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.225	0	0.145	0	0	0	0
0	0.366	0	0.190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.156	0.087	0.115	0.092	0	0	0	0.290	0.230	0.138	0
0.024	0	0	0.014	0	0	0	0.474	0	0.013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.417
0	0	0	0.243	0	0	0	0	0	0	0.159	0.151	0	0	0	0	0	0	0	0.430	0.392	0	0.323	0
0	0	0	0.226	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.214	0	0.272	0.349	0
0.123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.299	0	0.150	0.087	0	0	0	0	0	0	0	0	0.327	0
0	0	0	0	0	0	0	0.325	0	0.012	0	0	0	0	0	0	0	0	0.334	0	0	0	0.314	0
0	0	0	0	0	0	0	0.035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.035	0	0	0	0	0

(10)

可见,该项目的综合评价值为 0.896 2,属于 V 级,说明该综合管廊项目的可持续性较高。

3.3.2 绘制动态模糊认知图

为清晰地展现指标之间的相互作用,将初始状态及稳定状态时的因果相关性矩阵分别描述到图中,得到动态模糊认知图,如图 2 和图 3 所示。

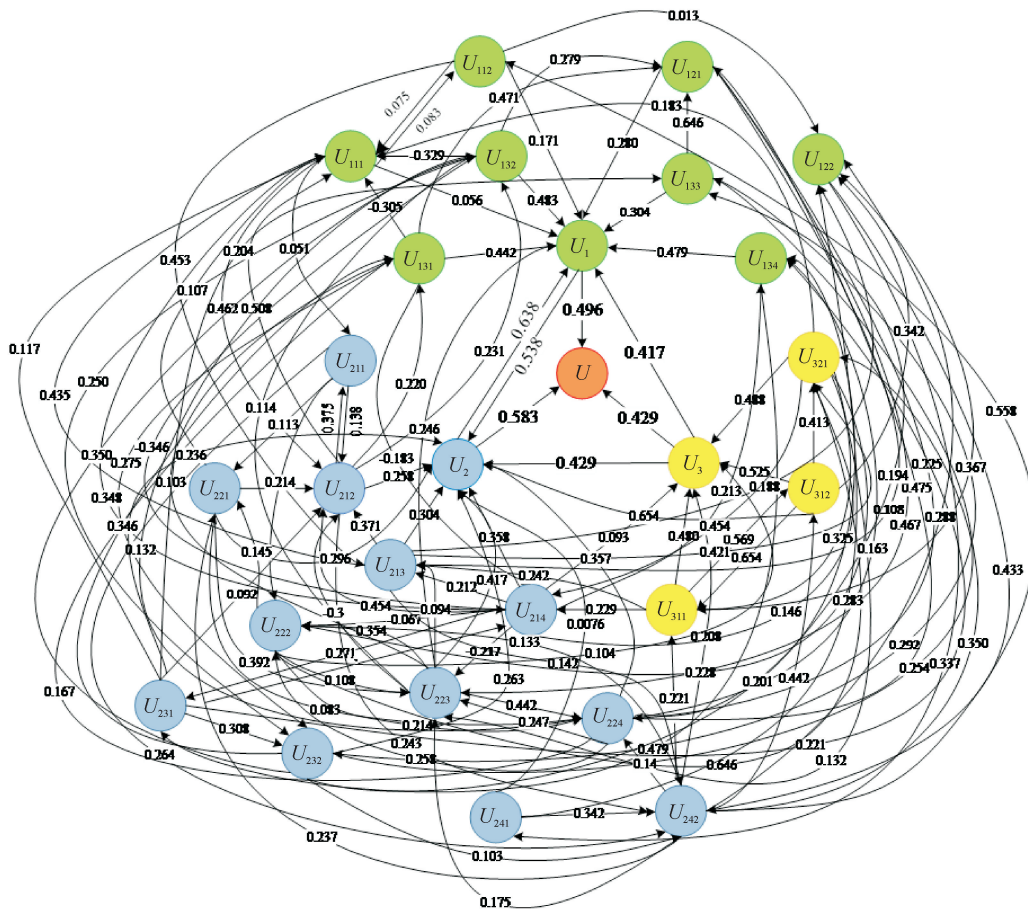


图 2 地下综合管廊项目可持续性评价的初始动态模糊认知图

Fig. 2 Initial dynamic fuzzy cognitive map for sustainability assessment of the utility tunnel project

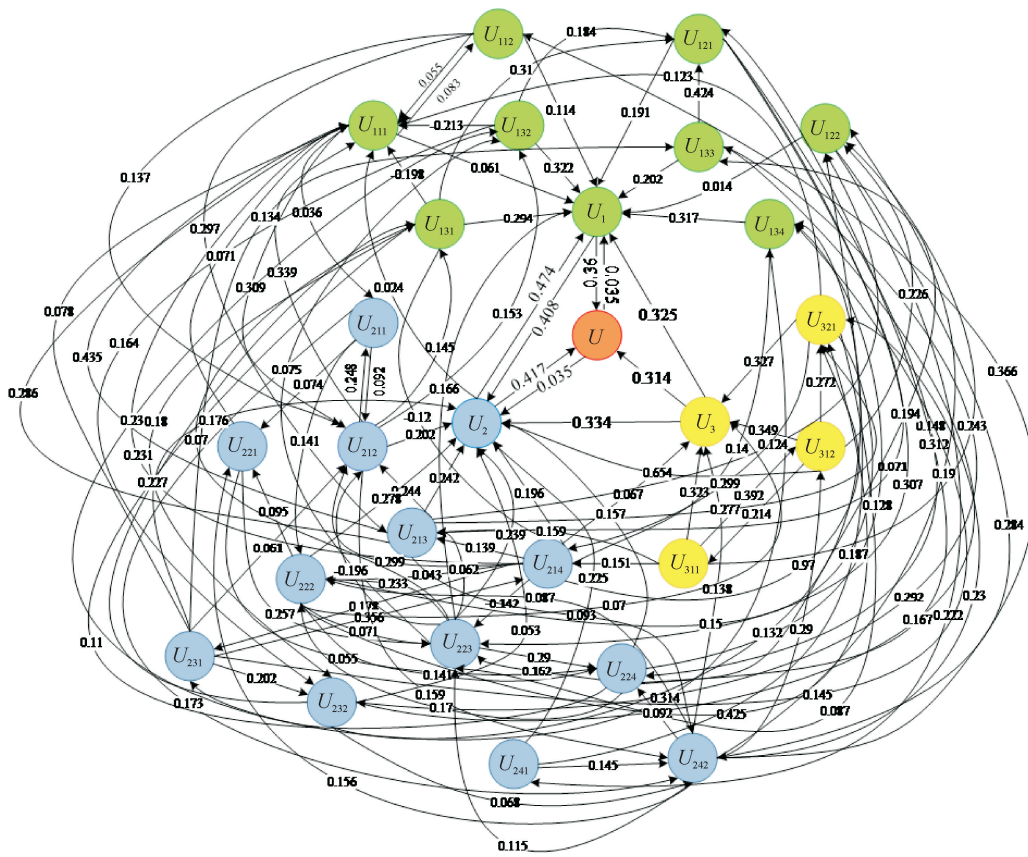


图3 地下综合管廊项目可持续性评价的最终动态模糊认知图

Fig. 3 Final dynamic fuzzy cognitive map for sustainability assessment of the utility tunnel project

图中节点代表影响综合管廊可持续性评价的指标。指标之间用连线表示因果关系,连线上的数值表示相关性强度,其绝对值越大,指标间的因果关系越强。数值符号表示原因指标对结果指标的作用效果,正号表示促进作用,即原因指标值增加,结果指标值也随之增加。

3.4 评价结果分析

3.4.1 可持续性能分析

为深入探究指标在因果关系下的变动情况,将指标的初始值和最终值绘制于雷达图中,如图4所示。

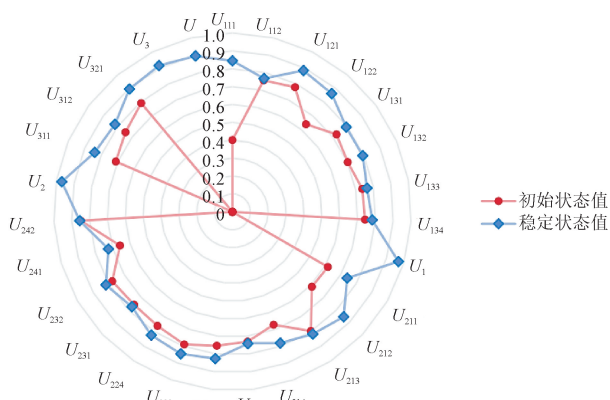


图4 初末时刻状态值雷达图

Fig. 4 Radar chart of values of the initial and final states

图4展示了各指标的可持续性评价等级。其中,指标 U_{111} 、 U_{121} 、 U_{122} 、 U_1 、 U_{212} 、 U_{213} 、 U_{222} 、 U_{223} 、 U_{224} 、 U_{232} 、 U_{242} 、 U_2 、 U_{311} 、 U_{312} 、 U_{321} 、 U_3 、 U 的可持续性评价等级均在V级,表明其可持续性较为理想;而 U_{112} 、 U_{131} 、 U_{132} 、 U_{133} 、 U_{134} 、 U_{211} 、 U_{214} 、 U_{221} 、 U_{231} 、 U_{241} 的可持续性评价等级均在IV级,也体现了较好的可持续性。容易发现,评价等级较低的指标主要集中在 U_2 (可持续性能力)的下级指标中,特别是 U_{241} (社会参与和反馈机制),其评价值的评分最低。因此,综合管廊项目的可持续发展能力仍有待提升,可通过完善公众参与机制,鼓励公众积极参与可持续发展事业,提升城市的可持续发展能力。

3.4.2 因果相关性变化分析

通过式(6)可计算出每一次迭代的相关性矩阵,利用 MATLAB 计算得到系统稳定状态的相关性矩阵。为分析主要指标间相关性强度的演变趋势,绘制各二级指标间初始和最终状态下的相关性强度值于雷达图中,如图5所示。

由图5可知,整体来看,各二级指标的相关性强度值在系统稳定时都有所减少,说明随着时间推移,各要素之间的关系变得更加协调和平衡,系统内部

的正反馈机制减弱。从可持续性状况 U_1 、可持续性能力 U_2 与可持续性协调度 U_3 的初始相关性强度的变化来看,系统趋于稳定时,可持续性协调度对可持续性水平和能力的影响减弱。因此,推进综合管廊项目可持续发展时,应注重前期规划和设计,加强利益相关方协调。

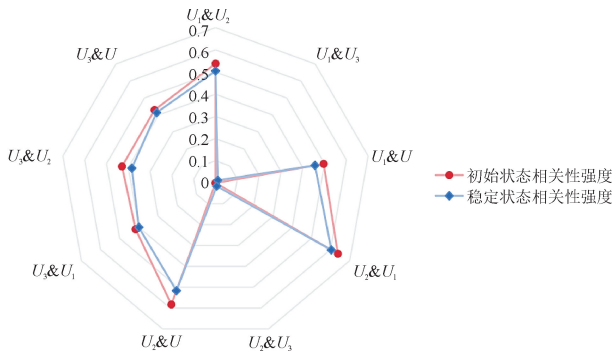


图5 初末时刻相关性强度雷达图

Fig. 5 Radar chart of correlation strength of the initial and final states

4 结 论

针对我国城市地下综合管廊项目建立了可持续性评价体系,并采用动态模糊认知图对综合管廊项目进行分析,主要结论如下。

1) 结合综合管廊的社会、经济、环境影响及可行性分析,从可持续性状况、可持续性能力和可持续性协调度3个维度,建立了包含23个评价指标的综合管廊项目可持续性评价体系,并确定了各评价指标的分级标准。

2) 采用三角模糊数法计算了指标的初始值与指标间的相关性矩阵,并引入Hebbian规则,构建了基于动态模糊认知图的综合管廊项目可持续性评价模型。该模型能对综合管廊项目的可持续性进行动态评价,这为评价综合管廊项目的可持续性水平提供了更为科学的方法。

3) 工程实例分析表明,该综合管廊项目可持续性评价等级为V级,但细分结果显示,其可持续性能力仍有提升空间。在稳定状态下,指标 U_{214} 、 U_{221} 、 U_{231} 、 U_{241} 的评价值较低,说明该项目的成本控制能力、技术创新能力、能源材料的利用水平较低,同时反馈机制也较为匮乏。针对此情况,项目管理方可采取相应措施:①建立健全的成本管理体系,明确责任分工和控制流程;②积极采用新技术、新工艺,提高项目技术水平;③加强对能源、材料的节约与利用,保护生态环境;④完善公众参与机制,提高社会认可度。

综合管廊的可持续发展是一个动态过程,在未来发展中,需要根据实际情况和研究进展同步修订和更新评价指标体系。此外,本文主要聚焦于中国城市地下综合管廊,且所建立的评价模型局限于单个管廊项目。鉴于不同综合管廊项目的可持续发展状况各异,下一步将着眼于中国特定地区综合管廊项目的可持续性评价。

参考文献:

- [1] 李蕾,庄璐. 我国综合管廊建设存在的问题及建议[J]. 工业建筑, 2023, 53(S02): 27-31.
- [2] 中国工程院战略咨询中心. 2023 中国城市地下空间发展蓝皮书[EB/OL]. (2024-01-12) [2024-06-14]. <https://www.planning.org.cn/news/view?id=15081>.
- [3] 白芙蓉,曾天浩,邵慧. 管廊 PPP 项目可持续性风险系统动力学仿真研究[J]. 财会月刊, 2020(16): 133-139.
- [4] 陈志远. 城市地下综合管廊 PPP 项目可持续性影响机理及提升策略研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2022. CHEN Zhiyuan. Research on the sustainability impact mechanism and improvement strategy of PPP project of urban underground comprehensive utility tunnel [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.
- [5] DIAZ-SARACHAGA J M, JATO-ESPINO D, CASTRO-FRESNO D. Methodology for the development of a new sustainable infrastructure rating system for developing countries (SIRSDEC)[J]. Environmental Science & Policy, 2017, 69: 65-72.
- [6] MATAR M, OSMAN H, GEORGY M, et al. A systems engineering approach for realizing sustainability in infrastructure projects[J]. HBRC Journal, 2017, 13(2): 190-201.
- [7] 宋佳慧,方玥,黄天健,等. 基于云模型的基础设施项目可持续性评价研究[J]. 价值工程, 2020, 39(24): 66-69. SONG Jiahui, FANG Yue, HUANG Tianjian, et al. Research on sustainability evaluation of infrastructure projects based on cloud model[J]. Value Engineering, 2020, 39(24): 66-69.
- [8] CHEN Hongyu, CHENG Shidong, QIN Yawei, et al. Sustainability evaluation of urban large-scale infrastructure construction based on dynamic fuzzy cognitive map[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141774.
- [9] ARRUDA L V R, MENDONÇA M, NEVES F, et al. Artificial life environment modeled by dynamic fuzzy cognitive maps[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2016, 10(1): 88-101.

- [10] 曾强. 城市综合管廊可持续发展评价研究——以珠海市横琴新区城市综合管廊为例[D]. 广州:华南理工大学, 2022.
- ZENG Qiang. Evaluation of sustainable development of urban utility tunnel: an example of urban utility tunnel in Hengqin New Area of Zhuhai City[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [11] 董蕴豪, 王威汐, 乔永康, 等. 多源时空数据驱动的城市地下空间规划范式变革趋向分析[J]. 现代城市研究, 2024, 39(4): 57-63, 93.
- DONG Yunhao, WANG Weixi, QIAO Yongkang, et al. The trend of paradigm shift of underground space planning in the context of multi-source spatiotemporal data[J]. Modern Urban Research, 2024, 39(4): 57-63, 93.
- [12] 唐兰. 构建综合管廊全生命周期技术标准体系的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S01): 41-50.
- TANG Lan. Research on the construction of technical standard system for the whole life cycle of utility tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(S01): 41-50.
- [13] 安玉华, 杜影泽. 基于 AHP-灰色关联度分析的我国城市综合管廊运维风险研究[J]. 陶瓷, 2023(11): 195-199.
- AN Yuhua, DU Yingze. Research on operation and maintenance risk of urban integrated corridor based on AHP-grey relational analysis [J]. Ceramics, 2023 (11): 195-199.
- [14] STACH W, KURGAN L. Parallel fuzzy cognitive maps as a tool for modeling software development projects[C]. IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information, 2004: 28-33.
- [15] KAUR M, HEWAGE K, SADIQ R. Integrated level of service index for buried water infrastructure: selection and development of performance indicators [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 68: 102799.
- [16] REN Y H, XIONG Y, YAN Y H, et al. A smooth approximation approach for optimization with probabilistic constraints based on sigmoid function[J]. Journal of Inequalities and Applications, 2022, 2022(1): 38.
- [17] SHARMA A, TSELYKH A, PODOPLELOVA E, et al. Knowledge-oriented methodologies for causal inference relations using fuzzy cognitive maps: a systematic review [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 171: 108500.
- [18] 王成月. 模糊认知图的快速学习及在数据分类中的应用[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- WANG Chengyue. Fast learning of fuzzy cognitive map and its application in data classification[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [19] 刘晓倩, 张英俊, 秦家虎, 等. 模糊认知图学习算法及应用综述[J]. 自动化学报, 2024, 50(3): 450-474.
- LIU Xiaoqian, ZHANG Yingjun, QIN Jiahu, et al. A review of fuzzy cognitive map learning algorithms and applications[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50 (3): 450-474.
- [20] YAZDANI M A, HENNEQUIN S, ROY D. Dynamic supplier selection based on fuzzy cognitive map[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 959-964.
- [21] 陈宁, 王磊, 彭俊洁, 等. 基于模糊认知网络的改进非线性 Hebbian 算法[J]. 控制理论与应用, 2016, 33 (10): 1273-1280.
- CHEN Ning, WANG Lei, PENG Junjie, et al. Improved nonlinear Hebbian learning algorithm based on fuzzy cognitive networks model[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(10): 1273-1280.

(责任编辑 周 蓓)