



# Research on Community Resilience Improvement Path Based on Fuzzy Cognitive Map

Weijing LIANG\*, Ye XUE, Ying LI, Hao Dong WU, Jing XU

*School of Economics and Management, Taiyuan University of Technology*

\*Corresponding author. Email: [liangweijing99@163.com](mailto:liangweijing99@163.com)

## ABSTRACT

It has become more important to build more inclusive, flexible and resilient communities to effective disaster prevention and mitigation, as global disaster risks increase. Based on the definition of the concept of community resilience, this paper intends to analyze the influencing factors of community resilience systematically, to screen the key paths for community resilience improvement by method DEMATEL and the maximum average difference entropy, then the fuzzy cognitive graph model will be used to simulate and analyze the effective improvement path of community resilience. Research shows that: the important influencing factors of community resilience can be divided into three categories: input factors, mediation factors and output factors, according to their nonlinear relationship. And input factors are the core factors that should be taken seriously. Based on input factors, four key paths that affect the improvement of community resilience are screened out. Finally, the fuzzy cognitive graph model can be used to further determine the path that can effectively improve community resilience. Scientific understanding of the key influencing factors and development paths of community resilience under the new risk situation is of great practical significance for accurately improving the level of community resilience and protecting the safety of residents' lives and properties.

**Keywords:** Community resilience, DEMATEL, Maximum average difference entropy method, fuzzy cognitive map.

## 基于模糊认知图的社区韧性提升路径研究

梁伟静\*, 薛晔, 李莹, 吴浩东, 徐菁

太原理工大学 经济管理学院

\* 通讯作者. 电子邮箱: [liangweijing99@163.com](mailto:liangweijing99@163.com)

## 摘要

随着全球灾害风险的增加, 构建更具包容性、灵活性和成长性的韧性社区成为当前有效开展防灾减灾工作的关键。本文拟在界定社区韧性概念的基础上, 系统的分析社区韧性影响因素, 利用 DEMATEL 方法和最大平均差熵法筛选社区韧性提升的关键路径, 并借助模糊认知图模型对社区韧性有效提升路径进行仿真分析。研究发现: 根据影响因素间的非线性关系可将其分为输入型因素、中介型因素和输出型因素三类, 其中输入型因素是影响社区韧性建设的核心因素, 以输入型因素为起点可筛选出影响社区韧性提升的四条关键路径, 最后借助模糊认知图模型可进一步确定能够促进社区韧性有效提升的路径。新风险形势下科学认识社区韧性关键影响因素和发展路径, 对于精准提升社区韧性水平, 保护居民的生命财产安全具有重要的实际意义。

**关键字:** 社区韧性, DEMATEL, 最大平均差熵法, 模糊认知图。

## 1. 引言

我国是世界上受灾害影响最严重的国家之一, 灾害种类多, 地域分布广, 发生频率高, 灾害损失重, 灾害风险高是我国的基本国情。与此同时, 中国广大城市整体设防水平偏低, 广大农村牧区对地震、台风、洪水、干旱和火灾几乎无设防, 设防水平低和居民风险意识及自救能力不足是造成我国“小灾大害”现象易发的主要原因。全面提升国家综合防灾减灾救灾能力, 是有效规避灾害风险、实现可持续发展的有力支撑。借鉴薛澜教授的观点, 吸取教训和加强准备已不足以应对愈发复杂的社会风险状况。构建更具包容性、灵活性和成长性的韧性社区成为新时期防范和化解重大灾害风险的关键。

目前, 国内关于社区韧性建设的研究主要有: 廖茂林等<sup>[1]</sup>结合国际韧性社区建设的经验, 从顶层制度设计、社区公共空间、城市规划与社区治理、科技与生态关注以及自组织能力等方面提出了我国韧性社区建设建议; 赵鹏震等<sup>[2]</sup>基于对韧性社区及其评估框架和应急管理体制机制的认识, 提出从主体责任、动态研判、监测预警、社区管理、治理模式及引导机制等方面加强雄安新区韧性社区建设; 周霞等<sup>[3]</sup>基于复杂适应系统理论剖析了韧性社区的基本特征, 分类别提出雄安新区城市社区韧性提升策略; 马焯<sup>[4]</sup>结合新冠肺炎疫情危机应对实践认为我国社区韧性建设存在防救转换失灵、上下联动失衡、开闭模式滞后等不足, 应当从理念、制度和科技等方面加强社区韧性建设; 蓝煜昕和张雪<sup>[5]</sup>基于对新冠肺炎疫情中社区抗疫的观察探讨了社区韧性的四大来源及其作用机制, 并据此给了社区韧性建设的政策启示。

综上, 我国关于社区韧性的研究主要集中于经验介绍、理论分析、案例研究及体制机制等方面, 局限于定性分析, 量化路径筛选和提升路径仿真研究较少, 不能满足资源有限和灾害不可逆转前提下的社区精准防灾减灾管理需求。因此, 本文拟在社区韧性概念界定及内涵分析的基础上, 借助模糊认知图原理构建系统性的社区韧性动态演化模型, 并结合 DEMATEL 方法和最大平均差熵法探究社区韧性动态演化的关键影响路径, 最后借助模糊认知图模型对不同情境下社区韧性动态演化态势进行仿真分析, 并基于仿真结果提出有效的社区韧性提升对策建议。

## 2. 社区韧性

目前, 学界对社区适灾韧性尚无统一定义, 但多从结果、过程和能力角度切入。例如, Mileti<sup>[6]</sup>、UNISDR<sup>[7]</sup>等从结果的角度将社区韧性界定为系统对

扰动冲击的成功适应或能力的跃迁; Bruneau 等<sup>[8]</sup>、Norris 等<sup>[9]</sup>从过程的角度将社区韧性界定为系统适应能力提升或成功适应灾害的过程; Cutter 等<sup>[10]</sup>、FEMA<sup>[11]</sup>等从能力的视角将社区韧性界定为系统对灾害的抵御、吸收、恢复和适应能力。综合分析可知, 上述定义存以下共识: 社区韧性作用的发挥贯穿于灾害应对的全过程, 并能够维持社区基本结构和功能, 社区韧性需要内外部、物质意识等各种资源的支撑, 社区韧性强调自我救助和自我适应的能力<sup>[12]</sup>。

基于上述分析, 本文认为社区适灾韧性是指社区在面临突发或累积型危机冲击的整个过程中, 能够充分发挥内生优势配合外界援助有计划的开展自救互助活动, 以将遭受的风险和损失降至可接受的低水平并实现快速恢复和未来适应性跃升的能力。这种能力可细化为社区应对灾害的稳定能力、恢复能力和适应能力。

目前, 国内外关于社区韧性的影响因素研究集中于资源能力视角。例如, Cutter 等<sup>[13]</sup>提出社区韧性包含社会、经济、社区、基础设施、房屋建筑物和环境六个维度; 朱华桂<sup>[14]</sup>认为社区抗逆力的关键指标可归结为物理因素、制度因素、人口因素和经济因素; 杨威<sup>[15]</sup>则主张从情景认知能力、抗灾能力、转化能力、社会资本和脆弱性等方面考察社区柔韧性; 胡曼等<sup>[16]</sup>在我国引入了包含联系与关怀、拥有的资源、变革的潜力、灾难的管理及信息与沟通等维度的社区抗逆力评价表 (CART)。基于以上分析, 本文拟从社会维度、物理维度、环境维度、经济维度、管理维度和意识维度构建社区韧性评价概念模型, 具体可表示为:

$$RI = f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6)$$

其中,  $RI$  代表社区韧性水平,  $C_1$  表示社会维度韧性影响因子, 主要考察社区的人力资本和网络资本;  $C_2$  表示物理维度韧性因子, 主要考察灾害相关设施的安全性和有效性;  $C_3$  表示环境维度韧性因子, 主要考察环境设施的稳定性和可用性;  $C_4$  表示组织管理维度韧性因子, 主要考察居委会、物业公司、第三方服务机构等主要管理者的组织能力和处置能力;  $C_5$  表示经济维度韧性因子, 主要考察居民的承灾能力和恢复能力;  $C_6$  表示防灾意识维度韧性因子, 主要考察居民的自救能力和互助能力。围绕上述模型梳理社区韧性影响因素体系 (见表 1)。

表 1 社区适灾韧性影响因素

一级指标	二级指标	三级指标
RI 社区韧性	C1 社会韧性	C11 老年人口比重
		C12 高中以上人口比重
		C13 社区网络资本
	C2 物理韧性	C21 老旧房屋比例
		C22 人均有效避难面积
		C23 避难场所与的连通性
	C3 环境韧性	C31 绿地率
		C32 水体面积比例
		C33 周边高危设施分布
	C4 组织韧性	C41 清单建设
		C42 组织建设
		C43 日常管理水平
	C5 经济韧性	C51 车辆房屋占有比例
		C52 稳定收入比例
		C53 物资储备能力
	C6 防灾意识	C61 居民的灾害风险意识
		C62 宣传演练人员覆盖率
		C63 宣传演练技能覆盖度

注：上述指标主要来自于参考文献[12-13,17-18]以及国家减灾委员会办公室 2010 年发布的《全国综合减灾示范社区标准》。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 模糊认知图模型

模糊认知图 (Fuzzy Cognitive Map, 简称 FCM) 将模糊逻辑与神经网络相结合, 基于模糊推理规则来表达多方参与的、具有反馈的动态因果关系。基于该方法能够科学预测系统发展变化趋势, 辨别系统发展变化的关键影响因素, 并对不同情境下的系统发展状况进行仿真分析<sup>[19-20]</sup>。因此, 本文拟利用该方法进行社区韧性动态演化路径及提升情景仿真分析。

##### 3.1.1. 模糊认知图的基本结构

在社区韧性模糊认知图模型中, 假设  $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  表示系统中影响社区韧性的  $n$  个概念节点,  $A_i^t$  为各概念节点在  $t$  时刻的状态值,  $A_i^t \in [0,1]$ 。有向边  $\langle c_i, c_j \rangle$  表示节点  $c_i$  和  $c_j$  之间的因果关系,  $w_{ij}$  表示有向边的权值,  $w_{ij} \in [-1,1]$ , 若  $w_{ij} > 0$ , 则表示  $c_i$  对  $c_j$  产生正向促进作用; 若

$w_{ij} = 0$ , 则表示  $c_i$  对  $c_j$  不存在因果关系; 若  $w_{ij} < 0$ , 则表示  $c_i$  对  $c_j$  产生抑制作用, 用  $w_{ij}$  绝对值的大小表示因果关系的强弱, 邻接矩阵为  $W = [w_{ij}]_{n \times n}$ 。

##### 3.1.2. 模糊认知图的推理机制

假设  $A_i^t$  和  $A_i^{t+1}$  分别表示概念节点  $c_i$  在  $t$  和  $t+1$  时刻的状态值,  $w_{ji}$  表示节点  $c_j$  对  $c_i$  的影响程度, 则概念节点  $c_i$  在  $t+1$  的状态值受  $t$  时刻的状态值和其他节点对其的作用的共同影响, 即:

$$A_i^{t+1} = f(A_i^t + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_j^t w_{ji}) \quad (1)$$

其中, 阈值函数  $f(\cdot)$  将迭代的结果限制在  $[0,1]$  或  $[-1,1]$  内。为将概念节点的值映射到  $[0,1]$  内, 通常选择 S 型曲线函数作为阈值函数, 即:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

当状态值稳定于固定点或有限循环时停止迭代, 即可求得系统在当前条件下的未来发展趋势。算法迭代过程停止需同时满足代表系统最终状态的输出值与平均值间的差异最大化及相邻时间的系统输出值差异最小化两个条件。

##### 3.1.3. 非线性 Hebbian 权值优化算法

由于依赖专家经验取得的邻接矩阵存在主观性强的隐患, 本文将基于非线性 Hebbian 学习算法对初始邻接矩阵进行权值优化, 以获得最终的优化矩阵<sup>[21-22]</sup>。权值优化公式如下:

$$w_{ji}^t = \gamma \cdot w_{ji}^{t-1} + \eta A_i^{t+1} (\eta A_i^{t+1} - \text{sgn}(w_{ji}) w_{ji}^{t-1} \cdot A_i^{t-1}) \quad (3)$$

其中,  $\eta (0 < \eta < 0.1)$  和  $\gamma (0.9 < \gamma < 1)$  分别为学习效率和权重衰减系数, 具体取值可借助试错法求解。

### 3.2. 最大平均差熵法

在影响因素众多、影响关系复杂的系统分析中, 选择合适的阈值筛选关键影响关系能够简化分析过程并保障结果的准确性。根据信息理论, 平均差熵最大的节点集合是能够有效提供所需信息的最小集合<sup>[23]</sup>。因此, 引入最大平均差熵以获取合理阈值简化因果关系图, 具体步骤如下:

Step 1: 计算系统信息熵:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (4)$$

Step 2: 计算系统的差熵:

$$H^- = H_{\max} - H \quad (5)$$

Step 3: 计算系统平均差熵。

$$H^a = H^- / n \quad (6)$$

其中,  $H$  表示系统的熵值,  $H_{\max}$  表示系统最大熵,  $H^-$  表示系统差熵,  $H^a$  表示系统平均差熵。 $p_i$  表示各因素对应的概率,  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。当  $p_i = 0$  时,  $p_i \ln p_i = 0$ 。当  $p_1 = p_2 = \dots = p_n$  时, 系统的信息熵最大, 即  $H_{\max}(p_1, p_2, \dots, p_n) = H(1/n, 1/n, \dots, 1/n)$ 。本文利用公式 (7) 和各指标的影响度计算其概率。

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0.0000 & -0.110 & 0.1261 & 0.0000 & 0.0000 & -0.177 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.067 & -0.100 & -0.091 & 0.0611 & -0.078 & 0.0000 & -0.171 & -0.179 & 0.0886 & -0.062 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1005 & 0.0000 & 0.0455 & 0.1766 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0597 & 0.0977 & 0.1168 & 0.1134 & 0.1133 & 0.1093 & 0.0480 & 0.1549 & 0.1360 & 0.0958 & 0.0655 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0879 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0105 & 0.0681 & 0.0658 & 0.0647 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0717 & 0.0763 & 0.0000 & 0.0465 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.104 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.014 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0917 & -0.018 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0325 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0683 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0472 & 0.0000 & 0.0466 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0147 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0553 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0607 & 0.0155 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0630 & 0.0856 & -0.023 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1046 & 0.1238 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0702 & 0.0678 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0809 & 0.0883 & 0.0998 & 0.1017 & 0.0523 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0844 & 0.0000 & 0.1157 & 0.1415 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1180 & 0.0000 & 0.0762 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0949 & 0.0974 & 0.1120 & 0.1133 & 0.0661 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0731 & 0.0000 & 0.1245 & 0.1527 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1232 & 0.0915 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1032 & 0.1191 & 0.1241 & 0.1190 & 0.0664 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1281 & 0.0000 & 0.0410 & -0.1192 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0992 & 0.0475 & 0.1285 & 0.1224 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0971 & 0.1365 & 0.1032 & 0.0535 \\ 0.0000 & 0.1045 & 0.0958 & 0.0000 & 0.0479 & 0.1350 & 0.0512 & 0.0443 & 0.0710 & 0.0966 & 0.1191 & 0.1139 & 0.1202 & 0.0000 & 0.1198 & 0.1497 & 0.1596 & 0.1221 & 0.0716 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0304 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1452 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1210 & 0.1198 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1380 & 0.1378 & 0.0657 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0950 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0590 & 0.0621 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0785 & 0.0000 & 0.0407 & 0.0631 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0419 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0556 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$p_s = \sum_{i=s} w_{ij} / \sum_i w_{ij} \quad (7)$$

## 4. SL 社区韧性提升路径研究

### 4.1. 社区韧性影响因素分析

#### 4.1.1. 邻接矩阵的确定

邀请专家按照 5 级评价标准对因素间的相互影响关系进行判断和量化, 并通过模糊处理方法降低语言判断的模糊不确定性, 然后借助 DEMATEL 方法的计算原理综合群体专家意见可得反映指标间综合影响关系的全关系矩阵  $W_1$ 。对全关系矩阵做如下修正: 剔除数据中小于指标本身影响的值, 对指标间的相互影响方向进行判断, 并结合非线性 Hebbian 权值学习算法可求得矩阵最优权值矩阵  $W_2$ 。

#### 4.1.2. 中心度和原因度分析

以因素间的全关系矩阵为基础, 取第  $i$  行之和为变量  $c_i$  的输出端数, 反映该变量对其它变量的影响强度。取第  $i$  列之和为变量  $c_i$  的输入端数, 反映该变量受其它变量的影响强度。取变量输出端数与输入端数之和为该变量的中心度, 用以综合反映该变量在社区韧性系统中的活跃程度。为了更清晰地进行重要影响因素的判断和分析, 仅将大于平均中心度 1.6287 的指标作为重点研究对象 (见表 2)。

表 2 社区韧性重要影响因素分析

指标	输出端	输入端	中心度
C11	1.5714	0.1798	1.7512
C12	1.6651	0.4355	2.1006
C13	0.7084	1.0012	1.7096
C23	0.1797	1.7962	1.9759
C41	1.0060	0.9396	1.9456
C42	1.2645	1.2080	2.4725
C43	1.3538	1.1176	2.4714
C51	1.3103	0.5117	1.8220
C52	1.8391	0.4023	2.2414
C61	1.0805	1.3590	2.4395
C62	0.6064	1.5566	2.1630
C63	0.2626	1.4501	1.7127

由表 2 可知，以平均中心度 1.6287 为界确认的社区韧性重要影响因素多达 12 个，由于资源的有限性，在一定的时空范围内，社区韧性提升的核心关注点是有限的。因此，为了提高资源投放的效率效果，将基于上述分析和最大平均差熵法进一步筛选关键影响因素及路径。

#### 4.2. 社区韧性关键路径分析

基于全关系矩阵  $W_1$  确定选取影响路径的阈值。首先，将  $W_1$  转化成有序集合  $W_1^* \{w_{111}, w_{112}, \dots, w_{1mm}\}$ ，按照  $w_{ij}$  的值从大到小顺序排列，并转化为有序实数对集合  $W_1^*(w_{ij}, x_i, x_j)$ ；其次，提取有序对中的第

二个元素，形成信息发送节点集合  $G$ 。提取有序对中的第三个元素，形成信息接收节点集合  $E$ ；第三，提取集合  $G$  中前  $m$  个元素形成新的集合  $G_m$ ，记  $G_m$  中不同元素个数为  $N(G_m)$ 。利用公式 (7) 和各指标的影响度计算其概率；接着，基于公式 (4) - (6) 计算集合  $G_m$  的平均差熵，并确定包含最大发送度信息量的集合  $G_{max}$ 。同理可求得包含最大接收度信息量的集合  $E_{max}$ ；最后，取  $W_1^*$  中包含  $G_{max}$  和  $E_{max}$  中所有元素的子集  $W_1^{th}$ ，则  $W_1^{th}$  中的最小影响值即为阈值，据此构建包含最大有用信息量的最小影响图作为关键因素间关联性分析的基础（见表 3 及表 4）。

表 3 社区韧性影响因素发送节点阈值分布计算结果

步骤	结果
有序实数对集合 $W_3^*$	[(0.2031,C12,C23), (0.1982,C11,C62), (0.1956,C11,C23), (0.1894,C11,C61), (0.1836,C52,C62), (0.1781,C12,C61), (0.1767,C43,C23), (0.1722,C52,C61), (0.168,C61,C23), (0.1638,C42,C23), ....., (0.004,C33,C33), (0.0024,C21,C21), (0.0022,C32,C32), (0.0021,C31,C31)]
有序发送节点集 $G$	{C12, C11, C11, C11, C52, C12, C43, C52, C61, C42, C61, C61, C51, C12, C52, ....., C33, C21, C32, C31}
平均差熵 $H^a$	{0.0000, 0.0000, 0.0260, <b>0.0609</b> , 0.0501, 0.0318, 0.0310, 0.0192, 0.0210, 0.0201, 0.0149, 0.0158, 0.0165, 0.0182, 0.0185, ....., 0.0135, 0.0135, 0.0135, 0.0135}
最大平均差熵 $H_{max}^a$	0.0609
发送节点子集 $G_{max}$	{C12, C11, C11, C11}={C12, C11}

表 4 社区韧性影响因素接收节点阈值分布计算结果

步骤	结果
有序实数对集合 $W_3^*$	[(0.2031,C12,C23), (0.1982,C11,C62), (0.1956,C11,C23), (0.1894,C11,C61), (0.1836,C52,C62), (0.1781,C12,C61), (0.1767,C43,C23), (0.1722,C52,C61), (0.168,C61,C23), (0.1638,C42,C23), ....., (0.004,C33,C33), (0.0024,C21,C21), (0.0022,C32,C32), (0.0021,C31,C31)]
有序接收节点集 $E$	{C23, C62, C23, C61, C62, C61, C23, C61, C61, C23, C23, C62, C63, C62, C62, ....., C33, C21, C32, C31}
平均差熵 $H^a$	{0.000, 0.0000, 0.0288, 0.0213, 0.0157, 0.0002, 0.0074, 0.0049, 0.0119, 0.0212, 0.0108, 0.0337, 0.0332, 0.0353, 0.0397, 0.0477, <b>0.0483</b> , 0.0394, 0.0396, ....., 0.0111, 0.0111, 0.0111, 0.0111}
最大平均差熵 $H_{max}^a$	0.0483
接收节点子集 $E_{max}$	{C23, C62, C23, C61, C62, C61, C23, C61, C23, C23, C62, C63, C62, C62, C23, C42, C13}={C23, C62, C61, C63, C42, C13}

根据表 3 和表 4, 因果关系图中应重点展示的  $W_1^*$  的子集  $W_1^{th}$  为  $\{(0.2031, C_{12}, C_{23}), (0.1982, C_{11}, C_6 2), (0.1956, C_{11}, C_{23}), (0.1894, C_{11}, C_{61}), (0.1836, C_{52}, C_{62}), (0.1781, C_{12}, C_{61}), (0.1767, C_{43}, C_{23}), (0.1722, C_{52}, C_{61}), (0.168, C_{61}, C_{23}), (0.1638, C_{42}, C_{23}), (0.1597, C_{61}, C_{62}), (0.1595, C_{61}, C_{63}), (0.1574, C_{51}, C_{62}), (0.1564, C_{12}, C_{62}), (0.1553, C_{52}, C_{23}), (0.1481, C_{51}, C_{42}), (0.1477, C_{51}, C_{13})\}$ 。其中, 带着重符号的节点序号为必须包含的发送或接收节点首次出现在  $W_1^{th}$  中的地方, 集中中最小影响度 0.1477 即为要展示于因果图中的关系阈值。根据以上结果绘制社区韧性核心节点影响关系图 (见图 1)。

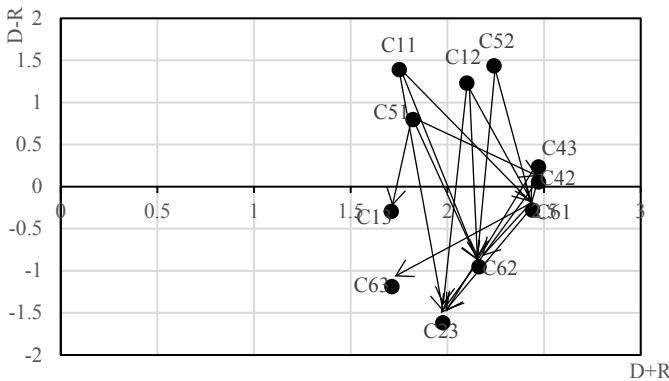


图 1 社区韧性影响因素关键路径分析

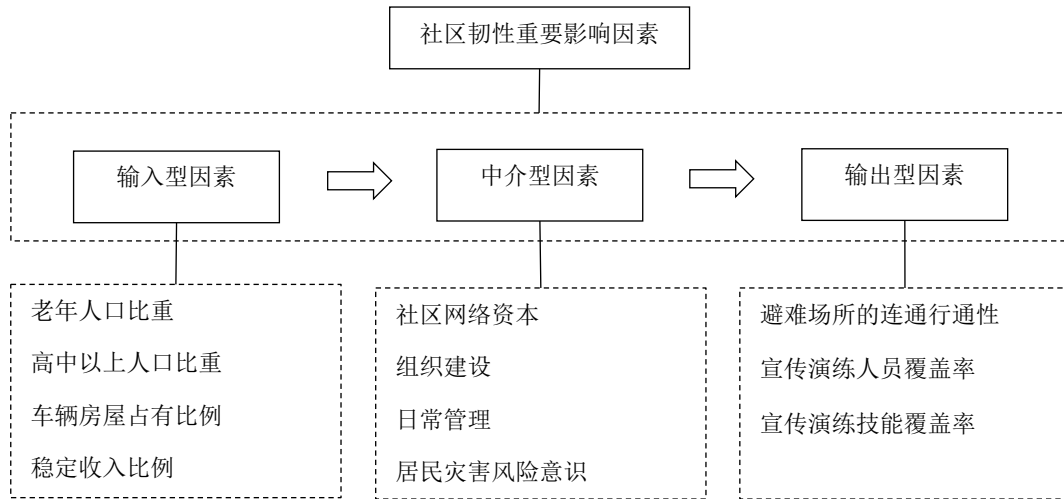


图 2 社区韧性重要影响因素功能性分类

为了便于对社区韧性影响路径进行更系统地分析, 在基础路径图上添加辅助影响线并以虚线进行表示, 可得社区韧性关键影响路径包括:

- (1) “C11—C61—C62、C23、C63”

通常, 居民的风险意识、学习能力和身体机能会随着年龄的增长逐步下降, 这导致其缺乏对防灾

根据图 1 可知, 属于重要发送点的节点有老年人口比重、高中以上人口比重、稳定收入比例和车辆房屋占有比例。属于重要接受点的节点有避难场所与的连通性、宣传演练人员覆盖率、宣传演练技能覆盖率。其中, 第一组因素反映了社区的抗压资本、应变资本、恢复资本和协作资本, 是开展社区防灾减灾工作, 提升社区适灾韧性的基础; 第二组因素可间接衡量社区防灾减灾工作开展的效果, 直接影响应灾活动的效率和效果。而其余因素在整个系统演化过程中处于承接并传送的中介作用, 包括社区网络资本、组织建设、日常管理水平及居民的灾害风险意识, 该类指标的表现受第一组因素的影响, 同时又影响着第二类因素的表现。由此, 可将重要影响因素按照其在社区系统韧性演化过程中所起的作用分为三类, 分别是输入型因素、中介型因素和输出型因素 (见图 2), 而重要输入型因素是社区韧性管理过程中应当重点关注的影响因素。

减灾宣传演练等活动的参与积极性和支持性, 对具体的防灾减灾工作安排的执行能力和配合程度不足, 将使得整个社区的韧性提升效果大打折扣。因而, 老年人口比重较高会对社区韧性建设的动员力度、宣传力度和人员物资储备提出较高的要求。同时, 也需要社区组织提供针对老年人特点的逃生自救技能培训和基础设施改造。

## (2) “C12—C61—C62、C23”

受教育程度的高低会直接影响居民的信息搜索能力、沟通能力以及对风险的辨别、逃生自救等技能的学习能力。教育程度较高的人群更容易通过网页、微博或社交 APP 信息推送等网络途径以及同学或同事间的交流等社会途径获取防灾减灾救灾等的信息，日常风险防范意识和自我约束能力较强，更容易配合社区的防灾减灾和宣传演练等工作的开展，在应急过程中也更容易与内外部救援组织进行协调与配合。因而，了解社区居民整体的受教育水平有助于防灾减灾工作的开展和自救互助力量的储备。

## (3) “C52—C61—C62、C23”

根据马斯洛的需求层次理论，生存和温饱等生理性需求得到满足之后，才会激发人们的安全、情感、尊重和自我实现等更高层次的需求。因此，稳定的收入来源是社区韧性提升的根基，经济条件的提升不仅使得居民更容易产生安全性需求，更有条件接受良好的教育，也使得居民在主观意愿上和客观实力都更有条件配合社区组织的防灾减灾工作安排，同时也使得社区在不幸遭受灾害损失后更容易从中恢复和重建。

## (4) “C51—C42、C43—C62、C23、C63”和“C51—C13—C62”

社区居民在本社区的车辆房屋占有情况也侧面反映了社区流动人口情况，综合来说主要会产生两方面的影响，一方面是本地居民更容易产生对社区组织的信任和监督需求，也能够为社区志愿组织建设提供可靠的人员资本支持，进而从供需两方面促进本社区组织建设的完善，进而使组织更好地提供防灾减灾培训服务，开展防灾减灾设施的管理维护工作；另一方面，本地居民间更容易产生长久的交流和联系，有助于社区网络资本的积累，不仅有利于本地区风险意识和风险识别能力的培养，而且有利于互助防灾减灾网络的形成。

### 4.3. 社区韧性提升路径仿真

#### 4.3.1. 数据收集

选取山西省太原市城区的 SL 社区作为研究案例，该社区为单位制老旧社区，占地面积约 19 万平方米，可容纳居民 3400 余户。根据研究需要，收集了各指标初始状态数据，定量指标通过社区调研和数据查询获取，定性指标通过走访相关工作人员和居民获取。对数据进行归一化整理之后可得 = (0.75, 0.25, 0.92, 0.92, 0.25, 0.25, 0.25, 0.08, 0.5, 0.75, 0.75, 0.25, 0.75, 0.92, 0.92, 0.25, 0.25, 0.08, 0.45)。

#### 4.3.2. SL 社区韧性演化趋势分析

输入邻接矩阵  $W_2$  和初始状态值  $A_i^{(0)}$ ，根据公式 (1) 至 (3) 进行仿真计算，经过 9 次迭代，系统逐渐趋于稳定（见图 3）。系统稳态值  $A_i^{(1)} = (0.6590, 0.6581, 0.7577, 0.6590, 0.7592, 0.7865, 0.6688, 0.6675, 0.7047, 0.7523, 0.7897, 0.7774, 0.7124, 0.6650, 0.7450, 0.7854, 0.8110, 0.8429, 0.7848)$ ，根据  $A_i^{(1)}$  的取值可知按照当前条件继续发展下去，SL 社区韧性处于中等偏上水平，为了进一步有效提升其韧性水平，需要对其关键影响因素和关键影响路径进行仿真分析。

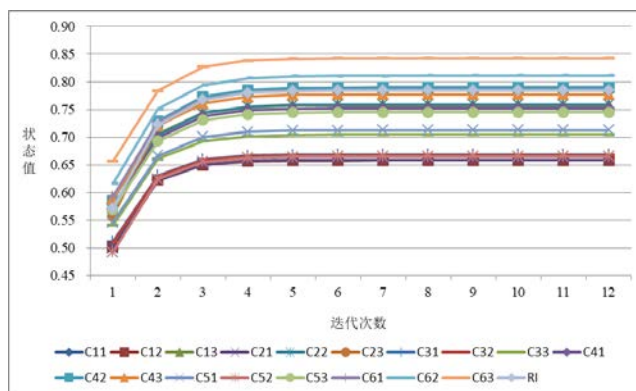


图 3 SL 社区韧性演化趋势

#### 4.3.3. SL 社区韧性提升路径仿真

结合 4.1 和 4.2 节的分析结果，选择核心指标老年人口比重、高中以上人口比重、车辆房屋占有比例和稳定收入比例作为设置仿真情景的基础。在仿真过程中将正向指标的期望值均设为 1，负向指标均设为 0，并输入优化矩阵，考察在不同情景下达到稳定态时，系统对各影响因素的敏感性（见表 5）。

由上述分析可知：

(1) 在社区韧性建设的初期，加强老年人口的应灾处理能力能够更好地促进该社区韧性的提升。由表 5 可知，伴随老年人口适灾韧性的提升，社区整体的风险意识、参与积极性、沟通理解能力和配合能力都有了比较大的提升。作为典型的老旧社区，老年人口比例较高为防灾减灾工作的顺利开展带来了较大的挑战。一方面，老年人口在风险意识、逃生技能、沟通学习及信息搜索等方面能力较差；另一方面，老年人口在闲暇时间、社会联结、生活经验等方面具有独特的优势。因此，激发老年人口的责任动机和安全动机，制定针对性的防灾减灾宣传培训方案，提升其风险意识和对防灾减灾政策的理解性，有助于提升社区整体的防灾减灾参与性、风险辨别和防范能力、信息沟通能力及逃生自救能力。



(2) 在社区韧性建设的中期, 关注稳定就业情况和教育水平是持续建设该社区韧性的关键。具有稳定收入的居民生活压力更小, 灾后恢复能力更强。从表 5 可以看出该指标对社区居民的教育水平、社区归属感、减灾设施维护、灾害风险意识、减灾工作的参与积极性等都会产生较大影响。可见, 稳定就业是社区韧性建设工作开展的基础性条件, 在防灾减灾工作过程中应当积极为失业者提供就业指导和服务, 为个体执业者提供安全生产指导和监督服务; 同时, 受到较高教育水平的群体对灾害信息和自救信息的搜寻能力和鉴别能力、应急处置时的沟通能力和反应能力以及对管理规则条约的理解和配合能力较强。同时, 受教育水平更高的居民通常更容易获得较好的工作机会及较高的收入水平, 根据马斯洛的需求层次理论这样的群体更容易产生危机意识和安全需求。因此, 社区韧性的持续提升要求居民受教育水平的整体提升。

表 5 SL 社区韧性提升路径仿真结果

指标	稳态值	稳态值变化量			
		C11 ↓	C12 ↑	C51 ↑	C52 ↑
C11	0.6590	-0.6590	0.0000	0.0000	0.0000
C12	0.6581	0.0211	0.3419	0.0000	0.0101
C13	0.7577	-0.0187	0.0082	0.0082	0.0078
C21	0.6590	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C22	0.7592	0.0013	0.0043	0.0031	0.0045
C23	0.7865	0.0253	0.0133	-0.0060	0.0104
C31	0.6688	0.0002	0.0002	0.0000	0.0049
C32	0.6675	0.0002	0.0001	0.0000	0.0042
C33	0.7047	0.0003	0.0058	0.0074	0.0066
C41	0.7523	0.0111	0.0085	0.0037	0.0083
C42	0.7897	0.0142	0.0091	0.0078	0.0091
C43	0.7774	0.0138	0.0093	0.0078	0.0091
C51	0.7124	-0.0094	0.0102	0.2876	0.0105
C52	0.6650	0.0152	0.0106	0.0000	0.3350
C53	0.7450	0.0015	0.0047	0.0004	0.0099
C61	0.7854	0.0234	0.0118	0.0062	0.0113
C62	0.8110	0.0219	0.0098	0.0077	0.0109
C63	0.8429	-0.0073	0.0061	0.0051	0.0073
RI	0.7848	0.0097	0.0057	0.0036	0.0061

(3) 在社区韧性建设的后期, 关注流动人口应灾处理能力能够针对性的弥补该社区韧性的不足。车辆房屋占有情况主要用来考察社区流动人口情况, 该类群体在生活水平和社区归属感方面显著不同于常住人口, 对社区防灾减灾管理、社区安全隐患、社区韧性规划等关注度以及参与配合的积极性等可

能较弱。并且流动人口带来的韧性建设问题随着人口的流动持续存在。因此, 针对该类问题的改善可能短期内效果不明显, 而且需要持续提升和关注。社区管理者在实际工作中应及时摸排流动人口分布情况, 并针对该群体特点制定防灾减灾培训计划, 帮助这类群体快速理顺社区防灾减灾角色关系、存在的安全隐患以及应急避难处置方案等。

## 5. 结论与建议

本文结合 FCM 模型和最大平均差熵法筛选确定了社区韧性动态演化的核心影响因素和关键影响路径, 并结合实际案例利用 FCM 模型的模糊推理规则对社区韧性的发展动态和提升路径进行了情景仿真研究。研究发现:

(1) 社区韧性的重要指标可按其功能分为三类, 分别是: 输入型指标, 中介型指标和输出型指标。其中, 输入型指标包括老年人口比重、高中以上人口比重、车辆房屋占有比例和稳定收入比例, 通过影响中介型指标传导至到输出型指标, 进而对社区整体韧性水平产生系统性影响, 是管理的核心;

(2) 社区韧性的关键影响路径有四条, 即: “老年人口比重—居民的灾害风险意识—难场所的连通性、宣传演练人员覆盖率和宣传演练技能覆盖度”; “高中以上人口比重—居民的灾害风险意识—避难场所的连通性、宣传演练人员覆盖率”; “稳定收入比例—居民的灾害风险意识—难场所的连通性、宣传演练人员覆盖率”; “车辆房屋占有比例—组织建设、日常管理水平和—难场所的连通性、宣传演练人员覆盖率”及“车辆房屋占有比例—社区网络资本—宣传演练人员覆盖率”。

(3) SL 社区韧性提升效果初期受因老年人口状态触发的路径影响较大, 中期受因居民受教育水平和稳定收入比例触发的路径影响较大, 后期受因车辆房屋占有情况触发的路径影响较大。因此, 针对老旧社区的韧性提升初期应集中力量提升老年人口的应灾处置能力, 韧性建设中期应关注教育的发展和就业情况的改善, 韧性建设后期应持续关注流动人口的应灾处置能力的改善。

针对以上研究结果提升社区韧性提升建议如下:

(1) 摸清居民短板, 提升社区软实力。根据关键影响因素和关键路径分析可知, 影响社区韧性水平的脆弱性人口主要包括老年人口、低教育水平人口、失业人口和流动人口。因此, 短时期内社区韧性建设工作应针对脆弱性人口制定针对性的宣传救助方案, 发掘该类群体的应灾优势, 提升该类群体的灾害应对能力。

(2) 协调管理群体, 培育韧性氛围。居委会和物业公司是社区的主要管理者, 其组织的完备性和工作水平在社区韧性建设过程中起着重要的中介作用。因此, 加强组织建设和物业接管, 强化管理人员的风险意识、服务意识和责任意识, 提升管理人员的业务与技能水平对社区韧性的提升具有十分重要的意义。



(3) 关注居民就业, 强化底线支撑。从长期来看, 经济基础决定上层建筑, 社区居民经济状况的持续改善会对社区韧性产生广泛影响。因此, 社区管理者应当切实关注社区居民的就业情况, 及时提供就业帮扶, 积极组织安全生产指导和监督, 以夯实社区韧性建设的经济根基。

## 参考文献

- [1] 廖茂林, 苏杨, 李菲菲. 韧性系统框架下的城市社区建设\*[J]. 中国行政管理, 2018, (4): 57-62.
- [2] 赵鹏霞, 朱伟, 王亚飞. 韧性社区评估框架与应急体制机制设计及在雄安新区的构建路径探讨\*[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(7): 12-17.
- [3] 周霞, 毕添宇, 丁锐, 等. 雄安新区韧性社区建设策略——基于复杂适应系统理论的研究[J]. 城市发展研究, 2019, 26(3): 108-115.
- [4] 马焯. 重大危机应对审视与韧性社区构建研究[J]. 价值工程, 2020, (20): 83-84.
- [5] 蓝煜昕, 张雪. 社区韧性及其实现路径: 基于治理体系现代化的视角[J]. 行政管理改革, 2020, (7): 73-82.
- [6] Mileti D, ed. Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States[M]. Washington, DC: Joseph Henry Press, 1999.
- [7] UNISDR. Living With Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives[M]. Geneva, Switzerland: United Nations, 2004.
- [8] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [9] Norris F H, Stevens S P, Pfefferbaum B, et al. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness[J]. American Journal of Community Psychology, 2008, 41(1): 127-150.
- [10] Cutter S L, Burton C G, Emrich C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2010(7): 23-25.
- [11] Federal Emergency Management Agency. Draft inter agency concept for community resilience indicators and national-level measures[R]. Washington D.C., 2016: 11-24.
- [12] 崔鹏, 李德智, 陈红霞, 等. 社区韧性研究述评与展望: 概念、维度和评价[J]. 现代城市研究, 2018(11): 119-125.
- [13] Susan L. Cutter \*, Kevin D. Ash, Christopher T. Emrich. The geographies of community disaster resilience[J]. Global Environmental Change, 2014(29): 65-77.
- [14] 朱华桂. 论社区抗逆力的构成要素和指标体系[J]. 南京大学学报(哲学.人文科学.社会科学版), 2013, (05): 68-74.
- [15] 杨威. 应急管理视角下社区柔韧性评估研究[D]. 大连理工大学, 2015.
- [16] 胡曼, 郝艳华, 宁宁等. 中文版社区抗逆力评价表(CART)信度和效度评价\*[J]. 中国公共卫生, 2017, 33(5): 707-710.
- [17] 黄海燕. 基于参考临界的社区抗逆力水平研究[D]. 南京大学, 2013.
- [18] 邓诗琪. 气候变化背景下城市社区雨涝灾害韧性测度研究——以南京市积善社区为例[D]. 南京工业大学, 2018.
- [19] 陈晔, 陈萌, 徐海燕, 等. 基于FCM-DEMATEL航班风险评估与改进[J]. 工业工程, 2017, 20(3): 1-8.
- [20] 吴赐联, 朱斌. 基于FCM的企业主流与新流创新动态绩效评价[J]. 科研管理, 2019, 40(11): 111-122.
- [21] Elpiniki I. Papageorgiou, Peter P. Groumpos. A weight adaptation method for fuzzy cognitive map learning[J]. Soft Comput, 2005, 9(11): 846-857.
- [22] E. I. Papageorgiou, C. D. Stylios, P. P. Groumpos. Unsupervised Learning Techniques for Fine-Tuning Fuzzy Cognitive Map Causal Links[J]. International Journal Human-Computer Studies, 2006(64): 727-743.
- [23] Lin C. L., Tzeng G. H. A value-created system of science (technology) park by using DEMATEL. Expert Systems with Applications, 2009(36): 9683-9697.

**Open Access** This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

