

地震应急预案体系超网络模型研究

朱国宾¹,刘明亮^{1,2},杨 依¹,邵媛媛¹,张 景¹

(1. 武汉大学遥感信息工程学院,湖北武汉 430079;

2. 中国电子学会,北京 100036)

摘 要: 分析了我国现行应急预案体系的特点与问题,提出了基于地域、主体和资源约束的应急预案体系超网络模型,并以汶川地震为研究案例,构建了相应的超网络模型并对此进行了超网络特征分析. 研究表明,本文所构建的超网络模型具有高的聚集系数和较小的平均路径长度,具有小世界效应,更好地揭示各层级预案间、同层级预案间的协同趋势,为同类研究提供较好的范例.

关键词: 应急预案体系; 超网络; 小世界效应; 地震; 汶川

中图分类号: C939 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1269-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.38

Research on a Hypernetwork Based Model for Emergency Response Plan System

ZHU Guo-bin¹, LIU Ming-liang^{1,2}, YANG Yi¹, TAI Yuan-yuan¹, ZHANG Jing¹

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

2. Chinese Institute of Electronics, Beijing 100036, China)

Abstract: This paper analyzes the characteristics and problems of the emergency response plan clusters in China, and establishes a Hypernetwork based model for emergency response plan clusters consisting of meta factors as area, subject and resource. Taking Wenchuan earthquake as a research case, the corresponding hyper-network model was constructed and some feature indexes of the hyper-network were analyzed. The results indicate that the model constructed in this paper has the high clustering property and a smaller average path length with small-world effects, revealing the synergetic trends among heterogeneous levels, homogeneous levels respectively, of the plan clusters, and providing a generic example for the similar research.

Key words: emergency response plan system; hypernetwork; small-world effects; Wenchuan earthquake

1 引言

近年来,我国政府和行业牵头,制定了大量的应急预案,形成了以针对各种应急事件的预案体系. 对我国现有应急预案体系的基础研究发现,应急预案间呈现自上而下的强行政层级关联,这种架构方式是由其编制方式带来的,对早期应急预案体系的快速架设起到了很好的作用. 但是时至今日,这种结构已发展成为应急预案功能的“桎梏”——先天的“行政分隔”,使得不同层级间、相同层级不同类别的应急预案间缺乏相互联系,很难做到在应急响应时的有效协同,因此,如何针对应急预案体系自身内在的联系,以有效协调为目标,

构建合理的驱动关系,是摆在研究者面前的一个新的课题.

从1988年开始,地震系统就探索编制地震应急预案,目前基本建立了从中央到地方,地震系统到其他行业的“纵向到底、横向到边、条块结合、结构完整”、管理相对规范的地震应急预案体系,以确保在地震事件发生时,形成从国家地震局到受灾省/市/县地震局、邻省地震局和其他应急相关部门间指挥、支援、配合救灾的应急预案联动服务运作机制体系. 同时,应急预案自身数字化进程也在不断推进:从最初的结构化、电子化,实现预案文本的简单组织管理,到现在的可视化、信息化,在结构化存储基础上进行流程推演^[1]. 目前,地震系统

内大多数已有预案的发布使用均通过纸质或是电子文档以简单的结构化形式呈现,形式内容固定,一方面增加了一线指挥人员的指挥调度难度,另一方面降低了真实应急过程中预案运作的实效性和内容的联动性。

目前将超网络的理论和方法用于应急预案体系的研究目前还比较少,研究的重点集中在利用超网络的多层特点针对应急响应流程建立超网络模型,并根据不同层节点的特征进行整合。汪靖等人提出了一种基于应急响应流程要素的超网络模型^[2]。刘学等人根据承灾体的状态建立主题-主体-任务-资源的多层次网络模型,从纵向、横向和整体的角度探讨基于主题要素的应急响应协同方式,并对该系统模式进行了协同评估^[3]。朱莉等人提出了城市群协调应急的超网络结构^[4]。曹杰等人提出由出救点、中转点和受灾点构成的多层级城市群应急协调超网络模型^[5]。以上超网络研究多集中在构建概念模型、结构模型以及数学模型等理论阶段。相对于复杂网络,超网络可以揭示同构网络多重关系和异构网络交互关系,能够很好地描述各个节点之间的相互作用和影响。但是上述研究对超网络分析方法的应用相对比较简单,面对更为复杂的系统,需要探求新的超网络手段进行研究。

2 基于超网络的应急预案体系

2.1 超网络的概念

超网络的概念有两种,第一种是1985年提出的基于图的超网络(Supernetwork)也可以称为基于网络的超网络,它是指网络嵌套网络的大型网络,大型网络中包含多个子网络,这些子网络都可以用图来进行表示^[6~8]。

第二种是基于超图(Hypergraph)的超网络(Hypernetwork)。本文所研究的超网络属于基于超图的超网络。超图中的超边可以连接两个以上的节点^[9,10]。Estrada等^[11,12]认为,凡是可以超图表示的网络就是超网络。

数学上超图的严格定义为:设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是一个有限集。若 $E_i \neq \Phi (i=1, 2, \dots, m)$, $\bigcup_{i=1}^m E_i = V$, 则称二元关系 $H = (V, E)$ 为一个超图。其中 V 的元素 v_1, v_2, \dots, v_n 称为超图的节点或者顶点, E 的元素称为超图的超边, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是超图的顶点集, $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ 是超图的超边集,集合 $E_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}\}$, ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 称为超图的超边,超边用一条包含该超边中所有元素的简单闭合曲线表示。如果 $|E_i| = c (i=1, 2, \dots, m)$, 则称超图 $H = (V, E)$ 为均匀超图。如果 $|E_i| = 2 (i=1, 2, \dots, m)$, 则超图 $H = (V, E)$ 退化为图。节点 v_i 的超度定义为包含该节点的超边条数。

如图1所示:在超图 H 中,节点集 $V = \{v_1, v_2, v_3,$

$v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9\}$;超边集 $E = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$;其中, $E_1 = \{v_1, v_2, v_3, v_9\}$, $E_2 = \{v_2, v_3, v_4\}$, $E_3 = \{v_4, v_5, v_6\}$, $E_4 = \{v_6, v_7, v_8, v_9\}$ 。

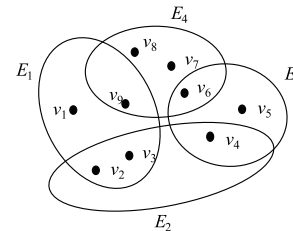


图1 超图的示意图

2.2 基于超网络的应急预案体系

基于超网络的应急预案体系,是指利用超网络这一研究工具,将应急预案体系抽象为一个由应急预案文本及其相互间的关系构成的超网络。首先,从应急预案面向的一般性问题出发,将各级各类的应急预案文本集合看作应对突发事件的知识的载体。对分布在不同行政地区或单位的应急预案的研究转化为对应急的一般知识的研究。而这些知识描述的核心内容包含——发生突发事件的地点,负责应急响应的主体,应急保障的人力、物力及财力。这三个核心要素便构成了应急预案体系中的三类重要要素,即地域(Area)——主体(Subject)——资源(Resource)。这三个不同性质的要素以及要素之间具有的关联关系,体现出多属性,多维度,多层次,多规则的特性。因此,因此我国的应急预案体系具有“网络的网络”的特征。

其次,运用超网络的理论对应急预案体系中复杂的关联关系进行描述和分析。并以汶川地震为研究案例,构建相应的超网络模型,揭示该应急预案体系内部的联系特征和驱动因素,为应急预案体系的协同效应最大化铺垫理论基础。借助地震应急预案体系超网络的超边分析,可更好地揭示各层级预案间、同层级预案间的协同趋势,便于我们进行聚类分析,划分凝聚子群,确定主体合作团体。

3 应急预案体系超网络模型

3.1 A-S-R 超网络模型构建规则

本模型是由三层子网络构成的超网络模型。地域子网(G_A)由应急预案所对应的地域要素(A)和地域要素间的关系(E_{A-A})构成;主体子网(G_S)由执行应急预案的最高责任部门(S),以及职能部门间的指导、合作、支持等关系(E_{S-S})构成;相应的,资源子网(G_R)是由保障应急预案实施的资源要素(R)和资源要素间的配合、支持、约束等关系(E_{R-R})构成。子网络间的两两映射关系(E_{A-S}, E_{S-R})分别表示主体对地域要素的管辖和对资源要素的支配关系。三层子网络通过超边(HE_{A-S-R})进

行关联,这些关联关系将三层子网络编织成了一个三要素超网络结构(ASR_{EPSN})^[13]:

$$ASR_{EPSN} = \{A, S, R, E_{A-A}, E_{S-S}, E_{R-R}, E_{A-S}, E_{S-R}, HE_{A-S-R}\}$$

3.2 超网络结构基本属性及其实际含义

根据以上规则建立的应急预案体系超网络模型,如图 2 所示,各层子网络及网络间的映射关系刻画了应急预案体系构成的内部机制。

如果用 V 表示各层节点的集合, HE 表示超边,则超网络模型也可映射为超图的一般形式: $G = (V, HE)$ 。

其中, HE 是各层子网节点间的纵向连边,即一个应急预案构成一条超边,多少个预案就是多少个超边。任意一条超边都是由一个地域节点、若干主体节点和资源节点构成的。实际含义为管辖地域节点 A_i 的行政职能部门主体 S_j , 在突发事件救援中调配了应急资源 R_m 。

如果两个节点属于同一条超边,则称这两个节点邻接。节点 V_i 的超度 $d_H(V_i)$ 定义为包含了该节点的超边的条数,即一个要素出现在不同应急预案中的次数;节点的超度表示节点在网络中的重要程度,一个要素被包含在越多的应急预案中,说明该要素为关键节点。

如果两条超边的交集不空,称之为这两条超边邻接。超边 HE_i 的度 $d(HE_i)$ 定义为与超边 HE_i 直接相邻的超边的条数。超边的度可反映应急预案在应急预案体系中的重要程度,超边的度越大,表示应急预案在应急预案体系中的位置越重要,越可能影响应急预案体系整体功能的发挥。

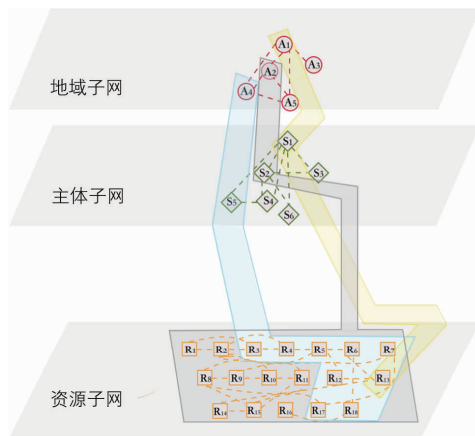


图2 应急预案体系超网络模型示意图

通过对超网拓扑结构性质的研究,可以将应急预案中抽象出来的三种要素,即地域、主体和资源进行划分,并用相关聚类算法^[14]进行计算,对应急预案体系核心结构进行挖掘分析。

4 研究实例

4.1 数据准备

2008年5月12日,四川汶川发生了8.0级特大地

震,地震应急预案体系在这次救灾中发挥了巨大作用,但也反映出了很多问题和不足。本文选取汶川地震为研究案例,根据地震波及的主要地区,收集国家级、省、市级的部门、专项应急预案。从这些应急预案中抽取关键要素,共涉及5个地域、6个主体和18种应急资源,依据3.1所述规则,建立应急预案体系超网络模型。

4.2 应急预案体系超网络结构特征

(1) 子网络分析

地域子网中包括国家、四川、甘肃、阿坝州和汶川。如图4(a)所示,汶川地震的影响地域不仅包括汶川县,而且包括相邻省份甘肃、阿坝州、延伸到四川省乃至更为广阔的地域。

主体子网指导和合作情况如图4(b)所示。主体 S_1 铁道部在子网中具有最大的指导度,它指导其他5个主体。整个主体子网的平均度为3.3,即每个行政职能部门平均与3.3个行政职能部门具有指导和合作关系。

应急资源子网包括勘测预报类、防护用品类、生命救助类、生命支持类、救援运载类、临时食宿类、污染清理类、动力燃料类、工程设备类、器材工具类、照明设备类、通信广播类、交通运输类、工程材料类、灾后重建类、心理健康安抚类、灾情统计、评估类和人员安置类18种应急资源(见图4(c))。应急资源子网中节点间以应急资源是否在同一应急预案中出现构造无向边,可以方便直观地体现出在应急预案中应急资源相互配合调配情况。

(2) 超网络体系特征分析

在图2中,被蓝色阴影覆盖的节点即组成一条超边(最左侧超边),该超边表示主体 S_5 所管辖的地域 A_4 ,主体 S_5 在地震灾害中需要调配的资源($R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_{12}, R_{13}, R_{17}, R_{18}$)。

中间超边和右侧超边包含了相同的应急资源,表明调配资源的主体 A_1 和主体 A_2 具有较高的合作可能性,因此这两个主体被视作潜在的主体合作团体。

三条超边虽然包括不同的地域和主体,但是都包括相同的应急资源 R_{13} , 应急资源 R_{13} 的超度为3,说明应急资源 R_{13} 被同时包含在三个应急预案中,这个应急资源有可能是关键人或核心资源,而关键人或核心资源有可能会对汶川地震救灾工作起关键作用。

(3) 平均最短路径与平均聚集系数

地震应急预案体系超网络中有29个节点,超边6条,任意两点间最短路径 $H_{l(i,j)}$ 分两种情况,即超边内任意两点间的最短路径为1,不在同一条超边内的任意两点间最多可以通过两条超边连通,所以不在同一条超边内的任意两点间的最短路径为2。通过公式 $H_l =$

$$\frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} H_{l(i,j)}$$

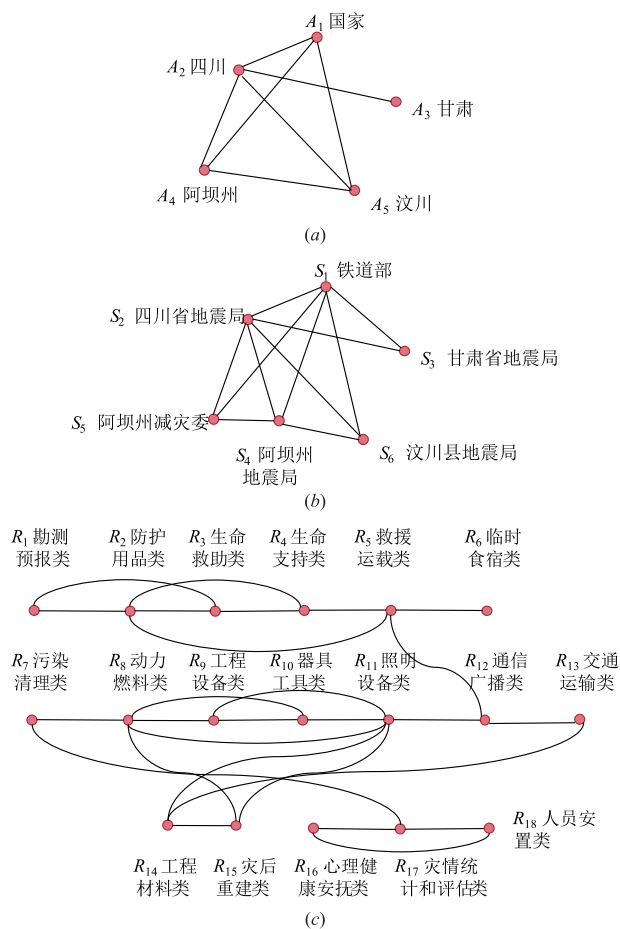


图3 子网络示意图

1.2,也就是说平均每个主体只需要经过不到2条超边就能和其它任何一个主体联系起来,这符合小世界效应。

网络整体密度大,节点之间联系紧密.该网络的平均聚集系数为0.93,表明与同一个要素相邻的两个要素通过超边相互连接的概率很高,例如不同应急预案中的主体,都会调用某个重要应急资源,而这几个主体具有互相合作关系的可能性很高,说明预案体系内在的衔接比较紧密。

5 结论与讨论

面向灾害启动的应急预案,不仅需要考虑灾害地域之间,应急预案执行主体之间,资源调配之间的横向相互影响作用,还需要考虑地域、主体和资源三者之间的纵向相互影响作用.超网络在汶川地震救援分析中的应用不仅从节点进行分析,而且可以对涉及的应急预案体系进行研究,从而更加全面的对汶川地震灾后救援工作进行评价.通过计算得出构建的超网络平均聚集系数为0.93,平均最短路径为1.2,具有高的聚集系数和较小的平均路径长度,表明应急预案体系超网

络具有一定的小世界效应,地震应急预案与其他相关预案衔接不紧密,主体之间相互协调调度指挥会存在问题;核心资源利用率高,但是非核心资源实际利用率不高.因此在不断完善地震应急预案的同时,应提高应急预案体系超网络的资源利用率,增强应急预案主体间的合作。

论文研究成果能够增强灾害的应急决策能力,为政府宏观层面和企业微观层面在应对重大灾害时的调度指挥方案提供新思路.本研究的下一步工作将从以下两个方面展开:①增加实例数据模型,尝试揭示应急预案体系超网络模型更一般的规律;②发掘可整合到应急预案体系超网络模型中的其他元素,丰富应急预案体系超网络子网的异质性。

参考文献

- [1] 张超,裴玉起,邱华.国内外数字化应急预案技术发展现状与趋势[J].中国安全生产科学技术,2010,6(5):154-158.
Zhang C,Pei Y Q,Qiu H. Current status and development trend of digital emergency plan at home and abroad[J]. Journal of Safety Science and Technology,2010,6(5):154-158. (in Chinese)
- [2] 汪婧,荣莉莉,蔡莹莹.基于复杂网络的应急预案体系演化模型[J].系统工程.2013,(3):123-130.
Wang J,Rong L L,Cai Y Y. Evolving model of emergency planning system in china based on complex network[J]. System Engineering. 2013,(3):123-130. (in Chinese)
- [3] 刘学.基于综合预案模型的应急响应协同研究[D].大连理工大学,2016.
Liu X. Research on Emergency Response Co-operation Based on Comprehensive Emergency Plan Model [D]. Dalian University of Technology,2016. (in Chinese)
- [4] 朱莉,杜雅清.城市群应急资源协调调配的超网络模型[J].数学的实践与认识,2015,45(16):27-37.
Zhu L,Du Y Q. Supernetwork model of urban agglomeration coordination for emergency resources allocation[J]. Mathematics in Practice and Theory,2015,45(16):27-37. (in Chinese)
- [5] 曹杰,朱莉.考虑决策偏好的城市群应急协调超网络模型[J].管理科学学报,2014,17(11):33-42.
Cao J,Zhu L. Super-network model of urban agglomeration emergency coordination considering decision preferences [J]. Journal of Management Sciences in China,2014,17(11):33-42. (in Chinese)
- [6] 席运江,党延忠,廖开际.组织知识系统的知识超网络模型及应用[J].管理科学学报,2009,12(3):12-21.
Xi Y J,Dang Y Z,Liao K J. Knowledge supernetwork model and its application in organizational knowledge sys-

- tems[J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(3):12-21. (in Chinese)
- [7] Sheffi Y. Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods[M]. NJ: PrenticeHall, 1985.
- [8] Wang N, Xu W, Xu Z, et al. A survey on supernetwork research: Theory and applications[A]. IEEE Xplore, Control Conference[C]. IEEE. 2016. 1202-1206.
- [9] Berge C. Graphs and Hypergraphs[M]. New York: Elsevier 1973.
- [10] 许小满, 孙雨耕, 杨山, 等. 超图理论及其应用[J]. 电子学报, 1994, (8): 65-72.
Xu X M, Sun Y G, Yang S, et al. Hypergraph theory with applications[J]. Acta Electronica Sinica, 1994, (8): 65-72. (in Chinese)
- [11] Estrada E, Juan A, Rodriguez V. Subgraph centrality and clustering in complex hyper-networks [J]. Physica A, 2006, 364: 581-594.
- [12] Ghoshal G, Zlatic V, Caldarelli G, et al. Random hypergraphs and their applications [J]. Phys. Rev. E, 2009, 79(6): 066118(10).
- [13] 刘明亮, 邵媛媛, 张景, 等. 基于超网络理论的应急预案体系模型构建及实证研究 [J]. 技术经济, 2017, 36(11): 86-92+100.
Liu M L, Tai Y Y, Zhang J, et al. Construction and empirical research on emergency plan system based on hypernetwork theory [J]. Technology Economics, 2017, 36(11): 86-92+100. (in Chinese)
- [14] 王进, 刘彬, 张军, 等. 用于微阵列数据分类的子空间融合演化超网络 [J]. 电子学报, 2016, 44(10): 2308-2313.
Wang J, Liu B, Zhang J, et al. Classification of microarray data using evolutionary hypernetworks with subspace fusion [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(10): 2308-2313. (in Chinese)

作者简介



朱国宾 教授, 男, 1965 年 11 月生, 江苏如皋人. 武汉大学遥感信息工程学院空间信息与数字技术系主任. 研究方向包括遥感影像分析与理解、服务科学与管理、软件工程等. 科研成果共获国家、省部级科技奖励 9 项, 其中国家科技进步二等奖 1 项, 省部级一等奖 2 项, 省部级二等奖 5 项, 省部级三等奖 1 项.
E-mail: gbzhu@whu.edu.cn



刘明亮 高级工程师, 男, 1968 年 6 月生, 江西景德镇人. 武汉大学服务科学方向博士研究生. 研究方向包括现代服务科学、复杂科学管理.
E-mail: lml5488@sina.com