

中文引用格式:李世丰,尚煜. 基于 CN-SD 的城市生命线 Natech 事件风险传导链路研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 200–208.

英文引用格式:LI Shifeng, SHANG Yu. Research on risk conduction chain of urban lifeline Natech event based on CN-SD[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 200–208.

基于 CN-SD 的城市生命线 Natech 事件风险 传导链路研究*

李世丰 工程师, 尚煜 教授

(中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083)

中图分类号: X915.2

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1727

【摘要】 城市生命线 Natech 事件是多风险、多主体耦合系统,为定性定量识别城市生命线 Natech 事件风险传导链路,首先,分析风险传导机制,城市生命线 Natech 事件同时具备自然灾害链与多米诺效应;然后,分析风险传导链路复杂性、动力学特征,构建城市生命线 Natech 事件风险传导链路复杂网络(CN)-系统动力学(SD)模型;最后,以全国十大自然灾害及报道为文本数据,量化风险路径、风险集聚、风险传导等 CN 指标,进而量化风险关联度及城市生命线脆弱性等 SD 指标,从而数值模拟城市生命线 Natech 事件风险传导速率及程度。结果表明:该模型能够定性定量结合分析城市生命线 Natech 事件风险传导链路,能够可视化数值模拟自然灾害链情景下交通、电力、通信、供水等城市生命线技术事故多米诺效应风险传导速率与程度动态曲线。

【关键词】 复杂网络(CN); 系统动力学(SD); 城市生命线; Natech 事件; 风险传导链路

Research on risk conduction chain of urban lifeline Natech event based on CN-SD

LI Shifeng, SHANG Yu

(School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The urban lifeline Natech event is a multi-risk and multi-subject coupling system. To qualitatively and quantitatively identify the risk conduction chain of urban lifeline Natech events, first, the risk conduction mechanism was analyzed. Urban lifeline Natech events have both natural disaster chains and domino effects. Then, the complexity and dynamic characteristics of the risk conduction chain were analyzed, and a CN-SD model for the risk conduction chain of the urban lifeline Natech event was constructed. Finally, using the text data of "Top Ten Natural Disasters in China" and their reports, CN indicators such as risk path, risk aggregation, and risk conduction were quantified, and SD indicators such as risk correlation and urban lifeline vulnerability were quantified to numerically simulate the risk conduction rate and degree of urban lifeline Natech event. The results show that the model can qualitatively and quantitatively analyze the risk conduction chain of urban lifeline Natech event, and can visualize the dynamic curves of the domino effect risk conduction rate and degree of technical accidents in transportation, electricity, communication, water supply under natural disaster chain scenarios.

Keywords: complex network (CN); system dynamics (SD); urban lifeline; Natech event; risk conduction chain

0 引言

城市生命线安全直接影响城市高质量发展与居民幸福生活,而自然灾害的发生发展已对城市生命线安全产生严重威胁。近年来,众多学者在自然灾害与城市生命线安全领域不断探索,即研究城市生命线 Natech (Natural hazard triggered technological accident) 事件,其中,风险识别是城市生命线 Natech 事件风险管理研究的前提与基础。

关于城市生命线 Natech 事件风险识别研究,国内外学者从不同自然灾害、不同城市生命线的角度采用不同科学方法展开研究。在城市交通系统方面,基于灾害链理论、能量传递原理等,采取案例分析、系统动力学 (System Dynamics, SD) 模型研究降雨-城市道路交通^[1-2]、暴雨-城市轨道交通^[3]、地震-城市交通系统^[4],探讨关键风险及影响程度,从而识别自然灾害对城市交通系统安全影响因素。在分析自然灾害和技术灾害特征的基础上,基于典型事故案例,采用归纳分析法和灾变链式传递方法,构建城市交通系统 Natech 事件演化模型,深入研究极端降雨及台风风暴潮-城市轨道交通^[5]、暴雨及滑坡-城市桥梁^[6]、常见自然灾害-城市轨道交通^[7-8]等,进而准确识别自然灾害影响城市交通系统安全的重要风险因素。在城市电力系统方面,搜集国内外电力系统事故案例,剖析自然灾害和技术灾害特征,采用文献综述等方法,深入分析地质灾害-电力^[9]、积雪-输电线路^[10]、台风及暴雨-输电线路^[11]的风险因素。在城市排水系统方面,通过构建不同地区暴雨、内涝-排水管网^[12],降雨-排水管网^[13]仿真模型,识别不同暴雨情景下城市排水管网风险因素。在城市燃气系统方面,对自然灾害进行分类及分析其二次生灾害,采用复杂网络 (Complex Network, CN) 法、故障树模型识别地震-燃气管网^[14],暴雨、洪水、滑坡等-燃气管网^[15]中的风险因素。通过收集案例资料,基于自然灾害链演化特点,采用 CN、矩阵法等,研究暴雨-城市生命线^[16]、地震-城市生命线^[17-18],从而识别影响城市生命线安全的因素。综上所述,在现阶段城市生命线 Natech 事件风险识别研究中,多集中于单一或简单复合自然灾害对单一城市生命线风险因素识别,而少有针对性在自然灾害-自然灾害、自然灾害-城市生命线、城市生命

线-城市生命线链路内传导识别的定性定量结合研究。

鉴于此,笔者拟在分析城市生命线 Natech 事件风险传导机制基础上,根据风险传导链路 CN 性与 SD 特征,构建城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN-SD 模型,以期能够定性定量识别城市生命线 Natech 事件风险传导链路。

1 城市生命线 Natech 事件风险传导机制

风险传导是指风险在存在关联性的节点间发生状态转移的动态开放过程^[19],可通过不同路径传导至不同承灾体,承灾体在具备一定抵抗能力时可内部消化灾害,而抵抗能力不足时就会变为次生灾害的载体,风险继续进行传导。随着时间的推移,更多次生灾害的传导路径被打通,风险传导更为广泛^[20]。风险存在多种传导方式,同一灾害事件可能触发不同传导路径,每条灾害路径带来的风险是不同的,且传导路径越长风险越大^[21],同时传导过程往往伴随各种耦合风险因子之间的破窗效应、多米诺骨牌效应^[22]。

自然灾害通常诱发一系列次生、衍生灾害,呈现显著的“链式效应”,如直链式、发散式、网络式;技术事故具备首发事故灾难发生、首发事故引发一系列次生事故、首发事故引发一系列次生事故导致总损失大于仅发生首发事故导致损失特征,即多米诺效应^[23-24]。城市生命线 Natech 事件同时存在自然灾害链、多米诺效应 2 种风险传导机制,如图 1 所示。依据风险传导机制,城市生命线风险可分为风险源、潜在事件和后果,具备不确定、复杂性等特征^[25]。

2 城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN-SD 模型构建

2.1 风险传导链路 CN 模型构建

2.1.1 风险传导链路 CN 性

在城市生命线 Natech 事件风险传导过程中,自然灾害-自然灾害(自然灾害链)、自然灾害-城市生命线(Natech 事件)、城市生命线-城市生命线(多米诺效应)呈现显著的网络拓扑结构。CN 能够较好地反映风险链的拓扑结构^[26],同时 CN 能够深入剖

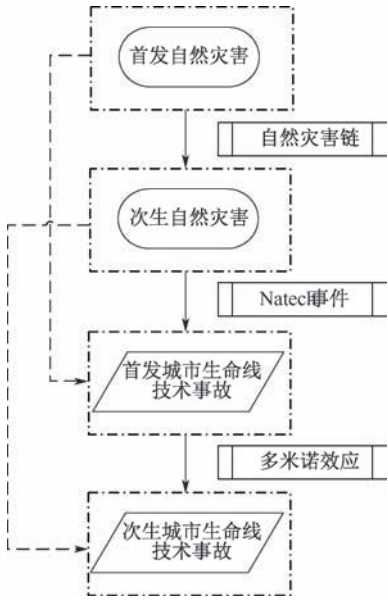


图1 城市生命线 Natech 事件风险传导机制
Fig.1 Risk conduction mechanisms for urban lifeline Natech event

析灾害事件间的复杂演化与耦合关系^[27-28]。

2.1.2 风险传导链路 CN 指标

风险点具有不同程度共现关系,以自然灾害、城市生命线为要素构造完全共现矩阵,将自然灾害、城市生命线等价转化为 CN 中的节点,将节点间的风险传导等价转化为 CN 中节点的连接边^[29],从而得到城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN。

1) 风险路径。城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN 中箭头的引出与指向代表自然灾害、城市生命线风险的出度与入度,入度表示风险流入,出度表示风险流出,节点的加权出度、入度表示风险传导路径选择及重要程度,作为风险路径选择。

2) 风险集聚。城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN 中节点聚类系数为节点间的实际连接数与理论连接数之比,聚类系数值的大小反映节点内风险的聚集多少,作为风险集聚程度。

3) 风险传导。城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN 中边介数为通过节点间的连接边的最短路径数目与最短路径数目之和的比值,边介数值的大小反映风险在连接边的传播效率,作为风险传导系数。

2.2 风险传导链路 SD 模型构建

2.2.1 风险传导链路 SD 特征

城市生命线 Natech 事件孕灾环境为自然界,致灾因子包括自然灾害与技术事故,承灾体为城市生命线,风险传导过程具有显著的动力特征。城市生

命线 Natech 事件是复杂的系统,主要表现为内部结构复杂,致灾因子错综、承灾体多样,且相互作用,呈现自然灾害的链式发展与技术事故的多米诺效应。城市生命线 Natech 事件是开放的系统,致灾因子在不同承灾体间传导,表现为灾变能量在承灾主体内传递叠加且具有时间效应。城市生命线 Natech 事件是不确定的系统,其主要由复杂性、开放性导致,主要表现为致灾因子来源、传导不确定性,造成承灾体风险程度的不确定性。从 SD 视角更易深刻认识风险传导本质^[30-31]。

2.2.2 风险传导链路 SD 变量

SD 变量性质由自然灾害或技术事故风险传导的时间效应所决定^[32-33]。在构建城市生命线 Natech 事件风险传导链路 SD 模型时,若自然灾害或技术事故风险传导过程中对次级自然灾害或次级技术事故产生瞬时效应,即假设在演变时长内风险量在固定范围内随机变化,则只考虑自然灾害或技术事故的风险速率;若自然灾害或技术事故对次级自然灾害或次级技术事故产生持续效应,即假设在演变时长内风险量呈指数增长达到固定值,则同时考虑自然灾害或技术事故的风险速率与程度。

1) 风险量。在城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN 中,以节点的风险路径、风险集聚及节点间的风险传导共同表征其风险量,为无量纲数。

2) 关联度。采用 Jaccard 指数计算城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN 中风险节点间的共现率,以共现率表征节点间关联度,为无量纲数。

3) 脆弱性。在考虑城市生命线关联性特征^[34]的基础上构建城市生命线 Natech 事件共现矩阵,借鉴刘爱华等^[35]提出的城市生命线脆性联系熵概念及计算方法,计算 Natech 事件中城市生命线脆弱性,为无量纲数。

3 城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN-SD 模型应用

依据《突发事件分类与编码》(GB/T 35561—2017)规定的技术事故类型选取城市生命线,如交通、供水、排水、热力、电力、通信、燃气。依据《自然灾害分类与代码》(GB/T 28921—2012)选取涉及城市生命线技术事故的自然灾害,如气象灾害(台风、洪涝、暴雨、大风、雷电、冰雹、低温、高温、冰雪、沙尘暴、龙卷风、干旱),地质灾害(地震、崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地面裂缝)。据此,以2004—2023年全国十大自然灾害事件及其相关新

闻报道为文本数据,运用 CN-SD 模型分析城市生命线 Natech 事件风险传导链路。

3.1 风险传导链路 CN 模型应用

运用 NSS 软件统计自然灾害-自然灾害、自然灾害-城市生命线、城市生命线-城市生命线共现频次,构建城市生命线 Natech 事件完全共现矩阵,如图 2 所示。图 2 中,纵横交叉处为共现频次。运用

Gephi 软件得到 26 个节点、185 条边的城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN,如图 3 所示。城市生命线 Natech 事件 CN 拓扑图可看作为城市生命线 Natech 事件因果关系。图 3 中,字体大小、颜色深浅以及连接边颜色深浅、粗细能够侧面反映风险在自然灾害-自然灾害、自然灾害-城市生命线、城市生命线-城市生命线链路中的传导。

	交通	电力	暴雨	供水	排水	通信	滑坡	洪涝	燃气	大风	泥石流	台风	热力	干旱	地震	冰雹	地面裂缝	地面沉降	地面塌陷	高温	雷电	冰雪	崩塌	低温	龙卷风	沙尘暴
交通	177	135	113	78	91	78	75	65	62	58	59	32	33	0	24	22	23	22	21	0	19	16	16	15	6	3
电力	135	155	89	88	82	76	62	46	57	48	50	25	31	15	24	22	23	22	21	17	19	11	16	11	4	0
暴雨	113	89	118	50	67	47	52	68	27	51	55	33	0	0	0	16	0	0	0	15	0	3	0	4	0	0
供水	78	88	50	99	65	51	47	30	49	27	30	16	26	19	24	8	23	22	21	17	7	4	13	4	0	0
排水	91	82	67	65	91	58	53	39	47	33	36	20	24	0	24	13	23	22	21	0	9	0	14	0	0	0
通信	78	76	47	51	58	80	45	22	38	31	29	16	24	0	24	13	23	22	21	0	13	0	15	0	2	0
滑坡	75	62	52	47	53	45	78	29	34	23	46	15	19	0	19	7	19	17	17	0	5	0	16	0	3	0
洪涝	65	46	68	30	39	22	29	68	17	12	29	3	0	0	0	10	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0
燃气	62	57	27	49	47	38	34	17	63	13	18	7	31	0	24	3	23	22	21	0	3	11	14	11	0	0
大风	58	48	51	27	33	31	23	12	13	60	23	33	2	0	0	19	0	0	0	13	4	3	4	6	0	0
泥石流	59	50	55	30	36	29	46	29	18	23	60	14	0	0	0	9	0	0	0	6	0	3	0	2	0	0
台风	32	25	33	16	20	16	15	3	7	33	14	33	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	4	0
热力	33	31	0	26	24	24	19	0	31	2	0	0	33	0	24	0	23	22	21	0	0	9	13	8	0	0
干旱	0	15	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0
地震	24	24	0	24	24	24	19	0	24	0	0	0	24	0	24	0	23	22	21	0	0	0	13	0	0	0
冰雹	22	22	16	8	13	13	7	10	3	19	9	0	0	0	0	23	0	0	0	11	0	2	0	2	0	0
地面裂缝	23	23	0	23	23	23	19	0	23	0	0	0	23	0	23	0	23	21	20	0	0	0	13	0	0	0
地面沉降	22	22	0	22	22	22	17	0	22	0	0	0	22	0	22	0	21	22	19	0	0	0	13	0	0	0
地面塌陷	21	21	0	21	21	21	17	0	21	0	0	0	21	0	21	0	20	19	21	0	0	0	13	0	0	0
高温	0	17	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0
雷电	19	19	15	7	9	13	5	7	3	13	6	3	0	0	0	11	0	0	0	20	0	0	0	2	0	0
冰雪	16	11	0	4	0	0	0	0	11	4	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	16	0	14	0	0	0
崩塌	16	16	3	13	14	15	16	0	14	3	3	1	13	0	13	2	13	13	13	0	0	0	16	0	0	0
低温	15	11	0	4	0	0	0	0	11	4	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	15	0	0
龙卷风	6	4	4	0	0	2	3	0	0	6	2	4	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	6	0	0
沙尘暴	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0

图 2 城市生命线 Natech 事件完全共现矩阵

Fig. 2 Full co-occurrence matrix for urban lifeline Natech events

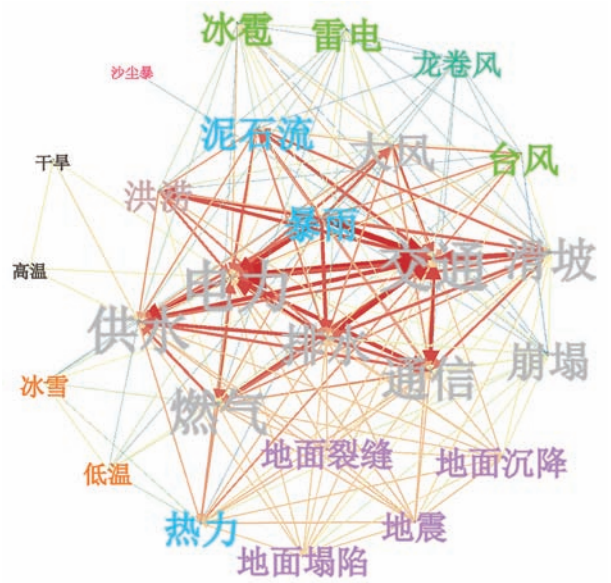


图 3 城市生命线 Natech 事件 CN 拓扑图

Fig. 3 CN topology diagram for urban lifeline Natech events

3.2 风险传导链路 SD 模型应用

1) 关联度计算。计算自然灾害-自然灾害、自然灾害-城市生命线、城市生命线-城市生命线关联

度,得到关联度矩阵,如图 4 所示。图 4 中,纵横坐标交叉处为关联度。自然灾害链风险传导链路中关联度前 5 为:暴雨-洪涝、暴雨-泥石流、暴雨-滑坡、暴雨-大风、滑坡-泥石流。Natech 事件风险传导链路中关联度前 5 为:暴雨-交通、暴雨-电力、滑坡-交通、暴雨-排水、洪涝-交通。多米诺效应风险传导链路中关联度前 5 为:交通-电力、排水-交通、电力-供水、排水-电力、供水-交通。

2) 风险量计算。计算城市生命线 Natech 事件风险路径、集聚、传导,计算得到风险量峰值,见表 1。自然灾害链风险传导链路中风险量峰值前 5 为:冰雪-大风、暴雨-大风、滑坡-泥石流、低温-大风、大风-泥石流。Natech 事件风险传导链路中风险量峰值前 5 为:沙尘暴-交通、高温-电力、干旱-电力、大风-排水、暴雨-交通。多米诺效应风险传导链路中风险量峰值前 5 为:交通-通信、交通-电力、供水-交通、热力-交通、电力-通信。

3) 脆弱性计算。根据城市生命线 Natech 事件中城市生命线出现的独立、共现、独立-共现频次计算得到其脆性独立、同一、波动概率,进而计算得到其脆性独立、同一、波动熵,最后计算得到其显现出

	交通	电力	暴雨	供水	排水	通信	滑坡	洪涝	燃气	大风	泥石流	台风	热力	干旱	地震	冰雹	地面沉降	地面沉降	地面沉降	高温	雷电	冰雹	崩塌	低温	龙卷风	沙尘暴
交通	—	0.6853	0.6209	0.3939	0.5141	0.4358	0.4167	0.3611	0.3483	0.3240	0.3315	0.1798	0.1864	0	0.1356	0.1236	0.1299	0.1243	0.1186	0	0.1067	0.0904	0.0904	0.0847	0.0339	0.0169
电力	0.6853	—	0.4837	0.5301	0.5000	0.4780	0.3626	0.2599	0.3540	0.2874	0.3030	0.1534	0.1975	0.0915	0.1548	0.1410	0.1484	0.1419	0.1355	0.1076	0.1218	0.0688	0.1032	0.0692	0.0255	0
暴雨	0.6209	0.4837	—	0.2994	0.4718	0.3113	0.3611	0.5763	0.1753	0.4016	0.4472	0.2797	0	0	0	0.1280	0	0	0	0	0.1220	0	0.0229	0	0.0333	0
供水	0.3939	0.5301	0.2994	—	0.5200	0.3984	0.3615	0.2190	0.4336	0.2045	0.2326	0.1379	0.2453	0.1827	0.2424	0.0702	0.2323	0.2222	0.2121	0.1667	0.0625	0.0360	0.1275	0.0364	0	0
排水	0.5141	0.5000	0.4718	0.5200	—	0.5133	0.5469	0.3250	0.4393	0.2797	0.3130	0.1923	0.2400	0	0.2637	0.1287	0.2527	0.2418	0.2308	0	0.0882	0	0.1505	0	0	0
通信	0.4358	0.4780	0.3113	0.3984	0.5133	—	0.3982	0.1746	0.3619	0.2844	0.2613	0.1649	0.2697	0	0.3000	0.1444	0.2875	0.2750	0.2625	0	0.1494	0	0.1852	0	0.0238	0
滑坡	0.4167	0.3626	0.3611	0.3615	0.4569	0.3982	—	0.2479	0.3178	0.2000	0.1563	0.2065	0	0.2289	0.0745	0.2317	0.2048	0.2073	0	0.0538	0	0.2051	0	0.0370	0	0
洪涝	0.3611	0.2599	0.5763	0.2190	0.3250	0.1746	0.2479	—	0.1491	0.1034	0.2929	0.3006	0	0	0	0.1235	0	0	0	0	0.0864	0	0	0	0	0
燃气	0.3483	0.3540	0.1753	0.4336	0.4393	0.3619	0.3178	0.1491	—	0.1182	0.1714	0.0787	0.4769	0	0.3810	0.0361	0.3651	0.3492	0.3333	0	0.0375	0.1618	0.2154	0.1642	0	0
大风	0.3240	0.2874	0.4016	0.2045	0.2797	0.2844	0.2000	0.1034	0.1182	—	0.2371	0.5500	0.0220	0	0	0.2969	0	0	0	0	0.1940	0.0556	0.0411	0.0563	0.1000	0
泥石流	0.3315	0.3030	0.4472	0.2326	0.3130	0.2613	0.5000	0.2929	0.1714	0.2371	—	0.1772	0	0	0	0.1216	0	0	0	0	0.0811	0	0.0411	0	0.0313	0
台风	0.1798	0.1534	0.2797	0.1379	0.1923	0.1649	0.1563	0.0306	0.0787	0.5500	0.1772	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0600	0	0.0208	0	0.1143	0
热力	0.1864	0.1975	0	0.2453	0.2400	0.2697	0.2065	0	0.4769	0.0220	0	0	—	0	0.7273	0	0.6970	0.6667	0.6364	0	0	0.2250	0.1611	0.2000	0	0
干旱	0	0.0915	0	0.1827	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0.6296	0	0	0	0	0	0
地震	0.1356	0.1548	0	0.2424	0.2637	0.3000	0.2289	0	0.3810	0	0	0	0.7273	0	—	0	0.9583	0.9167	0.8750	0	0	0	0.4815	0	0	0
冰雹	0.1236	0.1410	0.1280	0.0702	0.1287	0.1444	0.0745	0.1235	0.0361	0.2969	0.1216	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0.3438	0	0.0541	0	0.0741	0
地面沉降	0.1299	0.1484	0	0.2323	0.2527	0.2875	0.2317	0	0.3651	0	0	0	0.6970	0	0.9583	0	—	0.8750	0.8333	0	0	0	0.5000	0	0	0
地面沉降	0.1243	0.1419	0	0.2222	0.2418	0.2750	0.2048	0	0.3492	0	0	0	0.6667	0	0.9167	0	0.8750	—	0.7917	0	0	0	0.5200	0	0	0
地面沉降	0.1186	0.1355	0	0.2121	0.2308	0.2625	0.2073	0	0.3333	0	0	0	0.6364	0	0.8750	0	0.8333	0.7917	—	0	0	0	0.5417	0	0	0
高温	0	0.1076	0	0.1667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6296	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0
雷电	0.1067	0.1218	0.1220	0.0625	0.0882	0.1494	0.0538	0.0864	0.0375	0.1940	0.0811	0.0600	0	0	0	0.3438	0	0	0	0	—	0	0	0	0.0833	0
冰雹	0.0904	0.0688	0	0.0360	0	0	0	0	0.1618	0.0556	0	0	0.2250	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0.8235	0	0	0
崩塌	0.0904	0.1032	0.0229	0.1275	0.1505	0.1852	0.2051	0	0.2154	0.0411	0.0411	0.0208	0.3611	0	0.4815	0.0541	0.5000	0.5200	0.5417	0	0	0	—	0	0	0
低温	0.0847	0.0692	0	0.0364	0	0	0	0	0.1642	0.0563	0	0	0.2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8235	0	—	0	0
龙卷风	0.0339	0.0255	0.0333	0	0	0.0238	0.0370	0	0	0.1000	0.0313	0.1143	0	0	0	0.0741	0	0	0	0	0.0833	0	0	0	—	0
沙尘暴	0.0169	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0

图 4 城市生命线 Natech 事件关联度矩阵

Fig. 4 Correlation matrix for urban lifeline Natech events

表 1 城市生命线 Natech 事件风险量(部分数据)

Table 1 Risk scale of urban lifeline Natech events (partial data)

节点 <i>i</i>	节点 <i>i</i> 加权出度	节点 <i>i</i> 聚类系数	节点 <i>j</i>	节点 <i>j</i> 加权入度	节点 <i>j</i> 聚类系数	边介数	风险量 峰值
暴雨	657	0.476 2	交通	1 066	0.306 3	0.283 4	181.200 1
排水	305	0.388 9	交通	1 066	0.306 3	0.286 9	127.707 9
通信	191	0.381 6	交通	1 066	0.306 3	0.430 1	171.782 5
滑坡	381	0.384 2	交通	1 066	0.306 3	0.285 8	135.153 7
洪涝	277	0.512 8	交通	1 066	0.306 3	0.284 4	133.258 9
大风	305	0.388 9	交通	1 066	0.306 3	0.284 2	126.506 0
电力	387	0.286 2	交通	1 066	0.306 3	0.574 7	251.302 1
雷电	88	0.489 0	通信	535	0.381 6	0.332 0	82.066 4

的脆弱性,见表 2。Natech 事件中城市生命线脆弱性由大至小顺序:供水、排水、通信、电力、燃气、交通、热力。

表 2 城市生命线 Natech 事件中城市生命线脆弱性

Table 2 Urban lifeline vulnerability in urban lifeline Natech event

城市生 命线	独立频次 概率	共现频次 概率	独立-共现 概率	独立熵	同一熵	波动熵	脆弱性
交通	0.401 4	0.309 2	0.289 4	0.366 4	0.362 9	0.358 8	0.758 5
电力	0.381 7	0.329 9	0.288 3	0.367 6	0.365 9	0.358 6	0.762 2
供水	0.325 8	0.333 8	0.340 4	0.365 4	0.366 2	0.366 8	0.768 4
排水	0.314 9	0.361 8	0.323 3	0.363 9	0.367 8	0.365 1	0.766 9
通信	0.301 5	0.348 8	0.349 7	0.361 5	0.367 4	0.367 4	0.766 5
燃气	0.273 7	0.351 2	0.375 2	0.354 6	0.367 5	0.367 8	0.760 8
热力	0.205 0	0.303 8	0.491 2	0.324 9	0.361 9	0.349 2	0.711 8

4 城市生命线 Natech 事件风险传导 链路 CN-SD 数值模拟

4.1 风险传导链路系统存量流量

城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN(因果关系)能够直观表达风险链路逻辑关系,但不能准确反映风险传导的量化关系。城市生命线 Natech 事件风险传导链路存量流量图能够针对风险传导定量分

析,得到模拟时间线上城市生命线的风险速率与程度。基于城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN 及 SD 指标,构建城市生命线 Natech 事件风险传导链路 SD 模型系统存量流量图,如图 5 所示。在此仅展示交通、电力 Natech 事件风险传导链路存量流量。

4.2 风险传导链路数值模拟分析

1) 函数设定。Vensim PLE 软件针对 SD 模型提供多种分析方法,包括结构分析(存量流量)和数

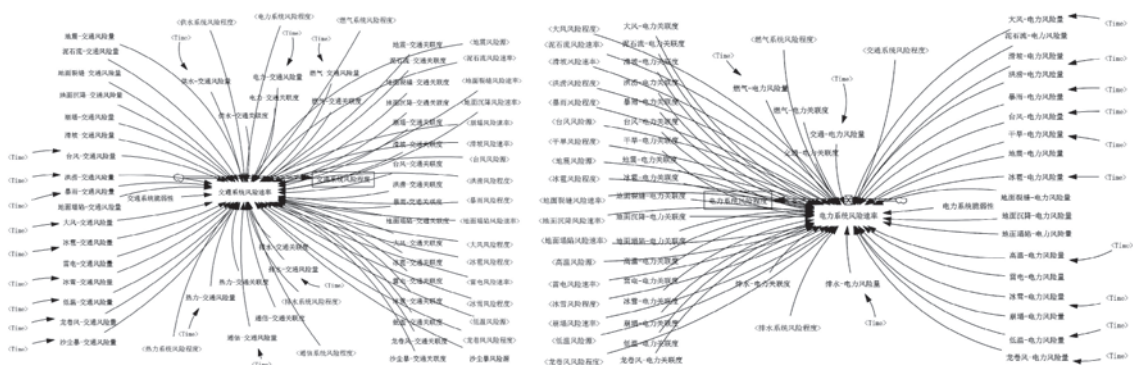


图5 城市生命线 Natech 事件风险传导链路 SD 存量流量

Fig. 5 Risk conduction chain SD stocks and flows diagram of urban lifeline Natech events

据分析(动力学函数)。城市生命线 Natech 事件风险传导链路 CN-SD 模型是风险传导机制与传导链路的耦合,风险传导机制是定性描述风险传导过程中各要素间相互作用的逻辑关系,风险传导链路是定量反映风险在传导过程中的状态函数^[36]。

2) 数值模拟。设定城市生命线 Natech 事件风险传导链路 SD 模型系统存量流量中的变量表达式,数值模拟时间为 72h,结果如图 6—图 8 所示。

由图 6、图 7 可知:城市生命线 Natech 事件风险速率主要受到瞬时性自然灾害的影响。由图 6、图 8 可知:城市生命线 Natech 事件风险程度主要受到持续性自然灾害的影响。由图 7 可知:城市生命线风险速率变化幅度由大至小依次为:交通、通信、电力、供水、燃气、热力、排水。由图 8 可知:城市生命线风险程度由大至小依次为:交通、电力、通信、供水、燃气、热力、排水。

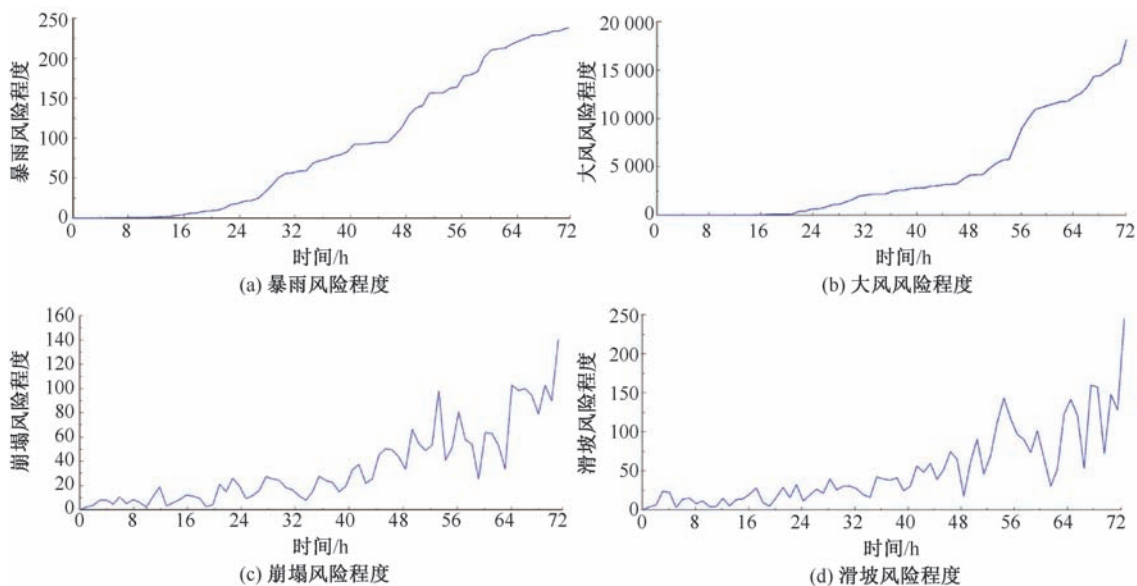


图 6 自然灾害风险程度/速率

Fig. 6 Risk level/rate of natural disaster

5 结 论

1) 风险传导链路 CN 拓扑图中字体大小、颜色深浅以及连接边粗细、颜色深浅可直观展示风险在自然灾害-自然灾害、自然灾害-城市生命线、城市生命线-城市生命线链路中的传导。风险传导链路 CN 指标可量化分析自然灾害-自然灾害、自然灾害

-城市生命线、城市生命线-城市生命线间的关联度、风险量及 Natech 事件中城市生命线脆弱性。

2) 风险传导链路 SD 存量流量图中变量可直观展示自然灾害-自然灾害、自然灾害-城市生命线、城市生命线-城市生命线的关联度、风险量及 Natech 事件中城市生命线脆弱性指标在风险传导链路中的行为-结构关系。风险传导链路 SD 模型数

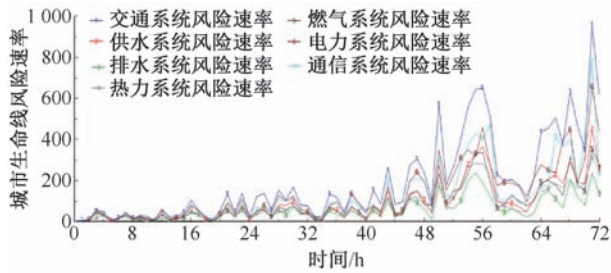


图7 城市生命线 Natech 事件风险速率

Fig. 7 Risk rate of urban lifeline Natech events

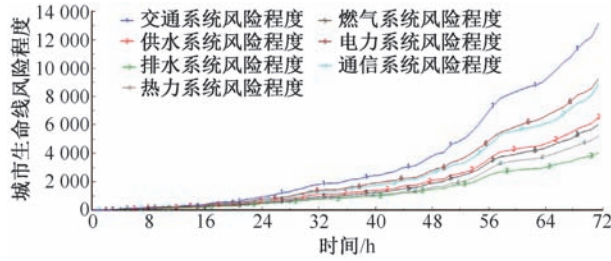


图8 城市生命线 Natech 事件风险程度

Fig. 8 Risk level of urban lifeline Natech events

值模拟可量化分析城市生命线 Natech 事件风险速率与程度,即风险速率主要受到瞬时性自然灾害的影响,风险程度主要受到持续性自然灾害的影响。

3) 文中研究不足之处主要在于2个方面:①仅考虑部分城市生命线 Natech 事件风险传播的方向性,而风险传导在时间与空间上具有高度不确定性,因此,后续应重点研究基于风险传播方向时空复杂性的城市生命线 Natech 事件风险动态传导链路模型。②未考虑应急管理措施对城市生命线 Natech 事件风险传导的影响,后续研究基于城市生命线 Natech 事件应急管理案例,分析应急措施对城市生命线 Natech 事件风险传导“减灾断链”效果。

参考文献

- [1] MURIEL V J E, ALVAREZ U K C, PATINO R C E, et al. Analysis of transportation networks subject to natural hazards-insights from a Colombian case[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016,152:151-165.
- [2] LI Qiuping, LUO Haowen, LUAN Xuechen. Multistage impacts of the heavy rain process on the travel speeds of urban roads[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021,10(8):DOI:10.3390/ijgi10080557.
- [3] TANG Hongxia, ZHENG Jingxuan, LI Mengdi, et al. Gauging the evolution of operational risks for urban rail transit systems under rainstorm disasters[J]. Water, 2023,15(15):DOI:10.3390/w15152811.
- [4] WANG Ding, ZHAO Xinyu, LIU Yue. Effect of spatial variation of earthquake ground motions on seismic vulnerability of urban road network considering building environment[J]. Buildings, 2022,12(3):DOI:10.3390/buildings12030308.
- [5] 江雨潮, 高燕, 史天根, 等. 极端天气下轨道交通水害致灾因子时空分布特征[J]. 人民长江, 2024,55(7):10-19.
JIANG Yuchao, GAO Yan, SHI Tiangen, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of disaster-causing factors for rail transit flooding under extreme conditions[J]. Yangtze River, 2024,55(7):10-19.
- [6] 李磊, 马梦格, 折亚亚, 等. 复杂网络下雨洪灾害链风险分析及断链减灾研究[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(12):192-197.
LI Lei, MA Mengge, SHE Yaya, et al. Risk analysis of rainstorm flood disaster chain and research on disaster mitigation of broken chain under complex network[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(12):192-197.
- [7] 李浩然, 王子恒, 杨起帆, 等. 复杂网络下地铁灾害链演化模型与风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2021,31(11):141-147.
LI Haoran, WANG Ziheng, YANG Qifan, et al. Evolutionary model and risk analysis of metro disaster chain under complex network[J]. China Safety Science Journal, 2021,31(11):141-147.
- [8] 李晓璐, 于昕明, 雷方舒, 等. 城市轨道交通系统灾害链网络模型构建与评价[J]. 中国安全科学学报, 2018,28(6):179-184.
LI Xiaolu, YU Xinming, LEI Fangshu, et al. Construction of disaster chain network model and evaluation of network index for urban rail transit system[J]. China Safety Science Journal, 2018,28(6):179-184.
- [9] 解大, 李子怡, 田洲, 等. 构建灾害风险图谱提高电力系统安全调度能力[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-22. [2024-02-20]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.535>.
XIE Da, LI Ziyi, TIAN Zhou, et al. Constructing disaster risk mapping to improve power system security dispatching capability[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-22. [2024-02-20]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.535>.

- jsjtu. 2023. 535.
- [10] 霍治国, 李春晖, 孔瑞, 等. 中国电线积冰灾害研究进展[J]. 应用气象学报, 2021, 32(5): 513–529.
HUO Zhiguo, LI Chunhui, KONG Rui, et al. Review on disaster of wire Icing in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2021, 32(5): 513–529.
- [11] 王增平, 相禹维, 王彤. 台风暴雨灾害下的 110kV 线路倒塔与断线事故评估方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 59–66.
WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 59–66.
- [12] 张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2023, 44(2): 30–37.
ZHANG Jinping, ZHANG Zhaoyang, ZUO Qiting. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2023, 44(2): 30–37.
- [13] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643–652.
HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643–652.
- [14] 周伟国, 张中秀, 孔令令. 城市燃气管网的震害分析及减灾对策[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 70–75.
ZHOU Weiguo, ZHANG Zhongxiu, KONG Lingling. Seismic damage analysis and disaster mitigation approaches for urban gas piping systems[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2009, 31(4): 70–75.
- [15] 宋冰雪, 姚冰鑫, 罗雅月. 城市燃气供应系统 Natech 事件风险评估研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(11): 3 822–3 829.
SONG Bingxue, YAO Bingxin, LUO Yayue. Study on risk assessment of Natech events in urban gas supply systems[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(11): 3 822–3 829.
- [16] GUO Haixiang, HE Xinyu, LYU Xinbiao, et al. Risk analysis of rainstorm-urban lifeline system disaster chain based on the PageRank-risk matrix and complex network[J]. Natural Hazards, 2024, 120(12): 10 583–10 606.
- [17] HSU C H, TENG M C, KE S S. A comprehensive method for seismic impact chain assessment of urban lifeline infrastructure: a case study of Taipei area, Taiwan[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(10): 3 650–3 661.
- [18] JOHNSON L A, MIELER D H. Assessing lifeline inter dependencies and restoration performance in San Francisco using qualitative methods[C]. Lifelines 2022: 1971 San Fernando Earthquake and Lifeline Infrastructure, 2022: 782–796.
- [19] 席永涛, 张靓, 付姗姗, 等. 基于 SFN-SD 的北极冰区船舶航行风险传递路径研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 52–60.
XI Yongtao, ZHANG Liang, FU Shanshan, et al. Research on risk transfer path of ship navigation in Arctic waters based on SFN and SD[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 52–60.
- [20] 戴胜利, 李迎春. 东日本 9 级大地震次生灾害的传导机理及管理优化研究[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 162–168.
DAI Shengli, LI Yingchun. Study on the conduction path of the secondary disaster in the great east Japan earthquake[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 162–168.
- [21] 刘高峰, 李佳静, 王慧敏, 等. 城市暴雨洪涝灾害链辨识及系统性风险评估[J/OL]. 中国管理科学: 1–12. [2024–04–10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2131>.
LIU Gaofeng, LI Jiajing, WANG Huimin, et al. Identification of urban rainstorm flood disaster chain and assessment of systematic risk[J/OL]. Chinese Journal of Management Science: 1–12. [2024–04–10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2131>.
- [22] 张勤, 宋青勋. 构建中国式现代化的城市社区韧性治理新探索: 基于“吸收—传导—转化”的分析[J]. 理论探讨, 2023(6): 48–57.
- [23] 汪嘉俊, 翁文国. 多灾种概念辨析及灾害事故关系研究综述[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11): 57–64.
WANG Jiajun, WENG Wenguo. Discrimination on concept of multi-hazard and review of research on relationship between disasters and accidents[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(11): 57–64.
- [24] 王威, 瞿汝诺, 郭小东, 等. 城市多灾种关联框架与链式网络的构建思路与方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(11): 5–12.
WANG Wei, QU Zinuo, GUO Xiaodong, et al. Thinking and method of constructing urban multi-disaster association framework and chain network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(11): 5–12.
- [25] 张超, 翁文国, 陈勇, 等. 城市安全风险特征及对风险管理的启示[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 223–230.

ZHANG Chao, WENG Wenguo, CHEN Yong, et al. Characteristics of urban public safety risk and its enlightenment for risk management[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(1):223-230.

[26] 陈国华, 李佳玲, 陈学希, 等. 灾害链网络下城市区域安全风险评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2022,32(11):146-153.

CHEN Guohua, LI Jialing, CHEN Xuexi, et al. A safety risk assessment model of urban areas under disaster chain network[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(11):146-153.

[27] 何佳, 苏筠. 极端气候事件及重大灾害事件演化研究进展[J]. 灾害学, 2018,33(4):223-228.

HE Jia, SU Yun. Research progress on extreme climate events and evolution of major disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2018,33(4):223-228.

[28] FENG Jianrui, ZHAO Mengke, YU Guanghui, et al. Dynamic risk analysis of accidents chain and system protection strategy based on complex network and node structure importance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023,238;DOI:10.1016/j.ress.2023.109413.

[29] 翁文国, 倪顺江, 申世飞, 等. 复杂网络上灾害蔓延动力学研究[J]. 物理学报, 2007,56(4):1938-1943.

WENG Wenguo, NI Shunjiang, SHEN Shifei, et al. Dynamics of disaster spreading in complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2007,56(4):1938-1943.

[30] 胡爱军, 李宁, 李春华, 等. 从系统动力学的视角看风险的本质与分类[J]. 自然灾害学报, 2008,17(1):39-43.

HU Aijun, LI Ning, LI Chunhua, et al. Essence and classification of risk in view of systematic dynamics[J]. Journal of Natural Disasters, 2008,17(1):39-43.

[31] FENG Jianrui, ZHAO Mengke, LU Shouxiang. Accident spread and risk propagation mechanism in complex industrial system network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024,244;DOI:10.1016/j.ress.2024.109940.

[32] 刘爱华. 城市灾害链动力学演变模型与灾害链风险评估方法的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

LIU Aihua. Research on the dynamics evolution model of urban disaster chain and the risk assessment method of disaster chain[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[33] WANG Lin, XING Yuping. Risk assessment of a coupled natural gas and electricity market considering dual interactions: a system dynamics model[J]. Energies, 2023,16(1);DOI:10.3390/en16010223.

[34] 陈潭, 严艳. 城市生命线管理的理论命题与实践范式[J]. 浙江学刊, 2020(2):88-96.

CHEN Tan, YAN Yan. Theoretical propositions and practice paradigms of urban lifeline management[J]. Zhejiang Academic Journal, 2020(2):88-96.

[35] 刘爱华, 吴超, 徐文彬. 基于脆性熵的城市生命线灾损敏感性评估[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016,47(8):2793-2801.

LIU Aihua, WU Chao, XU Wenbin. Damage sensitivity evaluation of urban lifeline based on brittleness entropy[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016,47(8):2793-2801.

[36] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002,11(3):1-9.

SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics[J]. Journal of Natural Disasters, 2002,11(3):1-9.

作者简介: 李世丰 (1991—),男,河北深州人,博士研究生,工程师、编辑,主要研究方向为自然灾害与城市生命线安全。E-mail:lsfmine@163.com。

