

前言

当今世界正经历深刻变革，各类自然灾害、事故灾难、公共卫生事件与社会安全风险交织叠加，呈现出发生频率高、影响范围广、跨域传导链条复杂等特征，给现代社会治理体系带来了前所未有的系统性挑战。在此背景下，如何有效打破应急管理体系的环节壁垒、整合分散资源并协调多元主体，构建高效协同的应急响应与韧性提升机制，成为亟待解决的重大现实问题。然而，现有研究大多聚焦应急管理的某个孤立环节或单一维度，缺乏从系统整合视角对应急协同增韧机制及实现路径的深入探究，这导致现有策略在面对复杂多变的灾害场景时，有时适用性欠佳、效能有限。因此，构建一套贯穿应急全周期、统筹多主体联动、融合多维度治理且能适配多类灾害情境的协同增韧理论与方法体系，提升应急管理系统在“抵御力-适应力-恢复力”三位一体框架下的综合韧性，既是应对现实挑战的迫切需要，也是推进我国应急管理能力现代化的核心任务。

本书正是在此背景下撰写而成，旨在突破传统应急决策中“环节割裂、主体单一、维度局限、情境固化”的认知与实践瓶颈。全书基于复杂系统理论，围绕应急协同增韧理论体系展开，力求系统构建一个集“多环节协作、多主体联动、多维度耦合、多情境适配”于一体的综合框架。具体而言，首先解析应急设施选址、物资库存管理与资源优化分配等多环节间的动态协同机制，继而探究政府、企业与社会组织等多元主体协同的网络化治理模式，进而构建经济、社会、生态与制度等多维风险传导的耦合分析模型，最终形成面向地震灾害、金融风险等典型情境的精准增韧策略。

通过揭示协同增韧的内在机制及其实现路径，本书旨在从理论与方法两个层面系统推动应急管理范式的转型升级。在理论层面，创新提出应急协同增韧理论，系统阐释面向多环节、多主体、多维度以及多情境的协同增韧作用机制与演化路径；在方法层面，综合运用博弈论、动态优化、复杂网络与事理图谱等交叉学科工具，构建一套覆盖“灾前预防-灾中响应-灾后恢复”全链条集成创新的方法论工具。本书不仅为提升复杂应急决策的精细化、科学化与智能化水平提供核心技术支撑，更致力于推动应急管理体系实现从被动处置向主动防范、从经验决策向智能治理的范式跃迁。

全书主要内容安排如下：

第一部分(第1~3章):聚焦“面向多环节的应急协同增韧研究”。强调应急设施选址、物资库存管理与资源分配等关键环节相互关联、动态耦合,共同决定应急系统的整体性能。通过深入剖析多个核心环节间的内在联系与交互影响机制,构建各环节协同集成的决策模型并探究协同决策机制,以期提升应急体系的整体韧性与响应效能。

第二部分(第4~6章):聚焦“面向多主体的应急协同增韧研究”。针对应急管理体系中多元化主体的协作难题,重点探讨政府、企业及社会第三方等不同主体的协同合作模式。通过剖析核心主体间的关联关系与协同机制,探索依托信息共享和决策联动,有效整合多方应急力量、实现高效协作、优化资源配置的具体路径,进而提升应急管理体系的协同效能与组织韧性,形成协同有序的整体应对能力。

第三部分(第7~9章):围绕“基于多维度的应急协同增韧研究”展开。面对多维灾害风险相互交织的复杂环境,以提升“风险抵御-动态适应-快速恢复”三位一体的系统韧性为核心目标,深入剖析各维风险之间的耦合关系与传导机制,探究多维耦合交互作用对风险动态演化及应对策略的影响机制,构建一个适配多维风险情境、覆盖灾害全过程的协同防控增韧理论框架。

第四部分(第10~12章):围绕“基于多情境的应急协同增韧研究”展开。针对自然灾害、经济社会安全事件等典型情境,探寻应急协同增韧机制的共性规律与情境化适配路径。通过多情境的对比与实证,不仅验证并深化应急协同增韧理论,更致力于推动应急管理从通用性框架向精准化决策升级,形成一套兼具理论深度与实践灵活性的系统性解决方案,全面提升应对复杂灾害环境的协同增韧能力。

希望本书的出版能有效推动协同增韧理论与方法在应急管理领域的普及与传播,提升全社会对应急协同增韧理论框架及实践路径的认知程度,助力培育交叉领域合作创新思维,以期不仅能够拓展应急管理知识体系的深度与广度,也为应急相关政策制定、行业实践与学科研究提供重要参考,为推进我国应急管理体系与能力现代化提供理论基础和实践参考。

本书的出版得到了国家社会科学基金一般项目“协同增韧驱动下跨区域应急资源调配机制研究”(项目编号:22BGL242)和国家社会科学基金重大项目“中国社会应急救援服务体系建设研究”(项目编号:16ZDA054)的资助,也得到了科学出版社的大力支持,在此表示感谢!同时感谢博士研究生康跃迪,硕士研究生杨耀星、李雯亚、路垚、张昊亮、杨潇、储德水、陈洁、胡晨可、孟君怡、秦璐璐、尧晓忆,他们仔细阅读了本书的初稿,帮助校对了本书部分章节的文字,并

绘制了部分章节的图表。

最后，囿于学识与篇幅，书中难免存在一些疏漏和不足之处，恳请学界同仁与广大读者批评指正。

作 者

2025 年 10 月

目 录

第一部分 面向多环节的应急协同增韧研究

第 1 章 考虑异质脆弱性的应急选址-分配协同增韧研究	3
1.1 应急选址-分配协同决策相关研究	3
1.2 应急选址-分配网络构建及脆弱性度量	5
1.2.1 应急选址-分配网络的构建	5
1.2.2 应急选址-分配网络的脆弱性分析	6
1.3 考虑异质脆弱性的应急选址-分配协同增韧模型	11
1.3.1 模型假设与符号说明	11
1.3.2 模型构建	12
1.4 模型求解与案例仿真	13
1.4.1 模型求解算法	13
1.4.2 案例场景与参数设置	15
1.4.3 对比分析	16
1.4.4 参数敏感性分析	19
1.5 本章小结	23
参考文献	24
附录 1-A	26
第 2 章 考虑异质韧性的应急选址-分配协同增韧研究	27
2.1 决策问题描述与相关研究	27
2.2 应急选址-分配体系中的异质韧性评估	28
2.2.1 应急选址-分配网络的构建	28
2.2.2 应急选址-分配网络的异质韧性评估	31
2.3 考虑异质抵御性的应急选址-分配协同优化决策	34
2.3.1 模型假设与符号说明	35
2.3.2 基于异质抵御性的应急选址-分配协同优化模型	36
2.3.3 模型求解与仿真分析	37
2.4 考虑异质适应力的应急选址-分配协同优化决策	47
2.4.1 建模前的准备	48
2.4.2 基于异质适应力的应急选址-分配协同优化模型	50

2.4.3 模型求解与仿真分析·····	51
2.5 本章小结·····	59
参考文献·····	60
附录 2-A·····	61
附录 2-B·····	61
附录 2-C·····	61
第 3 章 考虑异质库存成本的应急选址-分配协同增韧研究 ·····	62
3.1 决策问题描述与相关研究·····	63
3.2 面向备灾阶段的应急选址-分配协同增韧研究·····	64
3.2.1 模型假设与符号说明·····	65
3.2.2 考虑异质库存成本和设施韧性的应急选址-分配模型·····	66
3.2.3 模型求解与仿真分析·····	70
3.3 灾害响应阶段的应急选址-分配协同增韧研究·····	84
3.3.1 模型假设与符号说明·····	84
3.3.2 考虑异质库存成本和救援韧性的应急选址-分配模型·····	85
3.3.3 模型求解与仿真分析·····	88
3.4 本章小结·····	93
参考文献·····	94
附录 3-A·····	96

第二部分 面向多主体的应急协同增韧研究

第 4 章 不同风险偏好下政企联合储备的应急协同增韧研究 ·····	99
4.1 研究背景与相关研究·····	99
4.2 决策问题描述与建模准备·····	101
4.2.1 政企联合储备决策流程·····	101
4.2.2 假设条件与符号说明·····	101
4.3 不同风险偏好下政企应急协同增韧建模分析·····	103
4.3.1 风险中立时政企联合储备决策·····	103
4.3.2 风险规避时政企联合储备决策·····	107
4.4 模型求解与算例仿真·····	108
4.4.1 风险中立时政企联合储备仿真分析·····	109
4.4.2 风险规避时政企联合储备仿真分析·····	112
4.5 本章小结·····	116
参考文献·····	117

附录 4-A	118
附录 4-B	119
附录 4-C	119
附录 4-D	119
附录 4-E	119
第 5 章 考虑捐赠和补贴的政企联合储备应急协同增韧研究	120
5.1 研究背景与相关研究	120
5.2 决策问题描述与建模准备	122
5.2.1 考虑捐赠和补贴的政企联合储备决策流程	122
5.2.2 假设条件与符号说明	123
5.3 捐赠和补贴双轮驱动下政企应急协同增韧建模分析	124
5.3.1 考虑捐赠意愿的企业最优代储决策	125
5.3.2 面向企业捐赠的政府自身储备量最优决策	126
5.3.3 面向企业捐赠的政府代储补贴机制设计与分析	127
5.4 模型求解与算例仿真	127
5.4.1 企业最优代储决策的仿真分析	128
5.4.2 政府自身储备决策的仿真分析	130
5.4.3 代储补贴对政企决策的影响分析	132
5.5 本章小结	133
参考文献	133
附录 5-A	135
附录 5-B	135
附录 5-C	135
第 6 章 社会捐赠与政企联合储备的应急协同增韧研究	136
6.1 研究背景与相关研究	136
6.2 决策问题描述与建模准备	137
6.2.1 考虑社会捐赠的政企联合应急储备决策流程	138
6.2.2 假设条件与符号说明	138
6.3 考虑社会捐赠的政企应急协同增韧建模分析	140
6.3.1 面向社会捐赠的企业最优代储决策	140
6.3.2 面向社会捐赠的政府自身储备量最优决策	143
6.3.3 面向社会捐赠的政企联合应急储备决策分析	144
6.4 模型求解与算例仿真	145
6.4.1 面向社会捐赠的企业最优代储仿真分析	145
6.4.2 面向社会捐赠的政府自身储备量仿真分析	147

6.4.3 面向社会捐赠的政企联合应急储备决策仿真·····	148
6.5 本章小结·····	150
参考文献·····	150
附录 6-A·····	152
附录 6-B·····	152

第三部分 基于多维度的应急协同增韧研究

第 7 章 基于事理图谱的多维风险刻画与协同增韧研究·····	155
7.1 研究背景与相关研究·····	155
7.2 基于事理图谱的多维风险协同防控增韧决策·····	156
7.2.1 面向多维风险研判的事理图谱构建方法·····	156
7.2.2 基于事理图谱的多维风险协同防控增韧框架·····	158
7.3 面向多维风险研判的协同防控增韧决策应用·····	159
7.3.1 地震灾害事理图谱的构建·····	159
7.3.2 基于次生灾害风险识别的防控增韧研究·····	160
7.3.3 基于衍生社会风险预测的防控增韧研究·····	162
7.4 本章小结·····	164
参考文献·····	164
附录 7-A·····	166
第 8 章 多维耦合风险的动态演化机制与防控增韧策略研究·····	167
8.1 研究背景与相关研究·····	167
8.2 基于事理图谱的多维耦合灾害风险网络构建·····	169
8.3 多维风险网络的耦合机制与动态演化机制分析·····	171
8.3.1 多维度灾害风险间的耦合强度量化·····	171
8.3.2 多维耦合效应下灾害风险的动态演化·····	172
8.4 多维耦合灾害风险动态演化的案例分析·····	175
8.4.1 基于事理图谱的内涝风险网络构建·····	176
8.4.2 多维内涝风险的耦合强度分析·····	177
8.4.3 多维耦合内涝风险的演化仿真·····	178
8.5 本章小结·····	187
参考文献·····	188
附录 8-A·····	191
附录 8-B·····	191
第 9 章 面向灾害全过程的多维风险防控与协同增韧研究·····	192

9.1 研究背景与相关研究	192
9.2 多维风险演化网络的构建	194
9.2.1 多维系统视角下的内涝事理图谱构建	194
9.2.2 基于关联强度评估的多维内涝风险网络构建	195
9.3 内涝风险演化网络的风险评估及韧性度量分析	196
9.3.1 重要致灾因子识别	196
9.3.2 关键演化路径识别	198
9.3.3 面向内涝灾害全过程的城市韧性度量分析	199
9.4 面向灾害全过程的应急协同增韧策略分析	200
9.4.1 武汉市多维内涝风险演化网络构建	201
9.4.2 基于重要致灾因子分析的增韧策略	201
9.4.3 基于关键演化路径分析的增韧策略	204
9.4.4 不同防控策略对城市韧性提升的影响分析	206
9.5 本章小结	209
参考文献	210
附录 9-A	212

第四部分 基于多情境的应急协同增韧研究

第 10 章 面向地震场景的应急协同增韧研究	215
10.1 研究背景与相关研究	215
10.2 面向地震场景的城市抗震韧性评价体系架构	216
10.3 城市抗震韧性综合评价及其协同增韧机制研究	216
10.3.1 城市抗震韧性综合评价方法	217
10.3.2 基于复杂网络理论的协同增韧机制	221
10.4 面向地震场景的应急协同增韧实证分析	223
10.4.1 城市抗震韧性综合评价的实证研究	223
10.4.2 地震场景下应急协同增韧策略分析	226
10.5 本章小结	227
参考文献	228
附录 10-A	230
附录 10-B	230
第 11 章 面向暴雨灾害链的应急协同增韧研究	231
11.1 研究背景与相关研究	231
11.2 基于事理图谱的暴雨灾害链风险网络构建	233

11.3 面向暴雨灾害链风险网络的风险识别与韧性评估	234
11.3.1 关键风险事件的识别	234
11.3.2 风险传导路径的诊断	237
11.3.3 风险网络的韧性评估	238
11.4 暴雨灾害链风险识别与应急协同增韧的实证研究	239
11.4.1 四川省暴雨灾害链风险网络构建	239
11.4.2 针对关键风险事件干预的防控增韧效果对比	240
11.4.3 针对高风险传导路径干预的防控增韧效果对比	243
11.4.4 面向暴雨灾害链的应急协同增韧策略与建议	244
11.5 本章小结	247
参考文献	248
附录 11-A	249
第 12 章 面向金融风险的应急协同增韧研究	250
12.1 研究背景与相关研究	250
12.2 金融风险传染网络的构建与测度	252
12.3 金融风险网络中的关键节点识别方法	255
12.4 面向金融风险网络的应急协同增韧实证分析	256
12.4.1 银行间风险传染网络的构建与分析	256
12.4.2 基于银行风险网络的关键节点识别方法对比	258
12.4.3 不同蓄意攻击情境下银行风险网络脆弱性分析	261
12.5 面向金融风险的应急协同增韧策略与建议	264
12.6 本章小结	265
参考文献	266
附录 12-A	267

第一部分

面向多环节的应急协同增韧研究

应急管理是一个涉及多方因素的复杂系统工程，尤其是应急救援活动，其涵盖设施选址、物资库存管理以及资源分配调度等多个关键环节。这些环节并非孤立运行，而是通过动态交互构成有机整体，不同环节之间的协同效率直接影响应急系统的整体效能。因此，亟须深入解析各环节间的内在关联机制，只有系统地把握各环节间的相互作用机制，才能制定出精准有效的应急应对策略，进而全面推动应急体系整体韧性水平的提升。开展面向多环节的应急协同增韧研究，不仅有助于完善复杂应急决策理论体系，更能为实战中优化应急资源配置效率和增强应急响应能力提供科学支撑。

第 1 章 考虑异质脆弱性的应急选址-分配 协同增韧研究

一个科学高效的应急管理体系能在一定程度上降低各类灾害事件发生带来的负面影响，且灾前的主动防灾减灾往往比灾后被动响应救助更事半功倍。2022 年 6 月，国家减灾委员会印发《“十四五”国家综合防灾减灾规划》，明确提出“坚持主动预防为主”的基本原则，致力于构建高效科学的灾害防治体系，全面提升防灾减灾现代化水平，以切实保障人民群众生命财产安全^[1]。而备灾阶段的应急设施选址布局决策是防灾减灾中至关重要的环节之一，应急储备库选址的合理性会直接影响灾后应急救援的效果^[2,3]。

作为全书的开篇章节，本章围绕应急救援活动中储备库选址与物资分配环节的协同问题展开探究，旨在探寻通过选址和分配的协同优化来提升应急救援体系整体韧性的有效路径。具体地，本章从脆弱性视角切入，着重分析应急救援物流网络中节点与边所呈现出的异质脆弱特性，并深入探讨这种异质脆弱性对应急救援体系储备库选址与物资分配协同优化方案所产生的重要影响。

本章主要内容简述如下：首先，面向备灾阶段，基于复杂网络理论，通过节点脆弱性评价来刻画各应急储备库的异质性，且将各应急储备库之间以及储备库与各受灾需求点之间运输连接边的脆弱性指标纳入应急选址-分配决策过程来考量，构建一个综合权衡应急脆弱性、分配效率性和成本经济性的多目标选址-分配协同优化模型。接着，以江苏省覆盖 13 个地级市的应急物资储备网络为实证背景，设计 NSGA-II 算法对所构模型实施案例仿真求解和关键参数分析，并将求解结果与不考虑异质脆弱性的选址-分配协同方案进行对比讨论。仿真分析表明：脆弱性视角下异质应急储备库选址-分配协同方案不仅在成本控制和分配效率上表现良好，更能显著提升整个应急选址-分配网络的稳定性与韧性。本章所得管理启示可为应急决策者制定备灾规划提供有益借鉴和决策指导。

1.1 应急选址-分配协同决策相关研究

国内外针对应急设施选址或物资分配问题已有较为丰富的研究。近期成果如郭海湘等^[4]在规划滑坡灾害临时避难所区位布局时，以避难所数量最少、人员分离离散度最小、总疏散距离最短为目标建立了多目标应急选址模型。Cheng 等^[5]

提出了一个综合考虑需求不确定性和供应中断情况的应急设施选址-分配两阶段鲁棒优化模型。张玲和李继昭^[6]聚焦灾区道路可靠性,考虑需求不确定、救援物资有限及公平分配等因素,将应急设施选址-分配决策与车辆路径优化问题进行多目标联合优化。Chang 等^[7]关注大规模伤亡事件下应急物流环境的随机性和动态性,涉及随机伤员到达时间、随机分诊服务时间以及由路网脆弱性引发的随机出行时间等,在伤员集合点选址决策基础上研究有限急救医疗资源的有效配置。这些研究探讨了各种复杂情景下的应急设施选址-分配协同决策问题,但大多将选址-分配决策中的应急设施或分配行为视为同质性,很少考虑各应急设施因自身属性差异及面对不同应急情境时所展现出的异质性,具体体现为不同应急设施在服务水平、覆盖范围及适应特定应急情境能力上的显著差异。而差异在应急场景中普遍存在,应急网络中不同节点可能代表功能各异的设施(如仓库、医院、交通枢纽等),网络中的连边可能代表容量、速度及可靠性各异的运输方式或路径。故在应急设施选址-分配协同决策过程中充分认识和考虑这种异质性至关重要。

事实上,已有学者认识到异质应对应急决策的重要影响。如朱莉等^[8]在用差异化物资需求刻画各灾区异质性时,以“差异化反应时间”作为表征各救援区域异质性的关键指标并纳入选址-分配决策的优化目标。曹策俊等^[9]综合考虑救援物资调度与分配网络中幸存者需求相关的多层次异质性等特征,构建了面向多灾点、多需求点及多样化运输模式的救援物资反应性调度与分配双层规划模型。Sun 等^[10]考虑伤员差别化的受伤程度及伤情随时间恶化的异质情况,探究伤亡人数不确定时应急设施选址与伤员运输联合鲁棒优化问题。Grot 等^[11]基于对需求异质分布的考虑,通过追求最大化最小覆盖范围及最小化需求区域间覆盖范围差异这两个目标,讨论紧急医疗服务点选址规划中效率与公平性的权衡问题。樊或等^[12]探讨面向异质化运输条件的政企合作框架下应急物资联合储备与运输策略。此类文献从不同角度关注应急决策中各类异质性因素及其影响,为本章研究提供了启发和借鉴。但总体上,这些文献基本仍以普通网络优化方式分析面向异质特性的决策方案,几乎很少涉及复杂的网络视角。而应急选址-分配协同决策过程可抽象为一个多种异质因素交织的复杂网络,其中,异质性特征的一个显著体现便是差异化的脆弱性。因为脆弱性作为衡量系统在面对内外部各种扰动时,其结构、功能或性能易受损程度的关键指标,能直接反映复杂网络在遭遇突发事件时的稳定性与恢复能力。换言之,通过科学分析复杂网络的脆弱性,可有效表征和刻画应急决策过程中的各类异质性因素,这不仅有助于准确识别并合理剔除应急物流网络中的相对薄弱部分,还能优化网络结构、提升网络韧性,保障应急管理活动更高效开展。

因此,本章研究创新性地从复杂网络脆弱性视角出发,分析备灾阶段应急储备库选址-分配网络中设施节点和运输连接边的脆弱性,以此展示应急选址-分配

网络的异质性。结合脆弱性分析结果,以追求脆弱性最低、救援效率最高和应急总成本最低为优化目标,构建多目标异质应急储备库选址-分配协同模型。以江苏省13个地级市应急物资储备分配网络为案例背景,设计NSGA-II算法对所构模型进行案例仿真求解,并进一步实施对比分析和关键参数敏感性分析,得出相关结论,为政府部门应急决策提供管理启示和参考建议。

1.2 应急选址-分配网络构建及脆弱性度量

现阐述本章聚焦的决策问题:在备灾阶段,针对应急储备库选址以及从储备库到各受灾需求点的应急物资分配运作开展协同集成优化决策。具体而言,首先,依据实际应急物资运输线路构建一个应急选址-分配复杂网络;其次,通过对比分析选定合适的量化指标与量化函数,用以表征该复杂网络中各节点和连边的脆弱性。本节内容是后续构建脆弱性视角下异质应急储备库选址-分配协同模型的基础。

1.2.1 应急选址-分配网络的构建

以江苏省应急物资储备库选址规划为例,2021年江苏省人民政府办公厅印发的《江苏省“十四五”应急管理体系和能力建设规划》明确提出:“推进全省应急物资仓储体系建设,提升应急物资仓储保障能力。新建1个省级应急物资储备库,新建和改扩建一批市级应急物资储备库,推进县级应急物资储备库建设”^[13]。基于此背景,需从江苏省13个地级市中遴选应急储备库建设地点,构建一个覆盖全省的应急选址-分配网络。

在此参考公共交通网络领域常见的建模方法,主要有Space P法、Space L法、Space B法和Space C法等。其中,Space P法是将每个交通站点抽象为网络节点;若两个节点间有相互连通的交通线路,则将该交通线路视为这两个节点间的连接边,即网络连边。由于本章研究聚焦备灾阶段应急体系中储备库的优化选址,以及如何高效地将物资从作为供应点的储备库分配至各受灾需求点的问题,为最大限度地救援各受灾点,假设允许多个供应点同时为受灾点提供应急物资援助。基于此,选择采用Space P法构建一个抽象的无向加权应急物流网络,以描述覆盖江苏省13个地级市的应急储备库选址-分配问题。具体地,将连云港、徐州、宿迁、淮安、盐城、泰州、扬州、南通、南京、镇江、常州、无锡、苏州这13个城市抽象为网络节点,并分别记为节点1~13;将各城市间的高速公路线路抽象为网络连边;在网络连边上标注各节点间实际线路的距离(单位:km),以便后续据此设定不同权值。需要说明的是,即便某些城市本身是受灾需求点,但考虑到其地理位置等因素,仍可将其作为应急储备库选址的备选方案,以确保所构建的应

图 1-1 抽象的应急选址-分配复杂网络示意图

1.2.2 应急选址-分配网络的脆弱性分析

在备灾阶段, 应急选址-分配网络的脆弱性与整个网络拓扑结构紧密相关。为了能精准实施脆弱性评估, 需重点关注网络中任一节点或连边失效对网络整体连通性能的影响。网络全局效率作为衡量网络整体连通性的指标, 具有直观且有效的统计描述特性, 能全面综合地反映网络面对潜在中断时的适应能力和稳健程度^[14,15], 故本节研究选取网络全局效率作为表征网络整体连通性能的关键指标。

1. 节点脆弱性分析

对应急选址-分配网络中的节点进行脆弱性分析,观察各节点在某特定评价指标下依次失效后所致网络连通性动态变化,从而量化并直观反映各节点在整个网络中的相对重要程度^[16,17]。而有关节点重要性的表征,可选用复杂加权网络中两个经典且被广泛应用的统计度量标准进行对比分析^[14,15]。

一是节点强度,该指标用于衡量节点通过连边与其他节点相互作用的总强度,能反映节点与其他节点联系的紧密程度,其数学表达式如下:

$$S_i = \sum_j a_{ij} w_{ij} \quad (1-1)$$

其中, S_i 表示节点 i 的强度; a_{ij} 是网络邻接矩阵中的元素, 当节点 i 与 j 直接相连

时, 有 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$; w_{ij} 表示节点 i 与 j 之间连边的权重。

针对如图 1-1 所示抽象的应急物资选址-分配网络, 采用节点之间高速公路距离 d_{ij} 的倒数作为连边权重(即 $w_{ij}=1/d_{ij}$)来计算节点强度。如此, 两节点间高速公路距离越短, 意味着二者连接越紧密, 连边权重也就越大, 节点强度随之越高; 相反, 处于网络边缘的节点, 因其与网络中心节点距离较远、连接较弱, 较小的连边权重使得这些边缘节点的强度相对较低。即在所构建的应急选址-分配网络中, 节点强度与节点间联系的紧密程度呈正相关、与节点间的距离呈负相关。

二是加权聚类系数, 该指标可揭示节点周围局部网络的紧密程度以及集聚效应, 其数学表达式如下:

$$C_i^w = \frac{1}{S_i(k_i-1)} \sum_{j,k} \frac{w_{ij} + w_{ik}}{2} a_{ij} a_{ik} a_{jk} \quad (1-2)$$

其中, C_i^w 表示加权网络中节点 i 的聚类系数; S_i 、 a_{ij} 与 w_{ij} 的含义与式(1-1)相同; k_i 是节点 i 的度。

相比之下, 节点强度主要反映节点自身与网络中其他节点的连接紧密程度, 能在一定程度上体现节点在整个网络中的影响力或活跃程度。通常, 节点强度数值更大的节点往往在网络中承担更为关键的角色, 发挥更重要的作用。而加权聚类系数侧重于相邻节点之间的连接紧密程度, 主要刻画节点周围局部网络结构的紧密性。加权聚类系数的数值越大, 表明该节点与其邻点之间的联系愈发紧密。

为深入探究所构建的应急选址-分配网络特性, 现借助 Ucinet 软件, 对比分析网络中各节点在节点强度和加权聚类系数这两种不同评价指标下依次失效时, 网络全局效率的变化情况, 具体操作流程如图 1-2 所示。

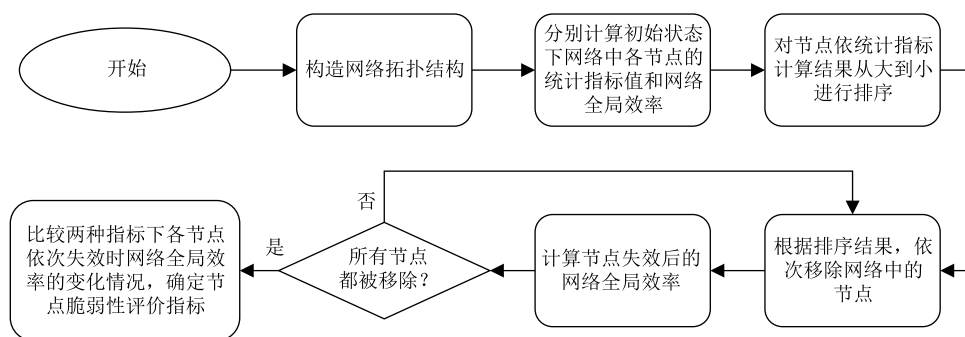


图 1-2 节点失效模拟仿真流程图

通过模拟仿真节点失效过程，得到网络中各节点依次失效后所致网络全局效率的变化情况如图 1-3 所示。从图 1-3 可看出，在两种评价指标下，随着网络中各节点逐一失效，网络全局效率持续下降，即网络整体的连通性逐渐变差。不过，就大多数节点而言，在加权聚类系数指标下，网络全局效率的下降速度比在节点强度指标下略快，这表明加权聚类系数对大部分节点脆弱性的识别更为敏感。特别是当失效节点个数小于 5 个时，基于加权聚类系数指标的网络全局效率下降速度明显快于在节点强度指标下的情形。这说明：与节点强度指标相比，加权聚类系数指标在识别该网络中脆弱性较高的节点方面更具优势。因此，这里选择加权聚类系数指标来衡量应急选址-分配网络节点的脆弱性，并在完成对各节点脆弱性程度的归一化处理后将结果列于表 1-1。

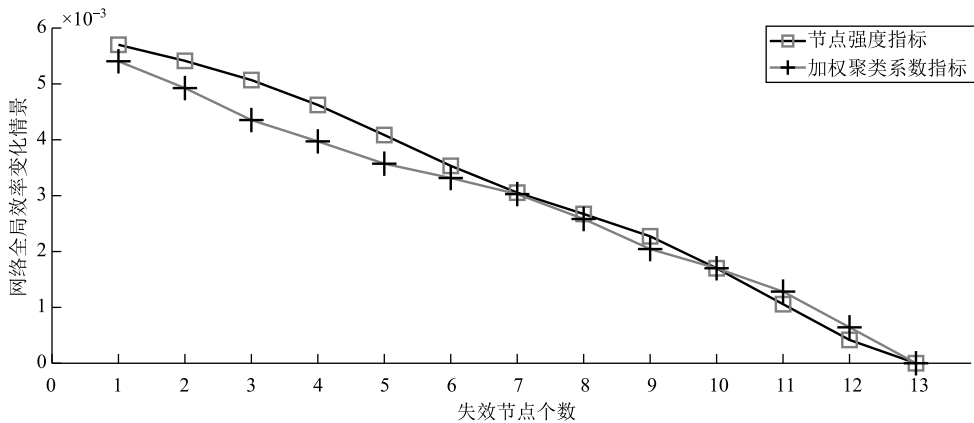


图 1-3 节点失效时网络全局效率的变化情况

表 1-1 应急选址-分配网络中各节点的脆弱性值

节点城市	脆弱性值	节点城市	脆弱性值
连云港	0.07224	南通	0.07635
徐州	0.06957	南京	0.07816
宿迁	0.07465	镇江	0.07978
淮安	0.07848	常州	0.07918
盐城	0.07762	无锡	0.07769
泰州	0.08002	苏州	0.07593
扬州	0.08036		

2. 连边脆弱性分析

参考文献[18], 应急选址-分配网络中连边的脆弱性并非由单一因素决定, 而是与连边失效概率以及连边失效前后网络全局效率的变化情况有关。

一方面, 网络连边失效概率是一个复杂的概念, 受多种因素影响, 这些因素涉及交通运输线路的数量、长度、质量、维护状况以及环境因素、人为操作等各方面。这里将网络连边失效概率视为受实际交通运输线路数量及其相应有效路径长度的综合影响, 主要基于以下考量: ① 从复杂网络理论角度而言, 增加交通运输线路数量可有效提升网络冗余性, 网络冗余性增强意味着存在更多路径和资源, 进而降低整个网络失效的可能性, 即冗余性设计是提升网络稳定性和可靠性的重要手段之一^[19,20], 故将运输线路数量作为网络连边失效概率的关键影响因素之一; ② 较长的运输线路往往会面临更多不确定性和潜在风险, 如天气变化、地形复杂、维护困难等, 这些均可能增加线路失效概率^[21,22], 故深入探究有效路径长度对连边失效概率的影响也十分必要。由此, 网络连边失效概率的表达式如下:

$$P_{ij} = \frac{1}{q_{ij}} \cdot \frac{d_{ij}}{\sum_{i,j} d_{ij}} \quad (1-3)$$

其中, P_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间连边失效的概率; q_{ij} 是节点 i 和 j 之间运输线路的数量, 其具体取值可通过查询地图中 i 与 j 两节点间直接相连的高速公路线路数来确定; d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的有效路径长度。需说明的是, 由于 i 、 j 两节点间可能存在多条运输线路, 面对应急物资分配场景, 为贴合实际需求, 在此引入交通领域常用的有效路径概念, 具体是以满足时间最小为约束条件来选择有效路径, 这契合应急救援对时效性的严格要求, 故准确而言, d_{ij} 指的是 i 与 j 间多条运输线路中耗时最短的线路长度。

另一方面, 鉴于图 1-1 构建的是一个无向加权应急选址-分配复杂网络, 可采用复杂加权网络中平均路径长度指标来度量连边失效前后网络全局效率的变化^[23], 即通过观察网络平均路径长度的变化来直观展现连边失效对网络造成的受损程度^[24]。这是因为, 平均路径长度与网络全局效率紧密相关。一般而言, 平均路径长度越短, 网络中物资运输分配效率越高, 即网络全局效率越高; 反之, 当连边失效导致平均路径长度增加时, 则认为网络全局效率有所下降。

综上, 连边失效概率反映了网络中每一条连边面临潜在破坏的风险程度, 而平均路径长度的变化则直接衡量了此类破坏对网络整体运行效率的实际影响。将两者综合考量, 有助于精确识别网络中的薄弱环节, 为科学、合理地评估应急选址-分配网络中的连边脆弱性提供一个多维度且可量化的分析框架。由此, 应急选址-分配网络连边脆弱性可定量表达为

$$V_{ij}^E = P_{ij} \cdot \Delta L \quad (1-4)$$

其中, V_{ij}^E 表示节点 i 和 j 之间连边的脆弱性值; ΔL 是节点 i 、 j 之间连边失效前后网络平均路径长度的变化量。需要特别指出的是, 连边失效所引发的平均路径长度变化量 (ΔL) 越大, 说明该连边在网络中越重要, 不过, 这并不直接等同于该连边具有更高的脆弱性。

式(1-4)具有双重重要含义。其一, 它明确指出对脆弱性的评估需考虑到连边重要性这一核心要素。当某条连边失效致使网络平均路径长度变化量 (ΔL) 显著增加时, 这不仅直观凸显该连边作为关键桥梁的角色及其失效对网络连通性造成的重大冲击, 同时也从侧面反映出网络整体可能存在潜在脆弱性。其二, 它进一步强调, 连边脆弱性的评估是一个多维度考量过程, 不仅取决于连边自身的重要性程度, 还需综合考虑连边的失效概率、连边失效后对网络连通性的具体影响, 以及网络中是否存在替代路径等众多复杂因素。

换言之, 连边的重要性并不直接等同于其脆弱性。尽管某些连边因显著影响平均路径长度 (ΔL 很大) 而显得极为关键和重要, 但若其具有较高的可靠性和冗余性(如存在多条可替代路径), 导致失效概率 P_{ij} 较低, 则该连边实际上未必脆弱; 相反, 即便某条连边的重要性相对较低 (ΔL 很小), 但若其失效概率 P_{ij} 很高且在网络中缺乏替代路径, 则该连边可能非常脆弱。

同样, 应用 Ucinet 软件, 分别计算出网络中各连边失效的概率以及连边失效前后网络平均路径长度的变化值, 并根据式(1-4)得出应急选址-分配网络中各连边的脆弱性值。因所构建的应急选址-分配复杂网络(如图 1-1 所示)共有 78 条连边, 这里依脆弱性由大到小顺序仅展示排名前十的连边脆弱性值并列于表 1-2, 所有连边的脆弱性值见附录 1-A 中表 1-A-1。需要说明的是, 表 1-2 中第一列采用“节点 i -节点 j ”的表述方式来表示节点 i 和 j 之间的连边。

表 1-2 应急选址-分配网络中部分连边的脆弱性值(排名前十)

连边	失效概率	平均路径长度变化值	脆弱性值	排序
盐城-南京	0.01457	3.34615	0.04874	1
淮安-无锡	0.01605	3.00000	0.04815	2
连云港-盐城	0.01660	2.87180	0.04767	3
盐城-常州	0.01215	3.91027	0.04750	4
宿迁-盐城	0.01204	3.93590	0.04738	5
连云港-徐州	0.01127	4.11539	0.04637	6
淮安-苏州	0.01775	2.60256	0.04621	7
南通-镇江	0.01088	4.20513	0.04577	8
盐城-镇江	0.01061	4.26923	0.04529	9
淮安-南京	0.01055	4.28205	0.04519	10