

我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析^{*}

朱伟¹, 陈长坤², 纪道溪², 孙云凤²

(1. 北京城市系统工程研究中心, 北京 100089; 2. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

摘要:提出一种基于灾害演化网络的风险分析方法, 针对城市暴雨灾害的演化过程进行了风险分析。利用复杂网络理论构建北方城市暴雨灾害演化网络模型, 将危机事件分为三个等级, 并探讨了事件级别和出入度的关系; 分析城市暴雨灾害链演化特点和暴雨危机事件后果蔓延规律, 得到关键危机事件和演化链。结果表明, 交通堵塞是我国北方城市暴雨灾害系统中关键危机事件; 暴雨灾害演化系统存在短链、长直链和循环链三种结构, 其中循环链中的危机事件互为因果, 可自行激化, 是灾害演化网络控制的关键结构。

关键词:暴雨灾害; 危机事件; 灾害演化网络; 出入度; 灾害链; 北方城市

中图分类号: S422 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)03-0088-04

0 引言

由于城市化进程快, 人口密集; 城市规划与建设对防洪问题考虑不足, 湖泊少, 蓄洪、调洪能力差; 降雨时间过于集中, 日常沙尘易沉积, 很容易造成排水系统的堵塞或者不畅等原因, 在我国北方城市, 暴雨极易形成灾害, 产生严重的后果, 造成巨大的损失。而由城市暴雨造成的内涝、交通等一系列次生危机事件也是困扰城市发展的重大问题, 城市规划与管理工作要求对城市暴雨灾害发生条件、演化过程和风险控制进行深入的理论研究, 以达到最大限度降低对城市生命线系统损坏的目的。

国内外学者从灾害系统和灾害链的角度进行相关研究, 并提出了各种灾害演化模型^[1-3]。目前利用复杂网络对灾害演化的分析取得了较大成果, 翁文国^[4]等人针对关键城市生命线系统, 欧阳敏^[5]等考虑了网络的冗余现象, 对灾害演化过程和影响参数进行了深入的理论分析。陈长坤等则在危险因素辨识基础上, 结合复杂网络理论, 探讨灾害的衍生灾害及其后果的蔓延机制^[6]。而针对城市暴雨灾害, 目前学者主要分析了暴雨自身规律^[7-8], 建立各种评价模型进行区域灾害风险评

估和预测^[9-10]。

本文以暴雨为灾害源, 构建危机事件演化网络模型, 分析暴雨次生危机事件后果蔓延规律和危机事件间的相互衍生机制, 辨识暴雨灾害系统中的关键环节, 确定暴雨灾害演化链最佳断链位置, 对暴雨灾害网进行区域风险评估与预测, 为城市暴雨衍生灾害的最佳风险控制措施及方案的确定提供参考, 有利于改善突发性公共安全事件应急响应速度与决策水平。

1 城市暴雨灾害演化分析模型

1.1 城市暴雨灾害演化分析方法

利用复杂网络理论, 分析我国北方城市暴雨灾害后果的蔓延特征, 构建灾害演化网络模型, 确定危机事件和事件级别的关系, 在此基础上进行危机事件后果的风险控制。图1给出了城市暴雨灾害演化的定性分析技术线路图, 主要提出了单元划分→危险因素辨识→灾害链分析→网络模型构建→危机事件分析→关键演化链断链分析→暴雨灾害控制的研究方法。

在北方城市暴雨灾害系统的演化分析中, 首先针对我国北方城市生命线系统的基本特征与现状, 辨识暴雨可能引发的危机事件及其可能演化

^{*} 收稿日期: 2010-12-31

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(8111003)

作者简介: 朱伟(1978-), 男, 江西南昌人, 博士, 副研究员, 从事城市风险评估与应急管理研究. E-mail: zhuweianquan@126.com

通讯作者: 陈长坤(1977-), 男, 福建福安人, 博士, 教授, 从事重大突发公共事件演化与控制研究.

E-mail: cckchen@mail.csu.edu.cn

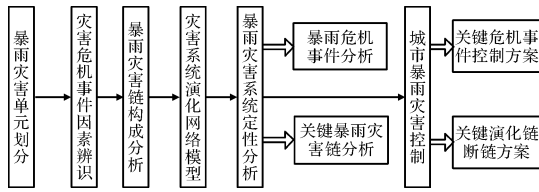


图1 城市暴雨灾害演化定性分析技术线路图

的后果,分析各个次生事件的相互演化机制和规律。对现有北方城市暴雨危机事件后果进行特征分析和归纳分类,确定城市易损区域和关键环节,在此基础上,进行危险因素辨识,构建城市暴雨灾害演化链和灾害演化网,确定了基于节点出入度分析和灾害演化规律辨识的暴雨灾害风险分析

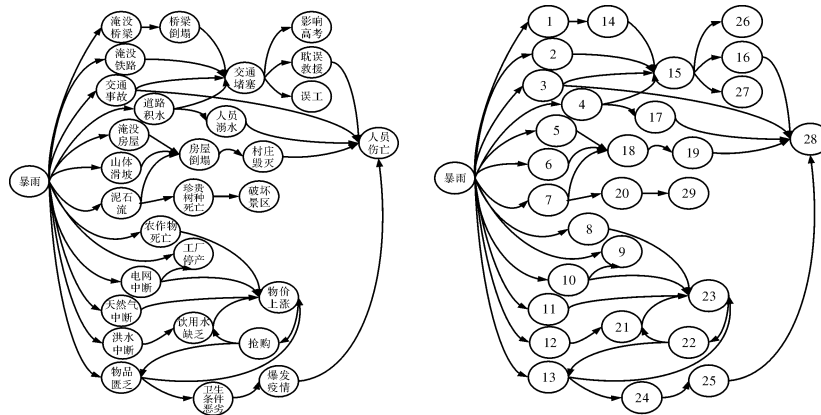


图2 城市暴雨灾害演化链的网络拓扑结构及编号

顺序对暴雨次生危机事件进行分级,主要分为三级,第一级是暴雨直接导致的子危机事件,如淹没桥梁、泥石流、电网中断等;第二级是暴雨子危机事件导致的其它的危机事件,如房屋倒塌、村庄毁灭等;第三级是暴雨造成的最终影响的危机事件,如人员伤亡、破坏景区、误工等。在本文所构建的暴雨危机事件演化系统中节点元素共有29个,其中13个一级演化危机事件,12个二级演化危机事件,4个三级演化危机事件。

方法,依据分析结果,提出合理有效的城市暴雨风险控制建议和对策措施。

1.2 城市暴雨灾害演化网络拓扑模型

按照暴雨事故致灾因素的独立性,完整性,指标收敛性等原则,对暴雨灾害危机事件进行单元划分,主要有交通、环境、建筑、供应系统、公共卫生、农业、工业等,暴雨灾害对子单元的影响后果具体表现为交通堵塞、人员伤亡、财产损失、居民生活困难、农产品价格上涨等。依据暴雨灾害危机事件的致灾因素和影响后果,得到城市暴雨灾害演化系统的网络拓扑结构,并对危机事件进行1~29个编号(图2)。

另外,按照暴雨灾害演化链中危机事件的蔓延

2 北方城市暴雨灾害演化系统的风险分析

2.1 北方城市暴雨关键危机事件分析

在北方城市暴雨灾害网络拓扑结构基础上,利用复杂网络和图论理论,确定危机事件的出入度,并结合危机事件的分级,分析不同危机事件级别与危机事件入度、出度之间的关系(表1)。

表1 北方城市暴雨危机事件出入度和事件级别统计表

危机事件名称	事件级别和出入度	危机事件名称	事件级别和出入度	危机事件名称	事件级别和出入度
淹没桥梁	一级 1/1	天然气中断	一级 1/1	饮用水缺乏	二级 1/2
淹没铁路	一级 1/1	供水中断	一级 1/1	抢购	二级 1/2
交通事故	一级 2/1	物品匮乏	一级 2/2	物价上涨	二级 2/4
道路积水	一级 2/1	桥梁倒塌	二级 1/1	卫生条件恶劣	二级 1/1
淹没房屋	一级 1/1	交通堵塞	二级 3/4	爆发疫情	二级 1/1
山体滑坡	一级 1/1	耽误救援	二级 1/1	影响高考	三级 0/1
泥石流	一级 2/1	人员溺水	二级 1/1	误工	三级 0/1
农作物死亡	一级 1/1	房屋倒塌	二级 1/3	人员伤亡	三级 0/5
工厂停产	一级 0/2	村庄毁灭	二级 1/1	破坏景区	三级 0/1
电网中断	一级 2/1	珍贵树种死亡	二级 1/1		

在灾害演化网络模型中,入度表示能够诱发该危机事件的父危机事件的数量,它反映了该危机事件发生的可能性,入度越大,表明其父危机事件就越多,越容易发生。而出度则反映了该危机事件能够引发的子危机事件的数量,出度越大,表明其子危机事件越多,该事件的影响力就越大。根据表1,可以看出,对于一级危机事件,只有暴雨源灾害才能诱导其发生,而其诱发的子危机事件数量会有所增加;二级危机事件中,导致该危机事件的途径增多,结构渐趋复杂,特别地,交通堵塞事件的出入度达到了3和4,表明该事件发生的可能性高、且造成的影响大,是该灾害网络中较为关键的节点;三级危机事件中,人员伤亡事件的入度达到了整个系统的最大值,而所有的三级危机事件出度都为0,是所建暴雨危机事件演化网络的终点,这与本文所构建演化网络主要涉及前3级主要事件相关,而实际上这些事件依然可能引发其它危机事件。

在灾害系统的各危机事件中,人员伤亡、物价上涨、交通堵塞和房屋倒塌等危机事件入度较大,表明造成这些危机事件的因素很多,而交通堵塞出度最大,表明该事件造成的后果影响范围广。在整个演化网络中,交通堵塞为关键事件,既要破坏导致其诱发的条件,同时还要重点关注由交通堵塞造成的后果。

2.2 北方城市暴雨灾害关键演化链分析

基于城市暴雨灾害演化链的网络拓扑结构,可以看出,灾害演化网络中的演化链可以分为循环型和直链型,直链型可以细化为短链和长链两种。以下将对北方城市的暴雨灾害链结构形式进行具体分析,从而辨识出不同灾害链的演化规律,提高暴雨灾害风险防控能力。

直链式是指暴雨危机事件在演化过程中没有出现环状拓扑结果的演化链,如图3所示。其中图3a给出了只有两个元素的短直链结构,如暴雨导致的交通事故→人员伤亡、电网中断→工厂停产为短链。而图3b则给出了含有两个以上元素的长直链结构,如桥梁淹没(倒塌)→交通堵塞→影响高考(特定时期)和泥石流→珍贵树种死亡→景区破坏均为长直演化链,这种演化链造成的后果往往会随时间不断累积,如不及时加以控制,造成后果的范围和程度将会大大扩大,实际分析表明,在上述的两个长直链中,暴雨导致的泥石流→珍贵树种死亡→景区破坏是一个面积广且具有长效的影响过程。

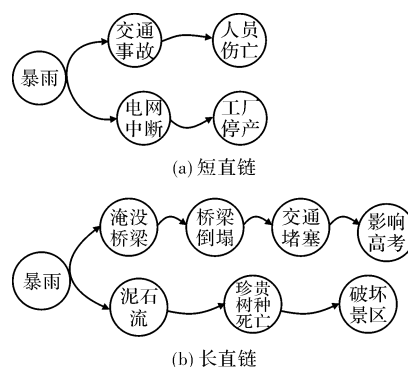


图3 北方城市暴雨灾害演化短直链和长直链

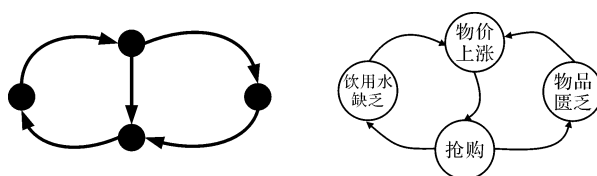


图4 北方城市暴雨演化系统循环链结构与实例

图4给出了暴雨灾害演化系统中循环链式结构与实例,该演化链的结构特点是:循环链中的危机事件存在互为因果关系,在演化过程中随着时间的不断推进,而可能自行激化,比一般的直链式演化链导致的结果更严重。在暴雨危机事件演化网络中包含了两个嵌套的环链结构,其中包括了饮用水缺乏、物价上涨、抢购、物品匮乏等四个元素,构成了两个循环链。物品匮乏之后,市场中的该类物品物价上涨,同时人们还出现抢购,抢购导致了物品更加匮乏,物价上涨更加厉害,在此循环过程中对社会造成的危害越来越大。因此,循环链一般是灾害演化网络控制中的关键结构,辨识这些结构及其危机事件的发生、发展机制,对于控制灾害系统的损失具有重要的意义。

图5给出了包含12个危机事件元素的暴雨危机事件演化链结构,该演化链中危机事件个数较多,且涵盖了城市暴雨危机事件的三个级别,一级危机事件主要作用于城市生命线系统子单元,暴雨造成了供电、供气和供水系统的故障,随时间延续,逐渐引发城市恐慌等一些列社会问题,造成了严重后果。另外,该子系统中也包括了物价上涨→物品匮乏→抢购→饮用水缺乏这个嵌套的环链,也对造成的后果严重性会有所增大,因此针对这种类型的灾害演化控制时不仅要考虑嵌套的环链对暴雨危机事件灾害演化链的影响,还需考虑在嵌套环链的基础上进一步演化的其它子危机事件所造成的损失,如物品匮乏还可以导致卫生条件进一步恶劣,导致疫情爆发,致使人员

伤亡。

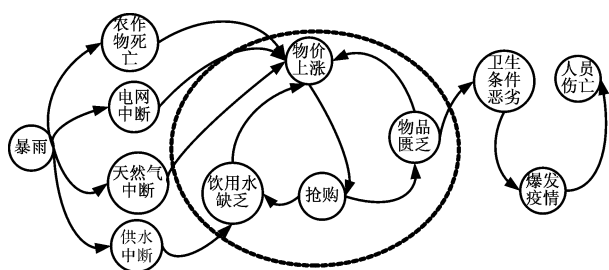


图5 包含12个元素的北方城市暴雨灾害演化链

3 结束语

本文对我国北方城市暴雨引发的灾害演化网络进行了分析,得到以下结论:

(1) 构建了以危机事件为节点,以事件诱发关系为连接边的灾害演化网络模型,根据我国北方城市暴雨网络拓扑结构,采用节点出入度分析法和灾害链演化规律辨识法,进行危机事件及其演化过程的风险辨识,提出风险控制的重点关注方向;

(2) 采用了定性分析法对危机事件和演化链进行研究。针对城市暴雨衍生的危机事件,按照影响后果的严重程度分为了三级,研究了危机事件的出入度和危险等级关系,分析了灾害演化网络关键演化链的结构与特点,进一步分析其演化后果的范围和程度;

(3) 在所有暴雨次生危机事件中,交通事故和交通设施的暴雨破坏都能造成交通堵塞,而交通

堵塞严重影响了居民的正常生活。从网络节点的出入度理论上确定了交通堵塞是整个演化系统的关键节点;而物价上涨,房屋倒塌和人员伤亡等确定为重要危机节点。因而在城市暴雨灾害防控中,重点是阻断交通堵塞,物价上涨和人员伤亡等诱发途径和后果。

参考文献:

- [1] Buzna L, Peters K, Ammoser H, et al. Efficient response to cascading disaster spreading[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(5): 1-7.
- [2] Simonsen I, Buzna L, Peters K, et al. Transient dynamics increasing network vulnerability to cascading failures[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(21): 1-4.
- [3] 冯玉涛,肖盛燮. 崩滑流地质灾害链式机理及其优化防治[J]. *灾害学*, 2009, 24(3): 22-26.
- [4] 翁文国,倪顺江,申世飞,等. 复杂网络上灾害动力学研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 1938-1943.
- [5] 欧阳敏,费奇,余明晖. 基于复杂网络的灾害蔓延模型评价及改进[J]. *物理学报*, 2008, 57(11): 6763-6770.
- [6] 陈长坤,孙云凤,李智. 冰雪灾害危机事件演化及衍生链特征分析[J]. *灾害学*, 2009, 24(1): 18-24.
- [7] 许静,孙征,马宇熹. 济南市“7.18”特大暴雨洪水灾害成因分析及对策[J]. *城市道路与防洪*, 2009, 6(6): 90-95.
- [8] 李凤琴. 宁夏暴雨洪涝的调查分析[J]. *宁夏农林科技*, 2004(5): 54-56.
- [9] 殷杰,尹占娥,王军,等. 基于GIS的城市社区暴雨内涝灾害风险评估[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(6): 92-95.
- [10] 赵彩萍,荆肖军,李艳红,等. 城市暴雨内洪预报研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2008, 18(29): 114-117.

Analysis on the Risk and Evolution Process of Rainstorm Disaster in Cities of North China

Zhu Wei¹, Chen Changkun², Ji Daoxi² and Sun Yunfeng²

(1. Beijing Research Center of Urban Systems Engineering, Beijing 100089, China; 2. Disaster Prevention Science and Safety Technology Institute, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: A risk analysis method based on disaster evolving network is put forward, and a risk analysis on evolution process of urban rainstorm disaster is conducted. By using complex network theory, the rainstorm disaster evolution network model is constructed, by which the rainstorm events are graded into three levels, and the relationship between levels and out-in degree of those events are discussed. Evolutionary characteristics of urban storm disaster chain and law of the consequences of the spread of storm crisis are analyzed to get the evolution chain of the key chain crisis. The results show that traffic jam is the key crisis event in urban rainstorm disaster systems, and all the evolutionary chains could be divided into short chain, long straight chain and recycle chain, in which, the crisis events in the recycle chain could induce each other and aggravate by itself, which is the crucial structure in the disaster network.

Key words: rainstorm disaster; crisis events; disaster evolution network; out-in degree; disaster chain; cities of north China