

# 基于复杂网络的台风灾害演化系统风险分析与控制研究<sup>\*</sup>

陈长坤<sup>1,2</sup>, 纪道溪<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木建筑学院防灾科学与技术研究所, 湖南 长沙 410075;

2. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 基于复杂网络理论, 提出了一种针对自然灾害演化系统的风险分析与控制的思路与方法。以“莫拉克”台风为例, 构建了包含 30 个危机事件与 39 条连接边的台风网络演化模型; 采用网络节点的出入度、子网节点数和包含节点的支链数进行风险分析, 并确定关键节点, 进一步提出断链方案和控制建议。结果表明: 狂风、暴雨、洪水、山体滑坡、泥石流、交通堵塞和村庄毁坏等事件风险较大, 是台风灾害系统的关键节点。据此提出建议: 提高城市排水系统运行能力, 加强交通系统监管和调度力度, 启动农村人员安置和灾后重建预案。

**关键词:** 台风灾害; 灾害演化; 风险分析; 断链控制; 网络模型

**中图分类号:** X4; P426.63   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2012)01-0001-04

## 0 引言

台风与地震、洪涝、干旱、火灾等构成了世界主要自然灾害, 对当地的农业、交通、城市生命线和建筑工程等方面构成了严重威胁。而对台风灾害系统的理论研究可以降低台风灾害对人类社会造成冲击, 具有重要的实践价值和现实意义。

目前, 针对台风, 国内研究主要集中在其成因、特征及影响因素<sup>[1-5]</sup>、数值模拟<sup>[6-7]</sup>和灾害的预测评估<sup>[8-9]</sup>等方面。目前, 复杂网络模型<sup>[10-12]</sup>和灾害链<sup>[13-15]</sup>的研究为台风灾害演化系统的探讨提供了理论依据。

本文在已有研究基础上, 构建了 2009 年“莫拉克”台风灾害演化网络模型, 采用模型中节点出度、节点入度、节点子网数及节点包含支链数等参数对台风灾害系统进行风险分析, 并提出初步的控制建议。

## 1 “莫拉克”台风灾害系统演化模型

### 1.1 台风灾害系统的危机事件辨识

台风灾害系统由台风自身携带的大风、暴雨、

风暴潮及其引发的次生灾害共同构成。通过案例分析与辨识后, 确定了 30 个主要危机事件及事件间的关系, 图 1 中给出了“莫拉克”台风灾害演化网络模型。

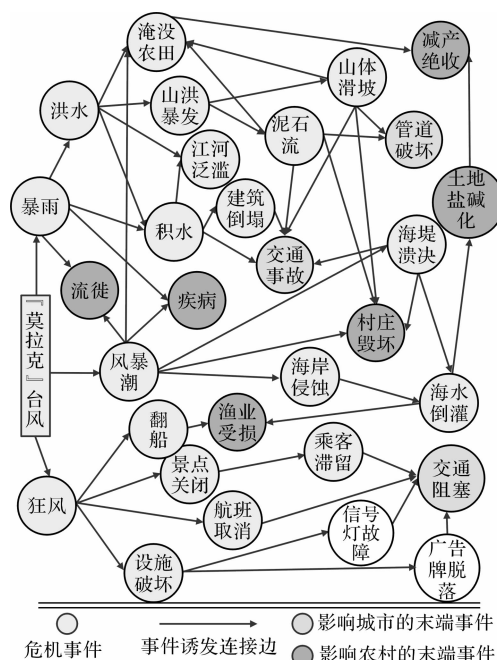


图 1 “莫拉克”台风灾害演化系统拓扑图

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011-05-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(50706059); 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2009-KF05); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 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@csu.edu.cn

## 1.2 台风灾害系统事故演化拓扑结构

“莫拉克”台风灾害系统演化模型共有 30 个节点和 39 条边，其中 30 个节点代表 30 个危机事件，39 条边表明演化关系。这些事件和演化关系构成不同的灾害链，主要有长链、直链和环链等，每条链上的危机事件个数从 2 到 5 不等。

需要指出的是，减产绝收、管道破坏、交通事故、疾病、流徙、村庄毁坏、渔业受损和交通堵塞等 8 个事件处于网络模型的终端位置，被定义为末端危机事件，并根据影响区域，进一步细分为影响农村的末端危机事件(村庄损坏、渔业受损、减产绝收、土地盐碱化、流徙和疾病)和影响城市的末端危机事件(管道破坏、交通堵塞和交通事故)。

## 2 “莫拉克”台风灾害演化系统的风险分析及断链控制

### 2.1 基于节点出入度的风险分析与断链控制

灾害网络模型中，危机事件出度越大，则该事件可能造成的后果就越严重；入度越大，则导致该事件的途径就越多，控制难度也相应增加。危机事件出入度由系统网络拓扑结构确定，有一个箭头指向该事件，则入度加 1；有一个箭头从该事件引出，则出度加 1。表 1 中给出了“莫拉克”台风系统中各危机事件的出入度值，据此进行危机事件风险分析。

表 1 “莫拉克”台风灾害系统危机事件出入度的风险分析

危机事件	出度	入度
暴雨	4	1
风暴潮	7	1
狂风	4	1
洪水	4	1
淹没农田	1	4
减产绝收(末端节点)	*	2
山洪暴发	2	1
泥石流	4	1
山体滑坡	4	1
管道破坏(末端节点)	* * *	2
江河泛滥	1	2
积水	3	2
建筑倒塌	1	1
交通事故(末端节点)	* *	5
海堤溃决	3	2

续表 1

危机事件	出度	入度
土地盐碱化	1	1
流徙(末端节点)	*	2
疾病(末端节点)	* *	2
村庄毁坏(末端节点)	* * *	4
海岸侵蚀	1	1
海水倒灌	2	2
翻船	1	2
渔业受损(末端节点)	*	2
景点关闭	1	1
乘客滞留	1	1
航班取消	1	1
广告牌脱落	1	1
设施破坏	2	1
信号灯故障	1	1
交通堵塞(末端节点)	* *	4

(注：①表中危机事件出入度由系统网络拓扑结构确定。有一个箭头指向该事件，入度累加 1，有一个箭头从该事件引出，出度累加 1；②该网络中，短时间内难以辨识后果影响范围的危机事件被确定为“末端节点”；③网络中“末端节点”出度是根据危机事件可能后果的严重性确定，用 \* 表示，\* 的数量越多，表明该事件与其他末端事件相比，后果越严重。)

根据表 1 可以看出，台风灾害系统中，风暴潮、暴雨、狂风、洪水、泥石流和山体滑坡等危机事件出度较大，影响范围较广泛，后果也较严重；交通事故、淹没农田、村庄毁坏和交通堵塞等危机事件的入度相对较大，事件发生途径多，较难控制该危机事件的发生。

另外，末端危机事件的后果在短期内难以辨识，在网络模型中定义为“末端节点”，其出度不能根据网络拓扑结构确定。本文根据可能出现的后果的严重性确定风险的相对大小。由此确定：管道破坏和村庄毁坏两个事件的风险较高，流徙、渔业受损和减产绝收等事件的风险相对较低。

### 2.2 基于节点子网数的风险分析与断链控制

灾害演化网络中，由危机事件及其诱发子危机事件个数累加和越大，即子网节点数越大，则其可能造成的后果就越严重。同时，笔者依据演化链中灾害传播的顺序，将危机事件划分为三级。台风直接引发的危机事件为一级危机事件，处于灾害链终端位置的危机事件为三级危机事件，其余的均为二级危机事件。

表 2 中给出了“莫拉克”台风灾害系统中危机事件子网数和危险等级的关系。其中“莫拉克台风”事件节点子网数为模型中所有事件总和。而对于其他事件的子网，通过进一步分析，得到以下特点。

表2 危机事件级别和子网节点数分析

危机事件	危机事件级别	子网节点数
暴雨	一级	19
风暴潮	一级	20
狂风	一级	10
洪水	二级	16
淹没农田	二级	2
减产绝收	三级	1
山洪暴发	二级	8
泥石流	二级	6
山体滑坡	二级	6
管道破坏	三级	1
江河泛滥	二级	8
积水	二级	10
建筑倒塌	二级	2
交通事故	三级	1
海堤溃决	二级	7
土地盐碱化	二级	2
流徙	三级	1
疾病	三级	1
村庄毁坏	三级	1
海岸侵蚀	二级	5
海水倒灌	二级	4
翻船	二级	2
渔业受损	三级	1
景点关闭	二级	3
乘客滞留	二级	2
航班取消	二级	2
广告牌脱落	二级	2
设施破坏	二级	4
信号灯故障	二级	2
交通堵塞	三级	1

(说明: ①根据灾害的传播顺序划分危机事件等级。台风直接引发的危机事件为一级, 处于灾害链的终端位置的事件为三级, 其他事件均为二级; ②在统计子网节点数时, 所研究的事件本身也作为节点子网的一部分。)

#### (1) 事件等级与节点子网数呈正相关关系

总的来说, 危机事件级别越高, 其子网数越大。一级危险事件节点子网数最大; 三级危机事件节点子网数最小(均为1); 二级危机事件节点子网数介于二者之间。特别注意的是, 单从表中来看, 洪水事件危险高于狂风事件, 而二者具体的风险性高低的确定较为复杂, 本文不做深入研究。

#### (2) 三级危机事件的子网节点为自身

“莫拉克”台风灾害系统中, 减产绝收、管道破坏、交通事故、流徙、疾病、村庄毁坏、渔业受损、交通堵塞等所有三级危机事件的子网只有危机事件本身, 其节点子网数均为1, 风险相对较低于其它级别的事件。

### 2.3 基于支链数的风险分析与断链控制

包含危机事件的支链数在一定程度上也反应了危机事件的严重性。“莫拉克”台风系统中危机事件的支链始于一级危机事件, 终于三级危机事件, 将经过某危机事件的各条支链进行累加, 则

可得到包含该危机事件的支链数, 如表3所示。

表3 台风灾害演化系统中危机事件所含支链数分析

危机事件	所含支链数	危机事件	所含支链数
暴雨	23	土地盐碱化	5
风暴潮	10	流徙	1
狂风	5	疾病	1
洪水	17	村庄毁坏	6
淹没农田	4	海岸侵蚀	2
减产绝收	9	海水倒灌	10
山洪暴发	8	翻船	2
泥石流	4	渔业受损	7
山体滑坡	4	景点关闭	1
管道破坏	2	乘客滞留	1
江河泛滥	9	航班取消	1
积水	10	广告牌脱落	1
建筑倒塌	2	设施破坏	2
交通事故	6	信号灯故障	1
海堤溃决	12	交通堵塞	4

(说明: ①台风系统中支链始于一级事件, 终于三级事件; ②统计经过危机事件的每条支链并将其叠加, 得到危机事件包含的支链数; ③末端危机事件的风险按照表1中的方法确定。)

可以看出, “莫拉克”台风系统中, 包含暴雨、洪水、海堤溃决、风暴潮和海水倒灌等危机事件的支链数较大, 出现频率较高, 后果较严重, 属于相对较危险的危机事件。包含景点关闭、乘客滞留、航班取消、广告牌脱落、信号灯故障和翻船等危机事件的支链数较小, 风险相对较小。系统中末端危机事件的风险仍按3.1节中的方法确定。

### 2.4 台风灾害系统综合风险分析和断链研究

综合分析, 确定台风灾害系统在不同时期的关键环节; 台风前期, 关键危机事件为暴雨和洪水等; 台风后期, 交通事故和交通堵塞成为关键环节。另外, “莫拉克”台风中, 台湾高雄县小林村被泥石流淹没, 几乎全村人被埋致死, 当地政府因此垮台, 带来严重的经济损失和深远的社会影响。故村庄毁坏也成为系统中的关键位置。“莫拉克”台风灾害系统关键环节如图2所示。

根据以上关键环节的确定, 提出断链方案。台风前期, 及时疏导城市的排水系统。台风后期, 重点关注城市交通系统, 提高交通监管和调度力度。在农村, 台风前期做好天气预报和地质勘测等工作, 台风后期, 启动人员安置和灾后重建预案(图2)。

## 3 结束语

(1) 构建了以危机事件为节点, 以事件诱发关系为连接边的台风灾害演化网络模型, 并对危机事件进行风险分析, 确定了系统的关键环节, 提出了断链方案和控制建议。

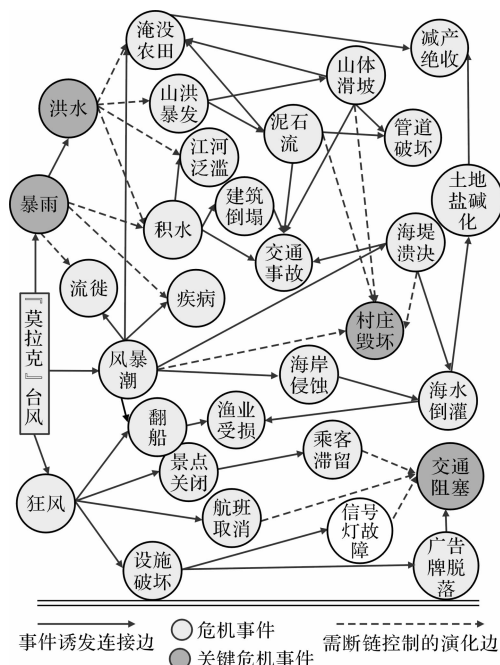


图2 台风灾害演化系统断链拓扑图

(2) 提出了一种灾害风险分析与控制思路, 并将其应用到台风系统中。结果表明: 暴雨、村庄毁坏、山体滑坡、泥石流、狂风、交通事故与堵塞等事件是台风系统的关键环节。

(3) 在灾害系统中, 对末端事件的风险因素辨识和网络连接边发生概率的研究将是进一步工作的重点。

## 参考文献:

[1] 曹楚, 彭加毅, 余锦华. 全球气候变暖背景下登陆我国台风

特征的分析[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 455-461.

[2] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 64-73.

[3] 王小松, 赵林, 葛耀君, 等. 台风对大跨度钢桁拱桥抗风性能的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 13-25.

[4] 刘超, 杨卫, 王权, 等. 基于模糊数学的渔业台风灾害风险区划研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(5): 208-212.

[5] 荣莉莉, 张继永. 突发事件连锁反应的实证研究[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 1-6.

[6] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 台风随机模拟与极值风速预测应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(7): 885-889.

[7] 仇天宇, 于福江, 董剑希, 等. 海平面上升对河北黄骅台风风暴潮漫滩影响的数值研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(5): 499-503.

[8] 叶瑜, 方修琦, 张向萍. 1883年长江三角洲地区台风灾害事件重建[J]. 地理学报, 2010, 12(6): 665-674.

[9] 刘少军, 张京红, 何政伟, 等. 基于GIS的台风灾害损失评估模型研究[J]. 灾害学, 2010, 25(2): 64-69.

[10] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.

[11] 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.

[12] Ouyang M, Yu M H, Huang X Z, et al. Emergency response to disaster-struck scale-free network with redundant systems[J]. Physica Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(18): 4683-4691.

[13] 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): 18-22.

[14] Chen Changkun, Li Zhi, Sun Yunfeng. A new model for describing evolution and control of disaster system including instantaneous and continuous actions[J]. International Journal of Modern Physics C, 2010, 21(3): 307-332.

[15] 刘文方, 肖盛燮, 隋严春, 等. 自然灾害链及其断链减灾模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(1): 2625-2681.

# Risk Analysis and Control for the Evolution Disaster System of Typhoon Based on Complex Network

Chen Changkun<sup>1,2</sup> and Ji Daoxi<sup>1</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China;

2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Based on the complex networks theory, an idea or method of risk analysis and controlling on natural disasters evolution system is proposed. Taking the Morakot as an example, the network model including 30 crisis nodes and 39 evolution connections is established. The out-in degrees, number of nodes in its subnets and number of branched chains that every node involved in the network are discussed for risk analysis, and then the key nodes and the solutions on disconnecting chains are presented. The results show that fierce wind, rainstorm, flood, landslide, mudslide, traffic jam and village-destroying are the crucial nodes in the network. Afterwards the suggestions for disaster controlling are offered, consisting of improving the operation ability of the urban drainage system, reinforcing the supervision and scheduling for traffic system and starting the rural emergency plans of post-disaster placement and reconstruction.

**Key words:** typhoon disaster; disasters evolution; risk analysis; measures for chain breakage; network model