

陈丽满, 陈长坤, 赵冬月, 等. 基于灾害演化网络的沿海核电站风险分析[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 202–205. [CHEN Liman, CHEN Changkun, ZHAO Dongyue, et al. Risk Analysis on Coastal Nuclear Power Plant Based on Disaster Evolution Network [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 202–205. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.035.]

## 基于灾害演化网络的沿海核电站风险分析<sup>\*</sup>

陈丽满<sup>1</sup>, 陈长坤<sup>2</sup>, 赵冬月<sup>2</sup>, 阳富强<sup>1</sup>, 姬露露<sup>2</sup>

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 基于灾害演化网络分析理论, 从沿海核电站爆炸危机事件演化系统中的关键危机事件和关键危机事件演化链的角度出发, 对沿海核电站爆炸危机事件的演化特征及其风险控制进行研究分析。结果表明: 核泄漏是沿海核电站爆炸灾害系统中的关键危机事件。沿海核电站爆炸灾害系统存在直链式、发散式、集中式和循环式四种灾害演化方式, 其中循环式灾害演化造成的事故后果更为严重, 是灾害演化系统中的关键结构。

**关键词:** 爆炸灾害; 危机事件; 灾害演化网络; 出入度; 衍生灾害; 沿海地区

**中图分类号:** X42; X9; X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)02-0202-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.035

目前, 中国核电能源发展迅速, 分布在沿海地区的核电机组占有一定的比例<sup>[1]</sup>, 而核电站爆炸事故的每一次发生, 都将会给国家和人民带来了不可估计的财产损失和严重的人身伤害。1993年4月6日, 西伯利亚托木斯克的核电厂发生了爆炸, 对环境造成了放射性污染, 给人们的生活带来极大影响<sup>[2]</sup>。2011年3月11日, 福岛核电站发生了爆炸, 带来大面积的核泄漏和停电事故, 世界最大的核电站从此废弃, 16万居民被迫搬离家园<sup>[2]</sup>。因此, 对核电站爆炸灾害演化过程进行研究并提出一系列可行性措施具有重大的意义。

目前国内外学者主要集中在核电站爆炸灾害成因、后果、预测以及事后预防管理等方面的研究。例如, 刘德稳等人<sup>[3]</sup>考虑了核电站爆炸的成因, 对核电站工程的防灾减灾进行了深入研究; 于海方等人<sup>[4-5]</sup>主要从核电站爆炸后带来的核污染及其危害等方面进行研究; 王瑾等人<sup>[6]</sup>则分析了核电站爆炸给人类生存发展所带来的警示。Steven Featherstone等人<sup>[7]</sup>考虑了核辐射的危害, 从核电站爆炸给人类带来的危害进行分析; Ouyang M等人<sup>[8]</sup>从核电站爆炸发生后政府的应急响应程度, 对重大灾害的事后预防管理方面进行了分析。

上述学者主要研究了核电站爆炸灾害的成因以及其带来的后果等, 对核电站爆炸灾害研究的发展做出了很大的贡献。在此基础上, 本文从核电站爆炸灾害危机事件演化本身进行研究, 对核电站爆炸灾害危机事件演化特征及其风险控制展开分析, 以期获得预防核电站爆炸灾害的最佳

方法。

### 1 沿海核电站爆炸灾害演化网络分析

核电站爆炸灾害事故将会让社会承受巨大的损失, 本文对沿海核电站爆炸灾害演化进行分析, 了解了沿海核电站爆炸灾害的演化特点, 提出合理的控制措施。沿海核电站爆炸带来的一系列次生、衍生灾害共同构成了核电站爆炸灾害演化系统<sup>[9]</sup>, 针对该演化系统, 通过对爆炸过程中的次生、衍生危机事件进行分析, 构建了灾害演化网络模型(图1)。该系统由30个节点和55条边组成, 其中, 节点表示各危机事件, 而边则表示各事件之间的诱发关系。

根据沿海核电站爆炸的灾害演化过程对所有的危机事件进行分级, 可分为六级<sup>[10]</sup>, 第一层级是由源灾害沿海核电站爆炸直接导致的危机事件, 如核泄漏、停电和火灾等4个事件; 第二层级是核恐慌、核辐射和通讯中断等8个衍生危机事件; 第三个层级由核电站爆炸衍生危机引起, 有社会动乱、人员患病和农业停产等9个危机事件; 第四层级有生活物资抢购、生活物资缺乏和救援受阻等4个危机事件; 第五层级有生活物资物价上涨和生活条件恶劣2个危机事件; 第六个层级包括人员伤亡和财产损失这2个危机事件。上述六级危机事件已分析了主要次生、衍生灾害演化过程, 足够反应沿海核电站爆炸实际灾害演化过程。表1中的危机事件构成了沿海核电站爆炸灾害危机演化模式。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-09-19 修回日期: 2017-01-19

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0802501); 国家自然科学基金重点项目(51534008); 中央高校基本科研业务费专项资金。

第一作者简介: 陈丽满(1992-), 女, 福建泉州人, 在读硕士研究生, 主要从事城市公共安全研究. E-mail: 757812366@qq.com

通讯作者: 陈长坤(1977-), 男, 福建福安人, 博士, 教授, 主要从事公共安全应急管理研究. E-mail: cckchen@csu.edu.cn

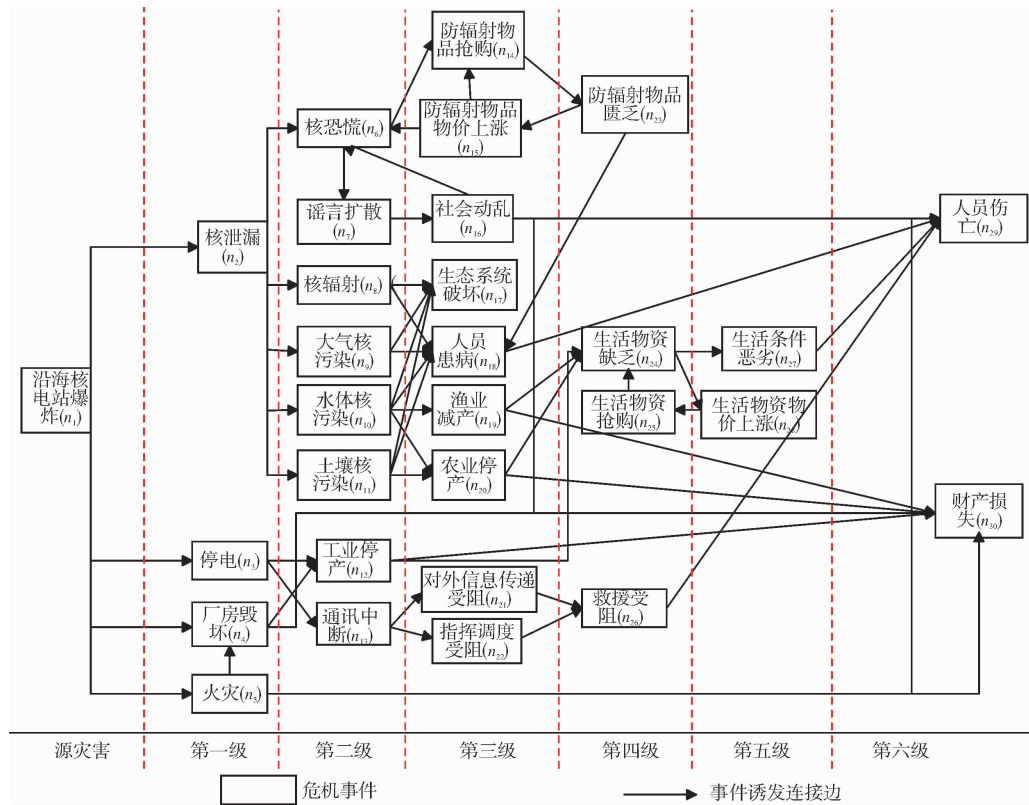


图1 沿海核电站爆炸灾害演化网络拓扑结构

表1 沿海核电站爆炸各危机事件

节点编号	危机事件	节点编号	危机事件	节点编号	危机事件
$n_1$	核电站爆炸	$n_{11}$	土壤核污染	$n_{21}$	对外信息传递受阻
$n_2$	核泄漏	$n_{12}$	工业停产	$n_{22}$	指挥调度受阻
$n_3$	停电	$n_{13}$	通讯中断	$n_{23}$	防辐射物品匮乏
$n_4$	厂房毁坏	$n_{14}$	防辐射物品抢购	$n_{24}$	生活物资缺乏
$n_5$	火灾	$n_{15}$	防辐射物品价格上涨	$n_{25}$	生活物资抢购
$n_6$	核恐慌	$n_{16}$	社会动乱	$n_{26}$	救援受阻
$n_7$	谣言扩散	$n_{17}$	生态系统破坏	$n_{27}$	生活条件恶劣
$n_8$	核辐射	$n_{18}$	人员患病	$n_{28}$	生活物资价格上涨
$n_9$	大气核污染	$n_{19}$	渔业减产	$n_{29}$	人员伤亡
$n_{10}$	水体核污染	$n_{20}$	农业停产	$n_{30}$	财产损失

沿海核电站爆炸灾害演化系统由核电站爆炸自身携带的核泄露、停电、厂房毁坏、火灾及其引发的次生灾害共同构成。而人员伤亡和财产损失这两个危机事件位于整个演化网络的终端位置,被称为末端危机事件,并且可能造成这两个事件的因素较多,说明这两个事件极有可能发生,是预防和控制过程的重点事件。

## 2 沿海核电站爆炸关键危机事件和关键演化链分析

### 2.1 核电站爆炸关键危机事件分析

在沿海核电站爆炸灾害的演化网络模型中,入度指的是可以诱发子危机事件发生的父危机事件的数量,它反应了发生该危机事件的可能性,数量越多表示入度越大,越容易发生该事件;而出度指的是该事件可以引发的子危机事件的数量,

其在一定程度上反应了事件灾害的严重度,数量越多表明出度越大,该事件的影响就越大<sup>[11]</sup>。根据沿海核电站爆炸灾害的网络结构,结合复杂网络理论,确定事件出入度,与分级危机相结合,分析不同危机和危机程度之间的关系,如表2所示。

根据表2,可以看出,对于一级危机,只有源灾害沿海核电站爆炸会导致其他子危机事件的发生;对于二、三、四、五级危机,导致危机事件的演变方式逐渐变得复杂,尤其是核泄漏的出度达到5,说明这个危机事件有极强的灾害杀伤力,是灾害网络的关键节点;而生态系统破坏和人员患病这两个危机事件的入度也达到4,是灾害网络的重要危机事件;对于六级危机事件,整个系统中入度的最大值为人员伤亡和财产损失,表明这两个危机事件发生的可能性极大,这之前在此构造的主要网络演化结构涉及以上六级危机事件<sup>[12]</sup>。

分析整个核电站爆炸灾害系统,人员伤亡、财产损失和生态系统破坏等危机有较大的入度,说明了导致这些危机的原因比较多,发生的可能性也较大。而核泄漏和水体核污染的出度较大,表明此类事件的后果影响范围广,造成的损失较为严重。核泄露为整个演化网络的关键事件,除了必须销毁其诱导条件,还要着眼于核泄露的后果。

### 2.2 核电站爆炸灾害关键演化链分析

核电站爆炸灾害演化是指核电站爆炸危机事件演化成其他危机事件的过程。笔者结合沿海核电站爆炸网络拓扑结构,具体分析了该衍生灾害的演化过程,其灾害演化方式主要分为直链式、

表 2 沿海核电站爆炸危机事件出入度和事件级别统计表

危机事件	事件级别和出入度	危机事件	事件级别和出入度	危机事件	事件级别和出入度
核电站爆炸	源灾害 4/0	土壤核污染	二级 3/1	对外信息传递受阻	三级 1/1
核泄漏	一级 5/1	工业停产	二级 2/2	指挥调度受阻	三级 1/1
停电	一级 2/1	通讯中断	二级 2/1	防辐射物品匮乏	四级 2/1
厂房毁坏	一级 2/2	防辐射物品抢购	三级 1/2	生活物资缺乏	四级 2/3
火灾	一级 3/1	防辐射物品物价上涨	三级 2/1	生活物资抢购	四级 1/1
核恐慌	二级 2/3	社会动乱	三级 2/1	救援受阻	四级 1/2
谣言扩散	二级 1/1	生态系统破坏	三级 0/4	生活条件恶劣	五级 1/1
核辐射	二级 2/1	人员患病	三级 1/4	生活物资物价上涨	五级 1/1
大气核污染	二级 2/1	渔业减产	三级 2/1	人员伤亡	六级 0/5
水体核污染	二级 4/1	农业停产	三级 2/2	财产损失	六级 0/5

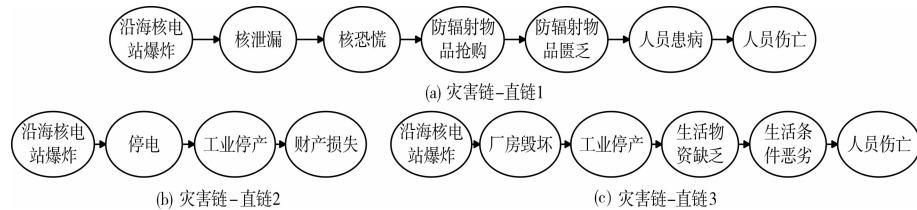


图 2 直链式灾害演化

发散式、集中式和循环式这四种类型<sup>[13]</sup>。下文将对沿海核电站的灾害链结构进行具体分析,以确定不同的灾害链的发展,从而提高核电站爆炸灾害风险防范和控制能力。

#### (1) 直链式灾害演化方式

直链式灾害演化是指核电站爆炸危机在演化过程中没有出现环形拓扑结构的演化方式,图2就是沿海核电站爆炸中的三个直链式灾害演化。以上3条直链式演化过程呈线性发展,其最终都会导致人员伤亡或者财产损失,而且时间越长,就会导致越严重的后果,为了有效减少损失,可以破坏各事件之间连接边成立的条件。

#### (2) 发散式灾害演化方式

发散式灾害演化方式指的是灾难事件发散成各种灾害并形成一系列次生灾害的爆裂过程。图3a就是沿海核电站爆炸中的两个发散式灾害演化过程。

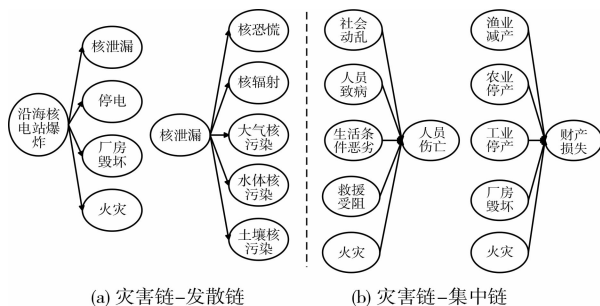


图 3 发散式与集中式灾害演化

由沿海核电站爆炸和核泄漏这两个危机事件和各个衍生灾害构成的灾害演化结构就是发散式灾害演化方式的生动例子。如果沿海核电站爆炸和核泄漏这两个父灾害事件不发生,那么其对应的各个子灾害事件就都不会发生,但是这两个事件一旦发生,其对应的各个子危机事件都有可能发生,不易控制,其带来的危害也比其他灾害演化过程更为严重。

#### (3) 集中式灾害演化方式

集中式灾害演化方式是指几个灾害在演化过程中演变成另一个新的灾难,并且造成很严重的后果。图3b就是沿海核电站爆炸中的两个集中式灾害演化过程。

图3b中,导致人员伤亡和财产损失的各个危机事件构成了集中式灾害演化结构,而造成人员伤亡和财产损失的危机事件数量较多,难以控制。只要构成集中式灾害演化结构的任何一个危机事件发生,人员伤亡或者财产损失就会发生,这时只能通过采取各种措施来降低此类灾害演化过程带来的危害。

#### (4) 循环式灾害演化方式

循环式灾害演化方式是指沿海核电站爆炸危机事件在灾害演化过程中自己反馈原因结果的结构。图4中的灾害演化就是循环式灾害演化过程。

在沿海核电站爆炸灾害演化系统中,含有以上三个循环链,在这种演化方式中,原因就是结果,结果就是原因,原因和结果不断的循环,带来高度危害。例如核恐慌会导致防辐射物品抢购,抢购导致缺乏,缺乏导致物价上涨,上涨又带来核恐慌,因果循环,对社会造成严重的危害。这种灾害演化方式是灾害网络系统的关键结构,对这些结构进行辨识,找出其带来的影响,对灾害系统控制损失的效果是显著的。

沿海核电站爆炸灾害事件的各种灾害演化结构并不是单独存在,他们之间是相互联系的,只有清楚的了解各灾害演化方式的特征以及他们之间的相互联系,才能对沿海核电站爆炸灾害事件进行更好的控制<sup>[14]</sup>。沿海核电站爆炸灾害演化结构中,笔者认为相对比较容易控制的是直链式灾害演化中导致的衍生灾害,只需控制住父灾害事件,破坏其连接条件即可;而对于发散式、集中式和循环式灾害演化方式涉及复杂衍生灾害,其发生条件和事件结构往往比较难以控制,为了减少事件的损失,可以从控制事件的发生条件,破坏事件的结构出发来考虑。

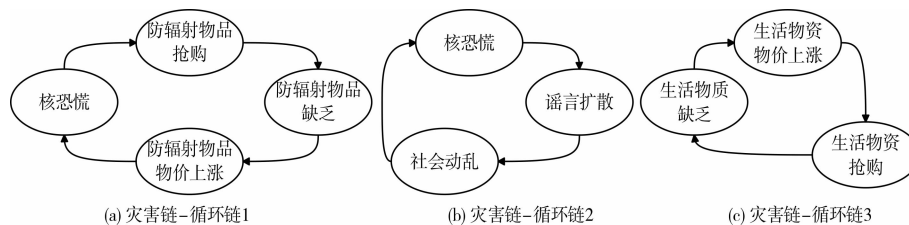


图4 循环式灾害演化

### 3 结论

在本文中,通过对沿海核电站爆炸造成的灾害网络进行分析,得出以下结论。

(1) 通过对沿海核电站爆炸灾害演化系统的灾害演化分析,确定核泄露是整个系统演变过程中的关键节点;而核恐慌、核辐射危机确定为重要节点。因此,在沿海核电站爆炸灾害预防和控制中,可以重点考虑阻断诱发核泄露、核恐慌和核辐射等危机事件发生的条件。

(2) 根据沿海核电站爆炸的网络拓扑结构,对危机事件进行分级,分析节点出入度和灾害演化过程,提出核泄漏引起的衍生灾害是预防重点,以避免人员伤亡和财产损失。在核泄漏已成不可避免的事实的时候,进行有效的防治措施则是最主要的工作。

(3) 对沿海核电站爆炸的灾害演化链进行定性分析研究,灾害演化系统中主要有四种灾害演化链,即直链式、发散式、集中式和循环式,其中,循环式灾害演化链中的危机事件互为因果,可自行激化,是沿海核电站爆炸灾害系统的关键演化链。

### 参考文献:

- [1] 叶奇蓁. 中国核电发展战略研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 03-08.
- [2] 张成磊, 骆宏波. 两次核电站事故对我国发展核电的启示[J]. 科技信息, 2013(2): 108-109.
- [3] 刘德稳, 谭平, 周福霖, 等. 核电站工程防灾减灾研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 149-153.
- [4] 杨新兴, 李世莲, 尉鹏, 等. 环境中的放射性污染及其危害[J]. 前沿科学, 2015, 33(9): 4-15.
- [5] 于海方. 跨国核污染的责任认定-以日本福岛核电站为视角[J]. 楚天法治, 2015(6): 230-230.
- [6] 王瑾. 日本核电站爆炸的警示[J]. 国企, 2011(4): 116-117.
- [7] 史蒂文·费瑟斯通, 王孝娃, 刘长安. 福岛: 核辐射实验场[J]. 环球科学, 2015(3): 72-79.
- [8] Ouyang M, Yu M H, Huang X Z, et al. Emergency response to disaster-struck scale-free network with redundant systems[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(18): 4683-4691.
- [9] 林达龙, 明亮, 何胜方, 等. 基于复杂网络的高校火灾衍生灾害群特征[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(2): 205-213.
- [10] 陈长坤, 纪道溪. 基于复杂网络的台风灾害演化系统风险分析与控制研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 1-4.
- [11] 傅子洋, 徐荣贞, 刘文强. 基于贝叶斯网络的恐怖袭击预警模型研究[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 184-189.
- [12] 朱伟, 陈长坤, 纪道溪, 等. 我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 88-91.
- [13] 陈长坤, 赵冬月, 杨建, 等. 基于灾害演化网络的灾害裂痕分析方法研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 6-9.
- [14] 哈斯, 张继权, 佟斯琴, 等. 灾害链研究进展与展望[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 131-138.

## Risk Analysis on Coastal Nuclear Power Plant Based on Disaster Evolution Network

CHEN Liman<sup>1</sup>, CHEN Changkun<sup>2</sup>, ZHAO Dongyue<sup>2</sup>, YANG Fuqiang<sup>1</sup> and JI Lulu<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Resources of Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Disaster Prevention Science and Technology Research Institute of Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** From the perspective of critical crisis incidents and crisis evolution chain, evolution characteristics and risk control of explosive crisis in coastal nuclear power plant have been analyzed based on the disaster evolution network analysis theory. The results show that the nuclear leakage is a critical crisis in coastal nuclear explosion disaster system. And four evolution modes exist in this system, including straight chain, divergent chain, concentration chain and recycle chain, of which the recycle chain is the most severe, and is the key structure in disaster evolution system.

**Key words:** explosion disasters; crisis events; disaster evolution network; out-in degree; derivative disasters; coastal areas