

# 灾害事件评估中的链式效应解析模型研究

李藐

(第二炮兵装备研究院 北京 100085)

**摘要:** 灾害事件种类繁多,作用机理复杂多样,尤其是2011年日本福岛核事故更加体现了灾害事件链式效应对灾害破坏作用的重要影响。本文在已有研究的基础上,针对各类灾害事件的共性特征,建立了描述灾害事件作用过程的数学模型通式。以此模型通式分析了各类事件的结构特点,对简单事件与4类复杂事件进行了数学描述,并提出了基础事件的概念。在此基础上,本文建立了描述事件间次生衍生关系的解析模型,提出了次生衍生关系矩阵、最终次生衍生关系矩阵等概念。此模型可用于灾害事件评估分析以及事件态势的预测推演,可为应急决策提供参考。

**关键词:** 灾害事件;次生事件;衍生事件;灾害事件链

## 0 引言

近年来,随着人类活动对自然破坏的加剧、人类社会内部自身矛盾的恶化,世界上各类灾害事件频繁发生,造成重大影响与损失的灾害事件更是层出不穷。通过对一些灾害事件进行案例分析,人们发现在许多情况下灾害事件并不是孤立发生的,而是多个灾害事件同时或相继发生的,这种事件尤其会造成重大的影响与损失。因此,虽然灾害事件本身受到自然的、社会的、偶然的等多种因素相互作用,其演变过程、影响范围、破坏程度等具有高度的不确定性,但是灾害事件本身的发展演化存在着一定的内在规律可寻,不同类型的灾害事件之间也存在着某种“必然”的联系<sup>[1]</sup>。2011年日本福岛核事故就是由地震导致的衍生灾害事件。地震造成了震区内建筑物倒塌、道路损毁、城区火灾、交通中断、基础设施破坏等一系列的事件。但由于震中离陆地尚有数百公里的距离,因此虽然地级很高,但地震直接造成的破坏并不特别严重。但是,由于地震发生于海中,引发了大规模的海啸。虽然本次地震与海啸事件造成巨大的破坏,但本次最大的确是随后引发的福岛核电站泄漏事故。地震发生导致核电站外部电源被破坏,随之而来的远超防护标准的海浪又使得核电站所有的备用电源毁坏,使得核电站反应堆冷却系统失灵,最终导致了放射性物质的外泄。核泄漏事故导致了严重的空气、水域、土壤污染,其对生态环境的作用是一个长期的过程,全世界都会受到泄漏事件的影响。本次事件中,地震引发了海啸,对沿岸地区造成了严重破坏,并导致了世界范围造成严重影响的核电站事故

灾害事件是某一孕灾环境中致灾因子与承灾体相互作用的过程,灾害事件发生后可能会引发多级的次生、衍生事件,这就是事件链效应<sup>[2]</sup>。目前已有很多学者针对具体的事件链效应进行了卓有成效的研究,Dirk Helbing等通过对地震、电力失效、飓风、洪水这几个典型灾害事件引发的事件链及其造成的影响进行了总结与分析,给出了事件传播的一般链式图<sup>[3]</sup>;陈长坤等研究了冰雪灾害危机事件的演化机理,并在此基础上对冰雪灾害危机事件演化构成和衍生链特征进行了分析<sup>[4]</sup>;王春振等总结了地震次生山地灾害链的成灾规律,并从自然和人为因素等方面简要分析了汶川地震次生山地灾害链网的发育成因<sup>[5]</sup>。在事件链效应机理的研究方面,肖盛燮等运用系统理论观点,从数学层面上分析了自然灾害系统的链式关系结构,建立了自然灾害链式效应数学关系模型<sup>[6]</sup>;Lubos Buzna等考虑了一些灾害事件蔓延的共性特征,构建了一个普适性的灾害蔓延模型<sup>[7]</sup>;May Fred等提出以灾害连锁树的形式描述灾害的连锁反应行为<sup>[8]</sup>;Cozzani等根据初始事故的影响,运用数学模型和概率分析手段对主要事故场景进行分析,并运用设备损坏概率模型和人体脆弱性模型对多米诺效应后果风险进行量化评估<sup>[9]</sup>;季学伟等提出了针对灾害事件链场景发生概率和后果的定量风险分析方法<sup>[10]</sup>;湛孔星等从典型事故致因理论入手,运用突发理论建立了描述事故致因要素之间综合作用的数学模型<sup>[11]</sup>;裘江南等针对事件对象要素属性关系特点,提出了事件链的知识导航模型<sup>[12]</sup>。本文以文献2中提出的灾害事件链理论为基础,进一步分析了灾害事件的机理,给出了灾害事件的模型通式,提出了一种灾害事件链效应的解析模型,用于对各类灾害事件组成的灾害事件链结构进行分析,进一步可用于灾害事件的评估分析。

## 1 灾害事件模型通式

根据致灾因子与承灾体之间的关系, 灾害事件可分为简单事件与复杂事件, 复杂事件又可根据致灾因子与承灾体的关系分为 4 类<sup>[2]</sup>。可将灾害事件作如下定义:

灾害事件={致灾因子集, 承灾体集, 关系集}

对于灾害事件  $S$ , 其致灾因子集合  $H = \{h_1, h_2, \dots\}$ , 式中  $h_i$  表示第  $i$  个致灾因子; 承灾体集合  $B = \{b_1, b_2, \dots\}$ , 式中  $b_j$  表示第  $j$  个承灾体; 致灾因子与承灾体的关系集  $R = \{\dots, r_{ij}^k, \dots\}$ , 式中  $r_{ij}^k$  表示致灾因子  $h_i$  与承灾体  $b_j$  之间的第  $k$  种作用关系, 记  $R = H \times B$ 。简单事件与复杂事件的情况如表 1 所示。因此, 灾害事件可抽象表示为:

$$S^l = \{H, B, R\}, \quad l = 0, 1, 2, 3, 4$$

表 1 灾害事件模型

灾害事件 $S^l$	致灾因子 $H$	承灾体 $B$	关系 $R$	
简单事件 $S^0$	$\{h_1\}$	$\{b_1\}$	$\{r_{11}\}$	
一类 $S^1$	$\{h_1\}$	$\{b_1, b_2, \dots\}$	$\{r_{11}, r_{12}, \dots\}$	
复杂事件	二类 $S^2$	$\{h_1, h_2, \dots\}$	$\{b_1\}$	$\{r_{11}, r_{21}, \dots\}$
	三类 $S^3$	$\{h_1\}$	$\{b_1\}$	$\{r_{11}^1, r_{11}^2, \dots\}$
四类 $S^4$	$\{h_1, h_2, \dots\}$	$\{b_1, b_2, \dots\}$	$\{\dots, r_{ij}^k, \dots\}$	

对灾害事件  $S$  的致灾因子集与承灾体集进行划分:

$$\pi(H) = \{H_1, \dots, H_n\}, \quad \pi(B) = \{B_1, \dots, B_n\}$$

若:

$$R_{ij} = (H_i \times B_j) \cap R \neq \emptyset, \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

则实现对灾害事件  $S$  的划分:

$$\pi(S) = \{\dots, S_{ij}^l, \dots\}, \quad S_{ij}^l = \{H_i, B_j, R_{ij}\}$$

$$\text{且: } \bigcup_{i,j=1}^n S_{ij}^l = S$$

称  $S_{ij}^l$  为灾害事件  $S$  的子事件, 即任意灾害事件可以看作由若干同时发生的子事件组合而成的“事件群”。同样的, 可以对子事件继续进行划分, 直到所有子事件不能再划分为止, 这时所有子事件都为简单事件  $S^0$ 。

若某一事件  $S$  的所有子事件  $\{S_1, \dots, S_n\}$ , 同时发生或同时不发生, 即对于任意两个子事件  $S_i$  与  $S_j$ , 其发生概率  $P(S_i)$  与  $P(S_j)$  满足:

$$r(P(S_i), P(S_j)) = 1, (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

则称事件  $S$  为基础事件。因此，灾害事件可分解为若干同时发生的基础事件。

## 2 灾害事件链解析模型

某一灾害事件发生后，可能产生新的致灾因子并作用于承灾体，从而导致新的次生、衍生事件的发生，形成事件链<sup>[2]</sup>。前人对灾害事件链的研究中，大多是针对某一类事件引发另一类事件的现象，即针对致灾因子不同的事件间关系的研究；而本模型所研究的灾害事件为上节所定义的灾害事件，即针对由致灾因子、承灾体所确定的灾害事件间关系的研究。

### 2.1 模型假设

1) 在我们所关注的区域内存在若干承灾体，这些承灾体在致灾因子的作用下会发生不同的灾害事件。某些灾害事件会引发其它的灾害事件，进而引发多级的次生、衍生事件。

2) 由于任意灾害事件皆可分为基础事件，所以本模型所中的灾害事件皆为基础事件。

3) 由于模型中事件为基础事件，因此事件间的次生衍生关系不存在交联作用，即不存在两个或更多的事件共同的、不可分离的引发另一灾害事件的现象。

由以上假定，可用事件间的次生衍生关系图的形式表示灾害事件链式效应，即节点表示灾害事件，有向边表示事件的次生衍生关系(图 1)。

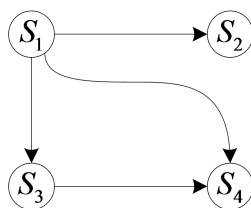


图 1 事件次生衍生关系图

### 2.2 模型建立

一般情况下，区域内有  $n$  个可能发生的事件  $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。对于任意两个事件  $S_i$  与  $S_j$  间的关系  $a_{ij}$ ，设：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{当 } S_i \text{ 直接诱发 } S_j \text{ 时} \\ 0 & , \text{当 } S_i \text{ 不会直接诱发 } S_j \text{ 时} \end{cases}$$

由此，可建立区域内各灾害事件间的次生衍生关系矩阵：

$$A = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & \cdots & S_n \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

次生衍生关系矩阵为布尔矩阵，矩阵元素按布尔运算法则（逻辑和、逻辑与、逻辑乘）运算。

图 1 中所示灾害事件链的次生衍生关系矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

记次生衍生关系矩阵  $A$  的乘法  $A \circ A$  为  $A^2 = (a'_{ij})_{n \times n}$ ，则：

$$a'_{ij} = \bigcup_{k=1}^n (a_{ik} \cap a_{kj})$$

上式中  $a'_{ij}$  表示事件间的二级次生衍生关系。同理可得  $n$  级次生衍生关系矩阵  $A^n = \underbrace{A \circ A \circ \dots \circ A}_n$ 。虽然我们可以继续计算  $A^{n+1}$ ,  $A^{n+2}$ , ... 但对于  $n$  个事件的链式效应来说，若灾害事件次生衍生关系图存在回路，当  $k$  增大时， $A^k$  形成一定的周期性重复；若灾害事件次生衍生关系图中无回路，则当  $k$  达到某个值时， $A^k = \mathbf{0}$ 。因此，只计算到  $A^n$  就可以了。

对  $A, A^1, A^2, \dots, A^n$  进行逻辑和运算，得：

$$M = A \cup A^2 \cup A^3 \cup \dots \cup A^n = (m_{ij})_{n \times n}$$

称  $M$  为最终次生衍生关系矩阵，且：

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{当 } S_i \text{ 最终会诱发 } S_j \text{ 时} \\ 0 & , \text{当 } S_i \text{ 最终不会诱发 } S_j \text{ 时} \end{cases}$$

$M$  中的元素  $m_{ij}$  表明事件  $S_i$  经过多级次生衍生之后能否诱发事件  $S_j$ 。

## 2.3 模型应用

### 1) 次生衍生事件预测推演

对区域内  $n$  个可能发生的事件  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ，建立事件状态矩阵  $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ ，其中：

$$s_i = \begin{cases} 1 & , \text{当事件 } S_i \text{ 已经发生} \\ 0 & , \text{当事件 } S_i \text{ 还未发生} \end{cases}$$

当区域内某些事件发生后，一系列次生、衍生事件会相继发生，因此事件状态矩阵  $S$  是随时间变化的。根据  $t$  时刻区域内灾害事件的状态，可确定事件状态矩阵  $S_t$ 。再由  $n$  个可能发生事件的次生衍生关系矩阵  $A$ ，可得各级可能发生的次生衍生事件：

$$S_t^m = S_t \circ A^m, \quad m = 1, 2, \dots, n$$

$S_t^m$  中各元素  $s_i^m (i = 1, 2, \dots, n)$  表示根据  $t$  时刻发生的事件预测出的  $m$  级次生衍生事件。由此，可根据任意时刻发生的事件预测未来事件的发生情况。

### 2) 区域内灾害事件分析

对区域内  $n$  个可能发生的事件  $S_1, S_2, \dots, S_n$  中的任意事件  $S_i$ ，根据最终次生衍生关系矩阵  $M$  定义最终次生衍生事件集  $D_M(S_i)$  与最终原生事件集  $O_M(S_i)$ ：

$$D_M(S_i) = \{S_j | m_{ij} = 1\}$$

$$O_M(S_i) = \{S_j | m_{ji} = 1\}$$

a)对任意两个事件  $S_i$  与  $S_j$ , 若  $S_j \in D_M(S_i) \cap O_M(S_i)$ , 则称这两个事件之间的关系为强关系, 即经过多级次衍生后互为原生事件与次生衍生事件。这些事件组成的子矩阵对应的元素全是 1, 即构成反馈回路。

b)对任意事件  $S_i$ , 若  $D_M(S_i) \cap O_M(S_i) = O_M(S_i)$ , 则称此事件为事件集中的底层事件。

c)对任意两个事件  $S_i$  与  $S_j$ , 若  $D_M(S_i) \cap O_M(S_i) = \emptyset$ , 则事件  $S_i$  与  $S_j$  属于不同灾害事件链; 反之, 若  $D_M(S_i) \cap O_M(S_i) \neq \emptyset$ , 则事件  $S_i$  与  $S_j$  属于同一灾害事件链。由此, 区域内  $n$  个可能发生的事件可分为若干互相独立的、没有直接或间接影响的事件集, 每个事件集中的事件组成一个灾害事件链。

d) 对任意灾害事件链中的任意事件  $S_i$ , 若  $D_M(S_i) \cap O_M(S_i) = D_M(S_i)$ , 则称此事件为灾害事件链中的顶层事件。得出顶层事件后, 把它们从灾害事件链的事件集中暂时去掉, 再用同样的方法可以得出次一级的事件。这样持续下去, 便可一级级的将灾害事件链中的各事件分析出来。对于灾害事件链的事件集  $L$ , 如果用  $L_1, L_2, \dots, L_l$  表示从高到低的各级事件组成的事件集, 则灾害事件链可表示为对事件集的划分:

$$\pi(L) = \{L_1, L_2, \dots, L_l\}$$

式中任意两个事件集  $L_i$  与  $L_j$  满足:  $L_i \cap_{i \neq j} L_j = \emptyset$ 。

从灾害事件的应急管理角度来说, 底层事件是各类事件的“源头”, 需着重预防这些事件的发生; 顶层事件是各类事件的“后果”, 需重点考虑对这些事件的应急处置。对于灾害事件链中构成反馈回路的事件需要特别重视, 因为反馈回路可能使得这些事件的强度更大。

### 3 实例分析

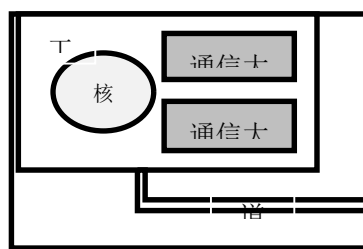


图2 虚拟场景图

对图 2 所示的核设施区域内, 共有五个承灾体: 核设施、通信大楼 1、通信大楼 2、工厂、道路。

表 2 虚拟场景区域事件

承灾载体	灾害事件	事件编号
核设施	爆炸	3
通信大楼 1	火灾	4
	通信受阻	5
通信大楼 2	火灾	4
	通信受阻	5

道路	雪灾	7
	道路阻塞	2
工厂	物资缺乏	1

针对于区域内承灾体可能发生的 7 个事件(表 2) $S_i(i=1, \dots, 7)$ ，次生衍生关系矩阵为：

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

经计算，得最终次生衍生关系矩阵：

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

根据最终次生衍生关系矩阵  $M$  对这 7 个事件进行划分，得出两个互相独立的灾害事件链(如图 3)：

$$L_1 = \{S_3, S_4, S_5, S_6\}$$

$$L_2 = \{S_1, S_2, S_7\}$$

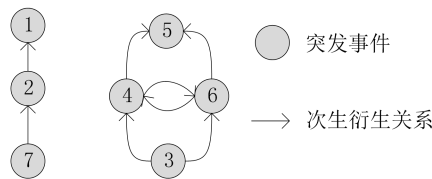


图 3 灾害事件链图

由分析可知，事件  $S_7$  与事件  $S_3$  为底层事件，只要这两个事件不发生，其它事件都不会发生；事件  $S_1$  与事件  $S_5$  为顶层事件，为一系列事件的最终结果，要为这两个事件准备相应的应急措施；事件  $S_4$  与事件  $S_6$  为了一个反馈回路，因此这两个事件发生后，可能会互相促进，破坏强度越来越强，需特别注意。

#### 4 结论与讨论

本文根据各类灾害事件发生发展的共性特征，建立了描述灾害事件的数学通式，并对简单事件与复杂

事件的机理给出了数学描述, 进而提出了基础事件的概念。

建立了描述灾害事件间次生衍生关系的解析模型, 并在解析模型的基础上定义了灾害事件链式效应。本模型可用于区域内种类灾害事件, 特别是核设施事故场景的评估与分析, 以及对未来可能的事件态势进行预测推演, 这对应急准备与处置有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1]袁宏永, 付成伟, 疏学明,等. 论事件链、预案链在应急管理中的角色与应用[J].中国应急管理, 2008, (1): 28-31.  
YUAN Hongyong, FU Chengwei, SHU Xueming, et al. The role and application of disaster chain and emergency response planning chain in emergency management[J]. *China Emergency Management*, 2008, (1): 28-31. (in Chinese)
- [2]李藐, 陈建国, 陈涛, 等. 灾害事件的事件链概率模型研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1173-1177.  
LI Miao, CHEN Jianguo, CHEN Tao, et al. Probability for disaster chains in emergencies[J]. *J Tsinghua Univ (Sci and Tech)*, 2010, 50(8): 1173-1177. (in Chinese)
- [3]Dirk Helbing, Hendrik Ammoser, Christian Kuknert. Disasters as Extreme Events and the importance of Networks for Disaster Response Management[M]. *Disaster Management and Networks: Springer Berlin Heidelberg*, 2006.
- [4]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):18-21.  
CHEN Changkun, SUN Yunfeng, LI Zhi. Characteristic analysis of evolution and derivative on chain of risk events caused by snow and ice disasters[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009,24(1):18-21.(in Chinese)
- [5]王春振, 陈国阶, 谭荣志等. “5·12”汶川地震次生山地灾害链(网)的初步研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(5): 84-88.  
WANG Chunzhen, CHEN Guojie, TAN Rongzhi, et al. Preliminary Study on the Secondary Mountain Disaster Chains Induced by WenChuan Earthquake[J]. *Journal of Sichuan University(Engineer Science Edition)*, 2009, 41(5): 84-88. (in Chinese)
- [6]范海军, 肖盛燮, 郝艳广, 等. 自然灾害链式效应结构关系及其复杂性规律研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2006,25(supp1):2603-2611.
- [11]FAN Haijun, XIAO Shengxie, HAO Yanguang, et al. Study on structural relation of chain effects on natural disaster and its complexity[J]. *Chinses Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006,25(supp1):2603-2611. (in Chinese)
- [7]Lubos Buzna, Karsten Peters, Dirk Helbing. Modelling the dynamics of disaster spreading in networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 363(1): 132-140.
- [8]May Fred. Cascading disaster models in postburn flash flood[C]// Butler, Bret W, Cook, Wayne, comps. *The fire environment--innovations, management, and policy*. Fort Collins:US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2007: 443-464.
- [9]Cozzani V, Antoni G, Spadoni G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5): 463-477.
- [10]季学伟, 翁文国, 赵前胜. 灾害事件链的定量风险分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(11): 1749-1752.  
JI Xuewei, WENG Wenguo, ZHAO Qiansheng. Quantitative disaster chain risk analysis[J]. *J Tsinghua Univ (Sci and Tech)*, 2009, 49(11): 1749-1752. (in Chinese)
- [11]湛孔星, 陈国华. 城域突发事故灾害发生机理探索[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(6): 3-8.  
ZHAN Kongxing, CHEN Guohua. Exploration on the Occuring Mechanism of Urban Area Emergency Disasters[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(6): 3-8. (in Chinese)
- [12]裘江南, 师花艳, 王延章. 基于事件链的知识导航模型研究[J]. 中国管理科学, 2009,17(1): 138-143.  
QIU Jiangnan, SHI Huayan, WANG Yanzhang. Event Chain-Based Knowledge Navigation Model[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009,17(1): 138-143. (in Chinese)