

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. [Chen Changkun, Zhao Dongyue, Yang Jian, et al. A Methodology of Disaster Crack Analysis Based on Disaster Evolution Network[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 6-9.]

# 基于灾害演化网络的灾害裂痕分析方法研究\*

陈长坤, 赵冬月, 杨建, 李昂, 姬露露

(中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 考虑到某一灾害事件可能会由多种源发灾害事件相互耦合作用造成, 且次生灾害事件的演化过程可显著反映出整个灾害事件演化情况, 通过引入“初始灾害事件”、“耦合灾害事件”等概念, 并基于灾害演化网络, 提出了灾害裂痕分析方法, 进一步将该方法应用于2008年汶川8.0级地震灾害演化的分析中, 从灾害裂痕范围和灾害裂纹深度两个维度分析了灾害演化的机理及其整体情况, 最后总结出灾害裂痕分析方法的作用及意义, 对开展防灾减灾及应急处置等工作起到一定的指导作用。

**关键词:** 灾害; 演化网络; 灾害裂痕; 初始灾害事件; 耦合灾害事件

**中图分类号:** X43   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2016)02-0006-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.02.002

由于国内外各种灾害事件频繁发生, 且一种重大灾害事件发生时, 往往会产生多种次生灾害, 最终造成严重的后果, 给人民带来严重的损失和影响。目前, 对于灾害的研究多从灾害演化和灾害链的角度展开。在理论方面, Lubos Buzna<sup>[1-2]</sup>、翁文国<sup>[3]</sup>等通过建立普适性的复杂网络灾害蔓延动力学模型, 研究了灾害演化行为。Min Ouyang<sup>[4]</sup>基于无标度网络分析了具有冗余系统的灾害演化行为。史培军<sup>[5]</sup>阐述了灾害链的概念, 并分析了台风-暴雨灾害链、寒潮灾害链、干旱灾害链和地震灾害链等四种常见灾害链; 李智<sup>[6]</sup>基于复杂网络理论构建了灾害事件演化与控制模型, 并将模型运用到具体案例中。在具体应用方面, 崔云<sup>[7]</sup>、徐梦珍<sup>[8]</sup>等研究了汶川地震的灾害链特点以及防治对策。另外, 陈长坤<sup>[9]</sup>等基于复杂网络理论对“莫拉克”台风进行了灾害演化过程分析和风险分析; 刘文方<sup>[10]</sup>等基于熵权理论对斜坡地质灾害链进行了综合评判。

上述研究为笔者提供了灾害演化方面的理论基础。然而, 这些研究大多仅从一个灾害演化网络角度开展, 笔者从若干个灾害演化网络相互作用而形成的最终灾害的角度展开研究, 提出了新的灾害分析方法, 并结合典型案例进行应用, 分析了该方法的作用和意义, 希望为灾害预防和灾害应急救援等方面提供新思路。

## 1 理论分析

### 1.1 初始灾害事件和耦合灾害事件的概念

从大量灾害案例分析研究过程中可以发现, 初始灾害事件诱发一系列次生灾害事件, 造成初始灾害影响的同时, 其他的源发灾害事件也会诱发一系列次生灾害事件, 并且造成的灾害影响会与初始灾害相互耦合, 形成最终的灾害影响, 即灾害影响具有叠加特性。因此, 在灾害事件中, 将造成初始灾害影响的源发事件称为初始灾害事件(如油气管道爆炸事故中的油气泄漏事件)。在灾害事件中, 将起到加大初始灾害影响作用的源发事件称为耦合灾害事件(如油气管道爆炸事故中的其他源发事件)。同时, 根据初始灾害事件与耦合灾害事件引发的灾害演化是否为同灾种灾害演化, 将耦合灾害事件分为同类耦合灾害事件(与初始灾害事件引起的灾害演化为同一灾种灾害演化的耦合灾害事件)和异类耦合灾害事件(与初始灾害事件引起的灾害演化不是同一灾种灾害演化的耦合灾害事件)。图1表示了初始灾害事件演化与耦合灾害事件演化的关系。

### 1.2 灾害裂痕的概念

在灾害事件中, 各种次生灾害的演化过程表

\* 收稿日期: 2015-10-12    修回日期: 2015-11-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51534008); 国家自然科学基金项目(51576212); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 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

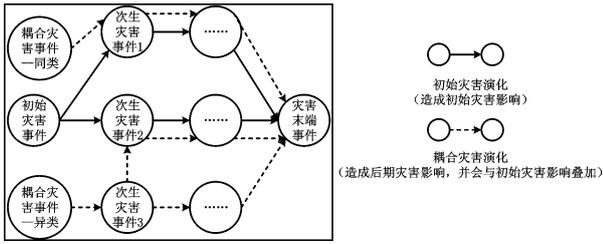


图1 初始灾害与耦合灾害演化网络

明, 次生灾害种类的多少在一定程度上能够反映出该灾害演化过程的复杂程度, 同时, 各次生灾害引发的节点数量可以反映出各个次生灾害对整个灾害事件演化的影响程度。灾害裂痕可以表示为灾害事件中由次生灾害的演化发展构成的裂纹, 正如玻璃裂痕现象一样, 如图2所示。从图2可以看出, 灾害裂痕能够反映出某个灾害事件的灾害演化情况, 可以用灾害裂痕范围和各个方向的裂纹深度这两个维度来表征。

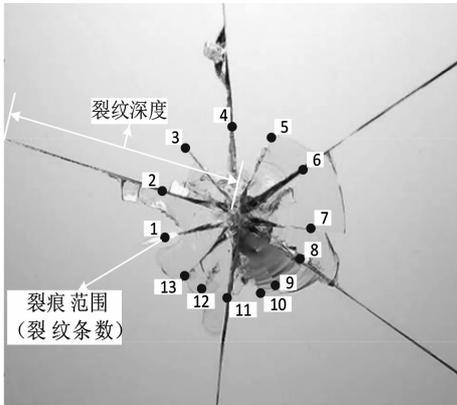


图2 玻璃裂痕

雷达图<sup>[11]</sup>是把同一数据序列的值在不同坐标轴上的点用折线连接起来所形成的多边形, 它是通过应用定量指标反映出定性问题的模型工具。图3为用雷达图表示的灾害裂痕, 其中, 次生灾害的种类数量代表灾害裂痕的范围, 体现灾害事件演化过程的复杂程度; 数值轴上的数值称为次生灾害影响因子, 代表灾害裂痕各个方向的裂纹深度, 体现各个次生灾害在整个灾害事件中的影响程度。

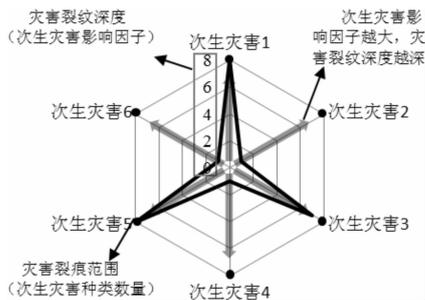


图3 灾害裂痕雷达图

在本文中, 次生灾害影响因子计算规则如下所示。用图  $G = (V, E)$ <sup>[2]</sup> 表示灾害演化网络。为

了便于计算次生灾害影响因子, 在去掉源发灾害节点的基础上用图  $G' = (V', E')$  表示次生灾害演化网络。集合  $V' = \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$  表示网络中的灾害节点,  $E'$  为一个  $V' \times V'$  的集合, 灾害演化连接边  $(i, j) \in V' \times V'$  用来表示节点间的连接关系。矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  表示图  $G'$  中节点间的连接关系, 其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 能到达节点 } j; \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 不能到达节点 } j; \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

(1)

对于整个灾害事件来说, 某个次生灾害影响因子  $F_i$  计算公式为

$$F_i = F_{1i} + F_{2i} + F_{3i}, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

(2)

式中:  $F_{1i} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ , 为初始灾害演化网络中该次生灾害影响因子;  $F_{2i} = \alpha \sum_{j=1}^n a_{ij}$ , 为同类耦合灾害演化网络中该次生灾害影响因子,  $\alpha$  为影响系数;  $F_{3i} = \beta \sum_{j=1}^n a_{ij}$  为异类耦合灾害演化网络中该次生灾害影响因子,  $\beta$  为影响系数。

## 2 汶川 8.0 级地震灾害演化网络模型建立与灾害裂痕分析

从 2008 年 5 月 12 日汶川发生 8.0 级大地震到 2008 年 5 月 31 日, 除了主震造成惨重影响之外, 4 级以上余震发生了 191 次(其中 6 级以上余震 5 次), 导致多地段断道、滑坡和房屋倒塌等, 不仅阻断交通, 还毁坏了大量农作物<sup>[12]</sup>。再加上局地暴雨和区域性暴雨的共同激发作用, 导致泥石流活动从汶川 8.0 级地震发生当晚起到 5 月底, 在汶川县、宝兴县和崇州市等多地爆发, 造成交通阻断、农作物毁坏、房屋倒塌等, 人员伤亡和财产损失较大<sup>[13]</sup>。从 2008 年 5 月 12 日到 2008 年 5 月 31 日, 汶川 8.0 级地震灾害事件中主震、余震以及强降雨等多灾种灾害事件演化耦合现象明显, 因此笔者将截取该时间段的灾害演化过程进行研究。

汶川 8.0 级地震灾害造成了大量的次生灾害事件, 很难将所有次生灾害事件都考虑到。为了便于分析, 笔者仅考虑产生了较大影响的次生灾害事件, 灾害末端事件只考虑人员伤亡和财产损失。

依据上述灾情, 图 4 给出了汶川 8.0 级地震灾害演化网络拓扑结构。

考虑到汶川 8.0 级地震灾害事件中, 由于余震与主震致灾性质相同, 余震引发的各种次生灾害大多包含于主震造成的次生灾害种类中, 其对整个灾害演化的影响程度相对于初始灾害演化的来说比较小, 故此处笔者将同类耦合演化中的次生灾害影响系数  $\alpha$  取 1/2; 而强降雨与主震致灾性质不同, 一方面强降雨会导致新的次生灾害事件, 另一方面强降雨与主震对同种次生灾害的作用方式不同, 强降雨引发的次生灾害对整个灾害演化的影响程度不能弱化, 故此处笔者将异类耦合演化中的次生灾害影响系数  $\beta$  取 1。

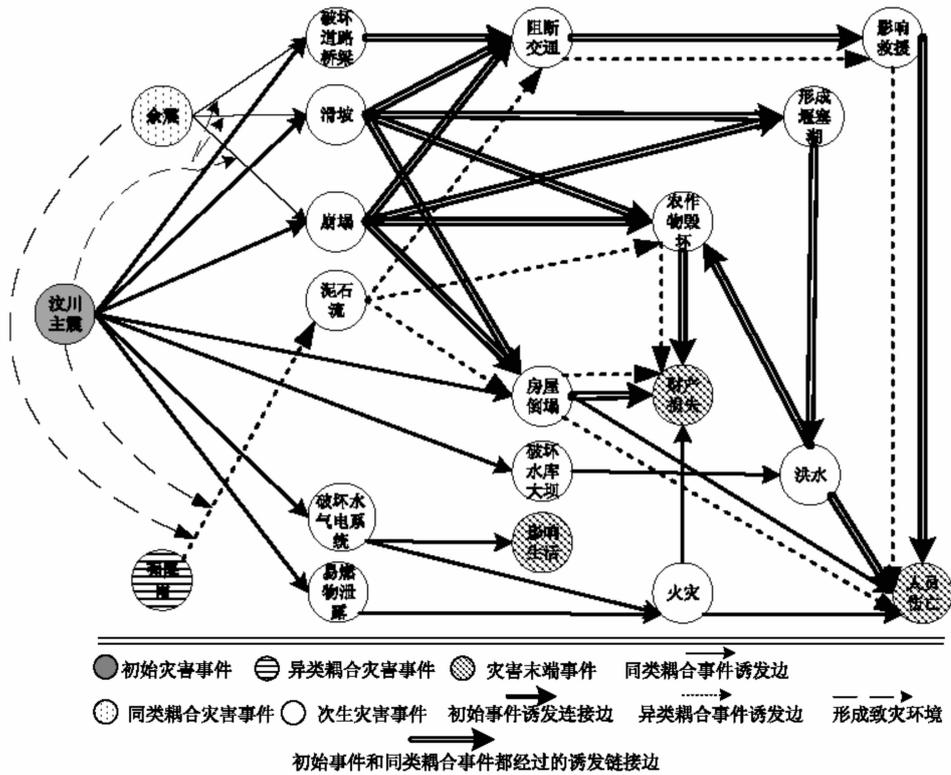


图4 汶川8.0级地震灾害演化网络拓扑结构

表1 汶川地震次生灾害影响因子表

| 次生灾害事件  | 编号 $i$ | 次生灾害影响因子 $F$  |               |                |              |
|---------|--------|---------------|---------------|----------------|--------------|
|         |        | $F_{1i}$ (主震) | $F_{2i}$ (余震) | $F_{3i}$ (强降雨) | $F_i$ (汶川地震) |
| 破坏道路桥梁  | 1      | 3             | 1.5           | -              | 4.5          |
| 滑坡      | 2      | 8             | 4             | -              | 12           |
| 崩塌      | 3      | 8             | 4             | -              | 12           |
| 房屋倒塌    | 4      | 2             | 1             | 2              | 5            |
| 破坏水库大坝  | 5      | 4             | -             | -              | 4            |
| 破坏水气电系统 | 6      | 4             | -             | -              | 4            |
| 易燃物泄漏   | 7      | 3             | -             | -              | 3            |
| 阻断交通    | 8      | 2             | 1             | 2              | 5            |
| 农作物毁坏   | 9      | 1             | 0.5           | 1              | 2.5          |
| 形成堰塞湖   | 10     | 4             | 2             | -              | 6            |
| 洪水      | 11     | 3             | 1.5           | -              | 4.5          |
| 火灾      | 12     | 2             | -             | -              | 2            |
| 影响救援    | 13     | 1             | 0.5           | 1              | 2.5          |
| 泥石流     | 14     | -             | -             | 6              | 6            |

注： $F_i$ 表示整个汶川地震灾害演化过程中，某个次生灾害的影响因子； $F_{1i}$ 表示由汶川主震诱发的初始灾害演化网络中该次生灾害的影响因子； $F_{2i}$ 为有余震诱发的同类耦合灾害演化网络中该次生灾害的影响因子； $F_{3i}$ 为由强降雨诱发的异类耦合灾害演化网络中该次生灾害的影响因子。

根据上述灾害演化网络拓扑结构和次生灾害影响因子计算规则得出了次生灾害影响因子。其结果如表1所示。依据表1绘制汶川8.0级地震灾害痕迹雷达图，具体如图5所示。

从图5可以看出，汶川地震灾害主要诱发了14种次生灾害，其灾害裂痕范围较大，所以灾害演化比较复杂。滑坡与崩塌的影响因子均为12，说明这两种次生灾害的灾害裂痕相对较深，对整个灾害演化的影响很大，造成主要的灾害后果。

泥石流、房屋倒塌、阻断交通、破坏道路桥梁及破坏水电气系统的影响因子在4~6之间，因此，其对整个灾害演化影响较大。然而，其他的次生灾害影响因子较小，对整个灾害演化影响较小。

从图5可以推知，汶川地震灾害事件中初始灾害事件演化与耦合灾害事件演化在整个灾害演化过程中的作用机理。由主震引出的初始灾害裂痕范围大致上确定了整个地震灾害裂痕的范围，基本形成了整个地震灾害演化的复杂程度。滑坡、

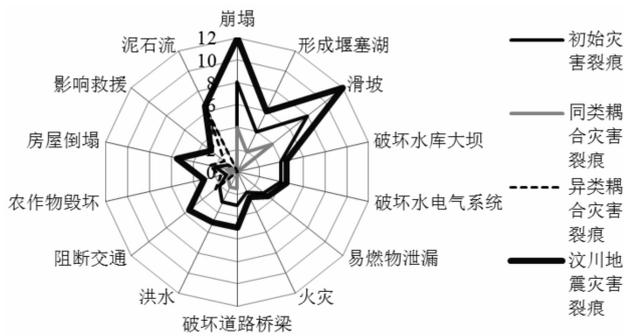


图5 汶川地震灾害裂痕雷达图

崩塌等次生灾害形成了初始的灾害裂纹深度,造成了初始灾害影响,为耦合灾害的发生提供了致灾环境。由余震形成的同类耦合灾害裂痕没有对初始灾害裂痕的范围进行扩展,只是加深了初始灾害裂痕部分方向的裂纹深度,扩大了对整个灾害演化的影响。由强降雨形成的异类耦合灾害裂痕既对初始灾害裂痕的范围进行了扩展,增加整个地震灾害演化的复杂程度,又加深了初始灾害裂痕部分方向的裂纹深度。

### 3 结论

笔者基于灾害演化网络,提出了灾害裂痕分析理论及方法,并运用该方法分析了2008年汶川8.0级地震灾害演化机理,得到以下结论。

(1) 灾害裂痕分析法可以用来评价某个灾害事件整体演化情况。灾害裂痕分析法的优点是:既可以直观地描述某个灾害事件演化复杂程度,又可以反映出各个次生灾害事件对整个灾害事件演化的影响程度,同时也可以得出对整个灾害事件演化影响较大的若干次生灾害事件。

(2) 多灾害耦合的本质:初始灾害裂痕为耦合灾害裂痕的形成提供环境,耦合灾害裂痕通过扩展灾害裂痕范围和加深次生灾害裂纹深度两种方式作用在初始灾害裂痕上,进一步扩大灾害的最终损失程度。灾害裂痕分析法可以有效应用于分析多灾种耦合事件的演化过程。

## A Methodology of Disaster Crack Analysis Based on Disaster Evolution Network

Chen Changkun, Zhao Dongyue, Yang Jian, Li Ang and Ji Lulu

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

**Abstract:** A disaster event could be caused by mutual coupling of a variety of source disasters. In addition, the overall disaster evolution system can be obviously reflected by the evolution of secondary disasters. Therefore, in this paper, a disaster crack analysis methodology is presented based on disaster evolution network through introducing the concepts of initial disaster event and coupling disaster event. Furthermore, the mechanism and the overall situation of evolution of the earthquake disaster in Wenchuan 2008 are analyzed with this methodology from two dimensions, including the disaster crack range and the disaster crack depth. Finally, the function and significance of the methodology is investigated based on the above analysis of theory and case. Hopefully, this methodology will be of guidance for disaster prevention and mitigation, emergency treatment and other work related to emergency management.

**Key words:** disaster; evolution network; disaster crack; initial disaster event; coupling disaster event

(3) 在开展防灾减灾及应急处置救援等工作时,除了要做好应对初始灾害事件及其引发的次生灾害事件的工作之外,更要考虑初始灾害事件会造成什么样的致灾环境,有哪些耦合灾害事件会发生。

然而,初始灾害事件演化造成的致灾环境对耦合灾害事件发生造成的影响,以及基于初始与耦合灾害事件灾害演化的风险分析及评估还需进一步展开相应的研究。

### 参考文献:

- [1] Lubos Buzna, Karsten Peters, Dirk Helbing. Modeling the dynamics of disaster spreading in networks[J]. *Physica Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 363(1): 132-140.
- [2] Lubos Buzna, Karsten Peters, Hendrik Ammoser, et al. Efficient response to cascading disaster spreading[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(5): 056107.
- [3] 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.
- [4] Min Ouyang, Ming-Hui Yu, Xiang-Zhao Huang, 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.
- [5] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 1-9.
- [6] 李智. 基于复杂网络的灾害事件演化与控制模型研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [7] 崔云,孔纪名,吴文平. 汶川地震次生山地灾害链成灾特点与防治对策[J]. *自然灾害学报*, 2012, 11(1): 109-116.
- [8] 徐梦珍,王兆印,漆力健. 汶川地震引发的次生灾害链[J]. *山地学报*, 2012, 30(4): 502-512.
- [9] 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.
- [10] 刘文方,李红梅. 基于熵权理论的斜坡地质灾害链综合评判[J]. *灾害学*, 2014, 29(1): 8-11.
- [11] 朱建平. 应用多元统计分析[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [12] 中国地震台网中心. 2008年5月12日汶川8.0级地震及余震速报目录和统计[EB/OL]. (2010-05-12) [2015-11-21]. [http://www.csdnmc.ac.cn/newweb/wenchuan/wenchuan\\_aftershocks.htm](http://www.csdnmc.ac.cn/newweb/wenchuan/wenchuan_aftershocks.htm).
- [13] 谢洪,钟敦伦,矫震,等. 2008年汶川地震重灾区的泥石流[J]. *山地学报*, 2009, 27(4): 501-509.