

本著作受到国家自然科学基金项目资助

历史灾害 数据挖掘与建模

胡明生 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

历史灾害数据挖掘与建模

胡明生 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

自然灾害事件的形成和演化并不是相互独立的,无论是同一领域的灾害事件还是不同领域的灾害事件之间都不同程度地存在着相互引发、干涉、转化等复杂关系,从而形成灾害事件的链式反应过程,因此对灾害形成和演化机理的研究应该从整体关联性出发,统一地揭示各种灾害事件发生和发展的共性规律。

历史灾害数据挖掘与建模重点研究各种灾害的发生和发展过程以及他们之间的密切关系,挖掘灾害事件演化过程中的共性,达到有效预测灾害的目的。历史灾害数据挖掘与建模融合了数学、计算机科学、统计物理等学科,探索利用复杂系统自组织演化发展及建模的思想,在历史自然灾害的时空特征及关联性分析的基础上确定网络关键参数和抽象标准,建立复杂网络模型来研究历史灾害。全书共分7章,内容包括:绪论、历史自然灾害的复杂网络模型、灾害节点属性的量化以及分级方法、区域灾害链挖掘以及灾害社团的划分方法、基于复杂网络的灾害关联研究、各种灾害的特征及其相关实验、疫灾中病毒传播规律研究,使读者更好地领会利用复杂网络处理灾害数据的基本思想、理论和方法。

本书旨在介绍学科进展,为广大科研教学人员提供一个交流最新研究成果,与年轻学者共同进步的平台,以共同推动国内关于灾害数据挖掘研究的进一步发展,成为历史灾害数据挖掘方面的信息和学术资源。也可以作为高等院校本科高年级学生在数据挖掘方面学习的参考书。我们热切地希望通过该书的出版,进一步完善与推动该学科领域的发展。

图书在版编目(CIP)数据

历史灾害数据挖掘与建模/胡明生著. — 北京:中国水利水电出版社,2013.10
ISBN 978-7-312-32151-1

I. ①历… II. ①胡… III. ①自然灾害—历史—数据采集—研究 IV. ①X43

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第249814号

策划编辑:雷顺加/向辉

责任编辑:张玉玲

封面设计:李 佳

书 名	历史灾害数据挖掘与建模
作 者	胡明生 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10.5印张 188千字
版 次	2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

自然灾害的链式规律与演化机理研究主要集中在短时间的单源灾害与次生灾害方向上,近年的案例研究证明灾害演化具有多灾种关联的复杂性和长时间的空间迁移性。本书介绍了利用复杂网络对历史自然灾害事件进行建模,深入研究长时间序列的灾害链式规律。

首先,在历史自然灾害的时空特征及关联性分析的基础上,确定网络关键参数和抽象标准,建立一个多维的复杂网络模型;然后,在网络中进行地图区域划分,从共现分析、时间关联、空间关联三个方面来研究各区域的灾害成链概率与时空趋势,挖掘灾害演化的关键要素和共性规律,达到有效预测灾害的目的。

本书共分7章。第1章介绍相关的研究背景与现状分析;第2章介绍历史自然灾害的复杂网络模型;第3章以蚁群聚类为基础,提出一种新的分级和属性量化方法,以解决历史灾害记录的简约性、描述性问题,为使实验结果更为客观和准确,在灾害相关数据的整理归一化处理中采用灰色关联法进行分析,使用蚁群自动聚类法对历史灾害的等级进行划分;第4章通过定义相似空间向量方式挖掘区域灾害的发生规律,建立了一种多维的网络模型,并将一种利用萤火虫算法进行求解多峰路径优化问题的方法应用在向量发现中,同时为了改善GSO在收敛速度和求解精度上的不足,增加了改变步长和组亮度控制等优化策略,最终通过实验中与单纯使用GSO算法的性能对比证明了该方法的优越性;第5章基于自然灾害的历史记录对灾害之间的相关度进行研究,根据灾害发生的时间跨距计算灾害间的共现率和引发率,以此计算被引发的次生灾害的危害度,并通过9种历史灾害记录验证该算法的合理性,并提出了一种基于相对关联特征度的地震区域共现分析法,以9个朝代的地震灾害数据库为平台构建出以修正的Salton指数为参数的地震区域间关联度评估模型,改善了共现分析中Salton指数过高的问题,使得Salton指数能更加接近真实关联度;第6章以各朝代历史数据为基础,研究水灾、疫灾、地震的灾害特征及各灾种与太阳活动的关系;第7章以疫灾中病毒的传播特点为基础,复杂网络为平台,分别从不同角度考虑病毒的传播与扩散,建立数学模型,通过常微分方程定性与稳定性理论对模型进行分析得到了控制与预防病

毒传播的最优策略，并且通过计算机模拟更加直观地看到病毒传播的趋势，为人们的决策提供理论依据。

本书在内容的选取上更加注重思维习惯和研究方式，没有过多地深究公式的推导，适合对利用复杂网络研究历史灾害感兴趣的读者借鉴和学习。在编写过程中作者的同事、同行和朋友先后提出了许多宝贵的建议，他们对本书的写作给予了热情的关注与协助，并不同程度地对本书的完成和出版做出了贡献。本书的每一章都是由胡明生提供总体思路和初稿，由贾遂民、贾志娟、刘思、吉晓宇、雷利利、陈巧灵、张向宇、李章强、杨利珍、樊慧芳等完善细化和修改审定。在此，衷心感谢大家的支持与帮助。

作者非常感谢郑州师范学院的支持，感谢国家自然科学基金—河南人才联合培养基金项目（项目编号：U1204703）的资助。

作者在此特别感谢中国水利水电出版社的各位老师对本书出版的大力支持，感谢家人在我多年的科研工作中给予我最坚定的支持和无私的奉献，没有他们一如既往的鼓励、支持和理解，本书不可能顺利完成。

由于作者水平有限，书中疏漏与不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正，共同进步。

作者

2013年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 相关研究现状分析	2
1.2.1 灾害链和网的研究	2
1.2.2 灾害系统及演化研究	4
1.2.3 复杂网络的应用及相关研究	8
1.2.4 复杂网络链路预测	11
1.2.5 复杂网络在灾害演化方面的应用	14
1.3 主要工作与贡献	22
第 2 章 历史自然灾害的复杂网络模型	25
2.1 复杂网络相关定义与参数介绍	25
2.2 灾害复杂网络模型整体架构	28
2.3 灾害链式演化机理研究思路	31
2.4 本章小结	32
第 3 章 灾害节点属性的量化及分级方法	33
3.1 以蚁群聚类为基础的历史灾害分级方法	33
3.1.1 研究现状分析	33
3.1.2 蚁群聚类思想	34
3.1.3 历史灾害记录的属性定义	35
3.1.4 蚁群聚类算法描述	36
3.1.5 性能分析	38
3.2 基于混合模糊算法的历史地震烈度判定方法	40
3.2.1 研究现状分析	40
3.2.2 混合模糊历史地震烈度判定模型	43
3.2.3 实例分析	47
3.3 本章小结	48
第 4 章 区域灾害链挖掘以及灾害社团的划分方法	49
4.1 以改进萤火虫为基础的区域灾害链挖掘算法	49

4.1.1	研究现状分析	49
4.1.2	解决思路	50
4.1.3	IGSO 区域灾害链挖掘算法	51
4.1.4	性能分析	53
4.2	基于 TSP 路径信息素的复杂网络社团划分方法	55
4.2.1	研究现状分析	55
4.2.2	灾害社团划分与 TSP 问题	56
4.2.3	TSPP 算法	59
4.2.4	实验及性能分析	61
4.3	本章小结	62
第 5 章	基于复杂网络的灾害关联研究	63
5.1	共现分析	63
5.2	地震区域关联度分析	65
5.2.1	构造共现矩阵	65
5.2.2	相对关联度计算	66
5.2.3	修正的 Salton 指数	68
5.3	不同灾种关联度分析	69
5.3.1	构造共现矩阵	69
5.3.2	关联度的计算	71
5.3.3	基于时间跨距的关联度分析	72
5.3.4	自然灾害之间的引发率	73
5.3.5	自然灾害的危害度	74
5.4	基于引发率的灾种复杂网络建模	75
5.4.1	初始模型的建立	75
5.4.2	连锁反应网络模型的构建	76
5.4.3	灾种的重要性评估	76
5.4.4	聚类系数分析	78
5.5	本章小结	80
第 6 章	各种灾害的特征及其相关实验	81
6.1	水灾的灾害特征及其与虫灾、太阳黑子活动的关系研究	81
6.1.1	研究意义	81
6.1.2	水灾的灾害特征	81
6.1.3	水灾与太阳活动, 主要是太阳黑子的关系	93
6.1.4	水灾与虫灾之间的联系	95

6.2 疫灾的灾害特征及其与饥荒、战乱和虫灾活动的关系研究	99
6.2.1 研究意义	99
6.2.2 疫灾的灾害特征	99
6.2.3 疫灾与其他灾害、战乱的联系	105
6.3 地震的灾害特征及其与疫灾、太阳黑子的关系研究	109
6.3.1 研究意义	109
6.3.2 地震的灾害特征	109
6.3.3 地震与疫灾、太阳黑子的关系	114
6.4 本章小结	117
第7章 疫灾中病毒传播规律研究	118
7.1 引言	118
7.2 经典的传染病模型	118
7.3 小世界网络中具有饱和传染率的病毒传播模型	120
7.3.1 研究现状分析	120
7.3.2 小世界网络中的 SIRS 传播模型	121
7.3.3 平衡点的分析	122
7.3.4 免疫策略	125
7.4 基于常数输入的病毒传播模型及其分析	127
7.4.1 研究现状分析	127
7.4.2 建立模型	128
7.4.3 仿真与实验	129
7.5 竞争环境下疫灾病毒传播的动力学分析与仿真	132
7.5.1 引言	132
7.5.2 建立模型	132
7.5.3 平衡点及其稳定性分析	134
7.6 本章小结	139
参考文献	140

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

自然灾害事件的发生和发展都不是彼此独立的,任何灾害事件,在地域和时间上都存在着一定的相互联系。根据地震会引发洪水、冬雨、雪灾等规律[4],国内研究者认为,2005 及 2007 年的苏门答腊地震是导致我国 2005 年珠江流域洪水、2008 年南方冰冻灾害的根源。世界各地自然灾害的不断发生,使研究者越来越重视灾害链及灾害演化机理的研究[1-3]。根据不同灾害之间的同源性、链发性,找到它们之间的规律,从而有效地进行灾害的预测分析,是研究的主要方向之一。2011 年 5 月 10 日,我国减灾委以此为目标发表了《国家自然灾害空间信息基础设施总体构思》,正式提出“开展自然灾害形成机理和演化规律研究”的必要性和紧迫性。

一种灾害可以不同程度的引发、干涉、转化另一种或多种灾害,甚至会导致灾害事件的链式反应[7],例如暴雨、洪水、泥石流、瘟疫等一系列事件经常会紧随着台风灾害而来。所以灾害形成和演化机理的研究需要打破孤立或片面分析的现状,基于灾害之间的整体关联性系统地挖掘出灾害事件发生发展的共性规律[8,9]。复杂网络是复杂系统的研究工具之一,复杂系统包括整体关联性,因此复杂网络可以形象准确地描述整体关联性,是研究灾害事件形成、成链机理的有效手段。为揭示多种灾害的关联关系及相互作用的实质,有必要把复杂网络选作历史自然灾害链式演化仿真的建模工具,并从理论和方法层面开展灾害链生成规律的研究,形成相对完备的理论和方法体系,以丰富和发展灾害链的理论研究,指导灾害预测决策的应用实践。

Mileti[10]指出,灾害系统包括地质物理构造、人类活动、结构等系统,具有高维性、复杂性、开放性、动态性等特点。1668 年海河流域 7 天暴雨、1870 年长江中上游重大洪水、1888 年辽宁东部地区特大洪水、1957 年松花江的重涝灾害分别发生于同年的山东地震、四川地震、渤海湾地震、黑龙江东宁地震后的几个月内。通过对比分析这些前后灾害事件可以证明,灾害具有复杂性,其发生存在一定的时间和地域跨度[11],因而灾害演化也相应具有迁移性、延迟性

等特点。这些已被公认的地震—暴雨（或洪水）灾害链都表现出了明显的空间迁移性和时间延缓性，因此，广阔的空间尺度是自然灾害关联性及演化机理的研究前提。我国史书中记载了大量长时间序列、不同类型连续的自然灾害，是灾害规律研究必不可少的数据来源。以长时间序列的历史自然灾害事件为对象，我们将对灾害链的生成规律进行研究，既具有较高的严谨性和延伸性，又具有较强的指导性和实用性。

灾害问题的综合研究基础在于对灾害事件形成机理和成链规律的认识。灾害事件发生、发展、消亡的演变规律只有得到科学的认识，才能更好地进行防灾减灾管理的相关体系和技术研究；用科学的管理决策指导工作，才能避免违背客观规律的现象发生。目前，国内外对灾害成链机理的研究还主要基于近现代灾害记录，对历史（民国以前）灾害记录进行数据分析的尚不多见，并且通常针对单一灾种的内部演化，对灾害成链的时空迁移特点也缺乏考量。因此，研究灾害间的关联性和相互作用、对灾害系统的连锁反应进行有效控制，具有非常重要的实践意义。鉴于此，本书根据历史灾害记录，将不同灾种、不同区域、不同发生时间的自然灾害事件视为一个整体，利用复杂网络理论对灾害事件序列进行建模，分析各种灾害事件的发生发展过程和相互作用关系，挖掘灾害事件成链过程中的共性特点，达到有效预测灾害的目的，为政府的防灾减灾工作提供理论依据与决策支持。

1.2 相关研究现状分析

1.2.1 灾害链和网的研究

灾害链是灾害演化的基本形式，多个灾害链及其相互作用形成灾害网，网体现了多个灾害间的整体复合作用。

地震学家郭增建于1987年第一次对灾害链的概念进行了定义：一系列灾害相继发生的现象即为灾害链[12]。通常可以将灾害链分为以下五类[13]：一是以大震引起的旱涝、瘟疫为例的因果链（又称为串发性灾害链），即指一种灾害导致或诱发的其他灾害；二是以太阳活动为例的同源链（又称为共发性灾害链），即指与某一因素（如太阳黑子等）有关的、相继发生的一系列灾害，这些灾害的发生大多具有相同的根源，比如在太阳活动的高峰期，气候也时有重大波动，地壳运动频繁，心脏病发病率增高，这三类现象的相同点是与太阳活动同期；三是以“一雷打九台”等民间谚语为例的互斥链，即指一种灾害的发生会避免另一种灾害的发

生,在我国史书上就有大雨截震的记载;四是以旱震、水震为例的偶排链,即在一段时间内相继发生的一些灾害,它们之间的联系暂不明确;五是以大震后的强余震、台风的二次冲击为例的重叠链,即发生和叠加多次同样灾难的灾害链现象。

史书的灾害记录表明,一次灾害事件通常会继发一系列的次生、衍生灾害事件,其发生发展并不是孤立的、一次性的,各种灾害事件之间存在着十分复杂的因果关系。灾害链是一种突变现象,动态演化了不同灾害相互引发的过程。同时,作为自然的一个组成部分,灾害链还具有复杂、整体、统一、隐序等特点。针对于此,国内外学者采用多样、动态的方法,从整体上对区域内的群发性灾害事件和相继发生的灾害事件及其关联性进行研究,从而建立更为有效的区域综合防灾减灾体系。

史培军[14]指出灾害链的定义以及主要类型:生态环境和某种因子会导致灾害的产生,若其成为系列,则可称为灾害链;串发灾害链和并发灾害链是灾害链的两种类型。同时,还根据灾害系统性质、动力学机制,从区域灾害链的关联性出发,提出区域综合减灾体系理论[15]。文传甲[16]以功能、结构、本质为角度,对灾害链、启动灾环、被动灾环进行了定义:一种灾害对另一种灾害的引发现象,称为灾害链;前者被称为启动灾环,后者称为被动灾环;前者是后者的引发原因(包括主要、次要原因)之一。

根据灾害的生态共性、以自然灾害突变理论和灾害链式结构为研究对象,肖盛燮[17]对灾害链进行了定义——灾害链是灾害演化中能量、物质、信息的载体。同时也对自然灾害灾变链式效应的共性规律进行了抽象总结。门可佩[18]通过分析重大地震灾害链的时空性、序列性,对地震灾害链的网络结构进行阐述,提出相关的预测方法。延军平[19]等对灾害链的时空对称性规律进行了探讨,以可公度信息提取以及“蝴蝶结构图”法对重大自然灾害进行预测分析。倪晋仁[20]等以泥沙灾害链为例,对其进行定义,分析了泥沙灾害链的特点和类型。郭安宁[21]等从致灾机理角度,对地球物理灾害链进行分析,指出多种因素的强化和叠加会导致重大灾难的发生。要综合多学科互补优势,才能对大灾预测手段和方法进行改进,最后实现对灾害全链的精确预测。

在实例研究方面,以郑州矿区裴沟煤矿为例,管恩太[22]论述了一系列矿井地质灾害的灾害链,如由采动破坏而诱发的矿井突水、火、瓦斯、顶板管理等;李景保[23]等认为,洞庭湖生态区的洪水和泥沙的泛滥形成了灾害链,从而导致水灾、沙灾、鼠灾等灾害的爆发;荣莉莉[24]等以2008年中国南方特大冰雪灾害为内容,查找了近4000篇的新浪网专题报道,从时间、空间和事件的角度研究该自然灾害引起的链式演化过程,并对事件扩散的原因进行了探讨。

国外关于多灾种灾害链问题的相关研究有：以瓦尔迪兹港油溅灾害[25]为对象，南阿拉巴马州 B.S.大学的 Floyd H.和 Dennard J.进行的研究；以 1991 年奥克兰山体滑坡为对象，Henry Renteria 进行的关联灾害研究[26]；以灾害数学为基础，从系统观点出发，BUZNA L[27]等关于自然灾害链（提出了普适性的自然灾害链模型）、灾害链系统结构模式的研究；以灾害在网络上的传播机理为基础，Ouyang[28]等对灾害的蔓延动力与行为进行仿真、关于灾害蔓延恢复模型的研究；通过分析灾害链的路径，May[30]进行的灾害链式模型研究。除此之外，Helbing[29]的研究指出：自然灾害和人为灾害互为因果关系链，其中一种灾害的改变会导致整个系统上的连锁反应。针对这一问题，通过分析地壳运动、暴雨、SARS 等灾害之间的因果关系，半量化法能够实现灾害因果网的传播模拟。

这些对于灾害链和网的研究是我们建立灾害关联性及相关模型的基础，虽然我国在这方面已积累了大量历史经验及理论基础，但是在机器化方法的转化上还缺乏有效渠道和手段。

1.2.2 灾害系统及演化研究

由于孕灾环境的复杂性和多样性，巨灾系统不可避免地体现出多种灾害的耦合作用与连锁反应，由一种灾害生成巨灾系统的可能性几乎为零。深入研究灾害间的相互关系和发生规律，有效防止巨灾系统的连锁反应具有非常重要的实践意义。具体而言，源灾害事件和次生灾害群共同构成灾害系统。像海啸、地震或台风这些由自然变化引起的灾害称为源灾害事件；像地震造成的坍塌、瘟疫、日常生活环节的延迟和中断等这些由源灾害事件引起的连锁灾害称为次生灾害群。

1991 年，马宗晋院士对自然灾害系统进行了相关定义[31]：自然灾害系统由自然致灾因素、灾难发生环境、承灾物体组成，是一种涵盖了生物、海洋、地质、气象等的综合体系。关于自然灾害系统的分类方面，有些将致灾因素与灾难发生环境合并为一个内容，如 Mileti 的研究观点等；有些则将两者进行区分，如史培军的研究等[14,15,32]。

德国的 Dirk Helbing 教授指出，灾难是一种极端事件[33,34]，要采取非常规方法应对这种极端事件。同时指出，极端事件往往与高昂代价相对应。极端事件打破了常见的统计规律，以特定的能量规则为基准。Dirk Helbing 教授还认为雪崩效应和临界点等也是灾害系统所具有的特征，分别从雪崩、洪灾等自然灾害和股票暴跌、银行破产事件、金融危机等人文灾害两方面进行了阐释。

波恩大学教授 Juergen 在 Disaster Prevention and Management 中提出，灾害属于社会现象范畴[35]而非自然范畴，它只会社会系统内部发生。因此，灾害的

破坏现象是指由自然事件所引发的连锁社会现象。换言之，若灾害没有对社会系统本身造成任何影响，比如发生在无人区的洪涝、火山喷发现象，这些都不能称为自然灾害。同时，灾害造成的损失不是静止的，会随时间的变化发生改变。

突发事件、灾难、危机、危害四个词汇具有一定的相似性，比较容易混淆，世界卫生组织对此的定义[36]如下：突发事件是一种状态，正常的活动和秩序在该状态下通常无法继续，其应对方法是采取紧急措施；灾难属于事件的范畴，会带来痛苦以及扰乱生活秩序；危害也属于事件的范畴，可能会表现为灾难的导火索；危机则属于情形范畴，在紧急关头具有易发性，往往会在高压状态下打破稳定和安全的状态。

根据上述分析可以看出，虽然在一些具体细节上有所不同，国内外学者大多都认为灾害系统综合作用的产物（及演化产物）是灾害形成的损失，要重视整体而非个性特征进行研究，从而找到灾害发生发展以及演化的共性规律[32]，如图1.1所示。国外对灾害系统性的研究在侧重方向上分为社会层面和自然层面两类。其中，社会层面的研究大多以探讨灾害造成的人类社会影响和人类社会的反馈为侧重点；自然层面的研究大多以探讨灾害本身发生、发展的客观规律为侧重点。

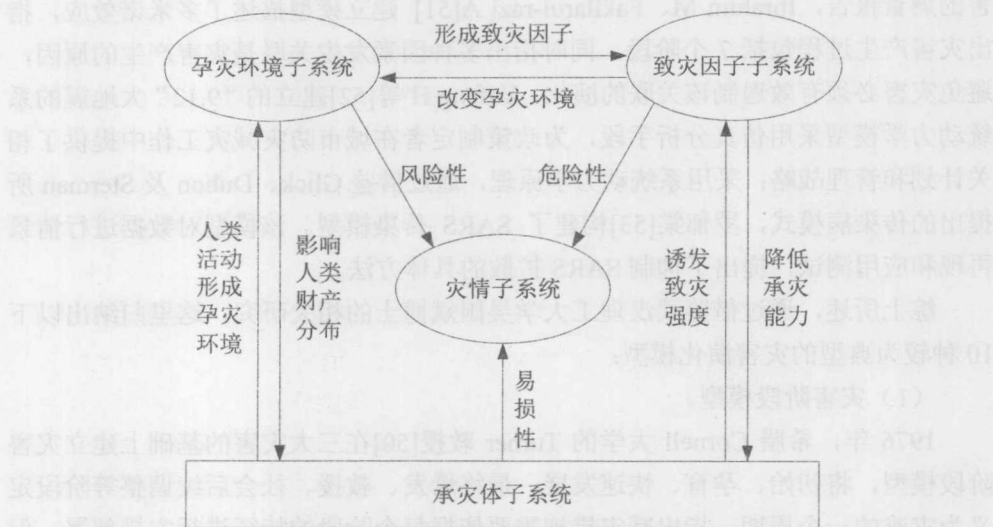


图 1.1 灾害系统内各子系统之间的关系

灾害经济学研究、脆弱性研究和关键基础设施研究是灾害情景社会层面研究的主要范畴。灾害经济学是指：对各类灾害的发生和发展规律进行经济学方面的分析，探讨灾害与社会经济系统的相互关系 [37]，例如文献[38]就深入研究了灾害的社会系统阶段性演变规律。环境或社会系统对灾害事件的敏感程度称为脆弱

性,文献[39,40]认为脆弱性是灾害产生的根源。触发源、环境、社会系统都具有脆弱性,这三者的共同作用是导致灾难爆发的原因。这方面的研究大多以环境、社会系统内部各要素脆弱性的分析为主。与国家安全和人民生活有着至关重要联系的资产和系统被称为关键基础设施,各个关键基础设施相互依赖,一个关键基础设施的破坏会产生相应的连锁反应,从而影响整个社会系统甚至造成系统的瘫痪。关键基础设施研究的侧重点是建模与仿真[41]。

工业事故研究和灾难多米诺反应是灾害自然研究的主要层面。工业事故的相关模型主要包括关于多米诺事故[42,43]、流行病事故[44,45]、系统理论事故[46,47]、功能共振事故[48,49]方面的模型,主要结合社会技术系统、工业技术、管理等多种因素,对工业事故的发生原因进行的综合分析。1976年,希腊 Cornell 大学的 Turner 教授[50]研究了三大灾害,在此基础上建立了灾害阶段模型,将初始、孕育、快速发展、最终爆发、救援、社会后续调整等阶段定义为灾难的一个周期,指出减灾措施需要依据每个阶段的特征进行安排部署。但这一模型的灾害阶段划分依据较为单一,只根据人们的反应和处理措施进行了具体划分,对于灾难的发生原因并未做深入的研究。通过分析马来西亚 1968 年至 2002 年间 7 个灾害的调查报告, Ibrahim M、Fakllarul-razi A[51] 建立模型描述了多米诺效应,指出灾害产生过程包括 7 个阶段,同时指出多种因素发生关联是灾害产生的原因,避免灾害必须有效遏制该关联的演化。Yufeng H 等[52]建立的“9.12”大地震的系统动力学模型采用仿真分析手段,为政策制定者在城市防灾减灾工作中提供了相关计划和管理战略;采用系统动力学原理,通过借鉴 Glick、Duhon 及 Sterman 所提出的传染病模式,罗郁棠[53]构建了 SARS 传染模型。该模型对数据进行情景再现和应用测试,提出了抑制 SARS 扩散的具体方法。

综上所述,通过借鉴武汉理工大学吴国斌博士的相关研究,这里归纳出以下 10 种较为典型的灾害演化模型:

(1) 灾害阶段模型。

1976 年,希腊 Cornell 大学的 Turner 教授[50]在三大灾害的基础上建立灾害阶段模型,将初始、孕育、快速发展、最终爆发、救援、社会后续调整等阶段定义为灾难的一个周期,指出减灾措施需要依据每个阶段的特征进行安排部署。但这一模型的灾害阶段划分依据较为单一,只根据人们的反应和处理措施进行了划分,对于灾难的发生原因并未做深入的研究。

(2) 灾害诱因分析模型。

针对上述问题,1992 年,Turner 教授再次建立灾害诱因分析模型[54],指出多种诱发因素的共同作用会导致灾害的产生。诱发因素具体分为 5 种:①人们对

灾害的了解和敏锐度；②人们对灾害以外事件的关注度；③灾害发展趋势的把握力；④规章制度的执行力；⑤信息流畅性。

(3) 灾害组织模型。

通过分析马来西亚 1968 年至 2002 年间 7 个灾害的调查报告, Ibrahim M、Fakillarul-razi A[51] 的模型描述了多米诺效应, 指出灾害产生过程包括 7 个阶段。同时指出, 多种因素发生关联是灾害产生的原因, 避免灾害必须有效遏制该关联的演化。

(4) 系统失误和文化重新调整模型 (SFCRM)。

灾害孕育期、爆发期、调查反馈期是 SFCRM 模型的三大组成部分[55]。该模型将灾害的根源归结于内外因矛盾, 指出有效的防治措施是合理控制该矛盾, 从而对系统做出相应的调整。

(5) 工业危机模型。

该模型通过对比分析印度 BhoPal 杀虫剂工厂致命气体泄露、挑战者航天飞机失事以及 Tyfenol 的药品中毒事件, 对工业危机的构成[56]进行了相关描述。

(6) 紧急事件演化模型。

该模型对三阶段理论进行了描述, 即急性阶段、晚期阶段和后事件阶段。同时指出不同阶段不同事件的状态具有差异性, 有针对性地提出了相应的具体措施。

(7) 危机阶段模型。

通过研究疾病发展过程, Fink 认为危机一般包括潜伏期、突发期、蔓延期、解决恢复期, 即危机四阶段模型[58]相关理论。

(8) “9.12”大地震的系统动力学模型。

台湾学者的“9.12”大地震的系统动力学模型, 采用仿真分析手段, 为政策制定者在城市方面的防灾减灾提供了相关计划和管理战略。

(9) SARS 疾病传播与控制系统的动力学模型。

以系统动力学为原理, 龚建华等人进行了北京 SARS 疫情模拟、计算和效果评价, 设计了 SARS 疾病传播与控制系统的动力学概念模型。该模型证明“早发现、早隔离、早治疗”能够较好地控制 SARS 的传播。通过借鉴 Glick、Duhon 及 Sterman 所提出的传染病模式, 罗郁棠[53]构建了 SARS 传染模型。通过将模型数据进行情景再现、测试和应用, 提出抑制 SARS 扩散的具体建议。

(10) 矿难动力学模型。

通过调查 1992 年加拿大 NovaScotia 地区的矿难事件的因果结构、条件以及各个要素间的关系, David L 根据系统动力学原理进行了相关模拟演示, 并提出了良好的政策性改进建议[60]。

综上所述,目前灾害社会层面的研究成果较多,而对灾害产生原因、发展趋势、演化过程的研究还有待加强。

1.2.3 复杂网络的应用及相关研究

复杂网络能够很好地描述现实生活中的大多数网络系统,如社会网络中的科研合作网[61]、公司董事网[62-64],信息网络中的万维网[65]、科研引用网[66]、语言网[67],技术网络中的因特网[68]、电力网[69]、航空网[70,71],生物网络中的代谢网[72]与蛋白质网络[73]。其中,复杂网络节点象征系统中的各个元素,复杂网络的边代表各个元素之间的相互关系。以前面提到的蛋白质网络为例:蛋白质等同于复杂网络中的节点,蛋白质间的化学反应等同于复杂网络的边。同样地,社会网络也可以用复杂网络来描述,其中节点相当于个人、国家或单个组织机构,边则代表这些个体间的彼此作用关系。现实网络系统具有复杂性,分别表现为[74]:一、高度复杂的网络结构——节点间连接的生成,缺乏统一的解释和规定;二、动态性的网络演化——节点连接随节点数的增加而增加,具有多样性和递增性;三、复杂的网络动力学——单个节点具有非线性系统的分岔和混沌行为,处于运动变化状态。

蔓延动力学近日成为复杂网络的研究热点,如计算机病毒在网络上的蔓延[75]、网络拓扑结构在随机去点或边情况下的演化[76]、谣言的扩散[77]以及传染病的爆发[78]等。网络特性决定于其自身的拓扑结构[79],这使得网络拓扑结构的研究越发受到重视。Erdos 和 Renyi 于 20 世纪 60 年代初提出了随机图理论,并用随机网络模型对网络的拓扑结构进行描述,进而突破性地研究出一套基于概率的随机图理论,奠定了复杂网络研究的数学理论基础[80]。近年来的研究成果表明:现实网络并非绝对的规则或随机,其最短路径较小,积聚系数较大,遵从 Powe:Law 分布[82]和六度分离理论[81]。在 WS 小世界模型的生成算法[83](由 Watts 和 Strogatz 于 1998 年提出)中,大多数节点只需要经过较短的步数就可以相互沟通。若以一个人来表示小世界网络中的一个节点,而边表示人与人相互认识,那么这个小世界网络能够反映陌生人以相同的人为基础进行连接的小世界现象。

到目前为止,研究者还只是根据各自的认知角度对复杂网络的类别进行了大致划分,而复杂网络自身尚未形成一个统一的概念。以节点度的分布情况为标准,复杂网络包括指数网络和无尺度网络。指数网络中的节点基本属于小度数同质节点,多数节点居于平均节点期望值,其分布指数与度数成反比。指数网络的著名模型是 Erdos-Renyi (ER) 随机图模型[80](Erdos 与 Renyi 于 1960 年提出,其特点是簇系数小)和小世界网络模型[83](又称 WS 模型, Watts 与 Strogatz 于 1995

年提出,其特点是簇系数大)。因而目前学术界已经普遍把小世界网络定义为具有较大簇系数和较小平均路径长度的网络。无尺度网络的节点度服从幂律分布,网络中的节点是异质的。无尺度网络的著名模型是 Barabasi-Albert 无尺度网络模型[82] (又称 BA 模型或 BA 网络, Barabasi 和 Albert 于 1999 年建立)。无尺度网络中的大多节点仅与个别节点相连,存在着起主导和支配作用的大度数节点。以生成方式为标准,复杂网络包括随机网络和确定网络。顾名思义,随机网络即指具有相同生成规则,随机生成拓扑的网络,即便两个随机网络具有一模一样的生成规则,但在模拟生成的过程中依然会产生随机差异;相反,具有确定拓扑生成规则,能进行拓扑性质求解的是确定网络。以边的方向性为标准,复杂网络又包括无向网络和有向网络,有向网络的边有方向,无向网络的边无方向。另外,根据网络中的边有无定义权值可将复杂网络进一步分为 0-1 网络和赋权网络。

在具体应用上,复杂网络目前已涉及社会、经济、管理、整理、文化等各个领域。许多真实网络,包括万维网、生命系统、好莱坞的演员网络,都被认为是无尺度网络,这些网络由少量具有极大影响力(即众多连接)的节点所支配。在面对意外故障或无意识攻击时,无尺度网络表现出很好的鲁棒性,其弱点是有针对性的协同式攻击。人们借助这些有趣的现象发现了理论的空白领域,改变了对真实世界的原有认识,增添了新的研究问题——各种复杂系统都遵循着某些基本的法则,具备严格的结构性,如果能够认识这些法则,就能将其运用于不同的领域,从而更好地指导实践。

首先,现实系统的正常运行离不开复杂网络理论。随着时代的进步,网络与我们的生活息息相关,以因特网为首的各种网络发挥着重要的作用,人们也愈发依赖于这些网络。但 2000 年英国议会电子邮件因爱虫病毒瘫痪、美国芝加哥 O'Hare 机场因风暴导致的关闭、2003 年美加电网的大崩溃事故无不证明这些网络的坚固性还有待加强[84]。经历过这些事件后,一系列类似防止网络病毒传播和加强网络拓扑承受力的问题被人们提出。显而易见,这些问题的解决都离不开复杂网络的参与。提高复杂网络的稳定性,不但能够提高技术网络(包括航空网、电网、计算机网等)和基础设施网络的安全系数,也能够有效阻止黑客或病毒的传播。

其次,社会系统的正常运动也离不开复杂网络。对人类威胁较大的艾滋病、非典、禽流感等传染病是如何在特定的社会网络中传播而导致流行的呢?人们应该如何对这些疾病进行控制,从而最大化地降低损失呢?利用复杂网络也许能够解决这些问题。近年来,研究者针对各个现实网络系统的不同特征提出了相应的防治手段。以非典为例,用复杂网络能够对其多样性进行预测,从而遏制该疾病