

灾害链灾情累积放大研究方法进展

余 瀚¹, 王静爱^{1,2}, 柴 玫^{3,4}, 史培军^{2,3}

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学民政部—教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 中国人民财产保险股份有限公司广东省分公司, 广州 510600)

摘 要:近年来全球范围内频发的重大自然灾害事件,表明一种灾害引发一系列次生灾害的灾害链现象使得灾情通过累积放大效应而大大超过单一灾种灾情,深入研究灾害链灾情累积放大过程是有效防范巨灾风险的前提。首先,本文梳理了国内外研究中不同视角下对灾害链现象的理解,认为灾害链一般性概念中应当包含孕灾环境、致灾因子链、承灾体以及它们在时间和空间上复杂相互作用关系,只有从地理学的综合性角度出发,才能正确而完整的理解灾害链过程灾情累积放大机制。其次,按研究思路的差异,综述了当前研究灾害链灾情累积放大过程的5类方法,包括经验地学统计方法、概率模型、复杂网络模型、灾害模拟以及多学科理论方法。从描述灾害链要素在时间和空间上复合作用的角度出发,分别讨论了它们在刻画灾害链灾情放大过程中的优势与不足。选取了影响较大、灾害引发关系典型的地震灾害链与台风灾害链,从灾种维度综述上述几种方法在实际应用中的概况及进展。最后,提出综合多种方法发展与完善灾害链灾情累积放大效应过程的动态模拟是灾害链的研究趋势,其中关键在于模拟灾害链系统各要素的时间与空间上的耦合,研究思路从“静态—描述—解释”向“动态—过程—模拟”的转变是理解灾害链、灾害系统复杂性的重要途径。

关 键 词:灾害链;灾情评估;灾情累积放大;灾害系统复杂性

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.09.007

中图分类号:P315

文献标识码:A

1 引言

近年来,在全球范围内频繁出现多种重大自然灾害事件,对人类生命、经济、社会及生态系统等多个方面造成巨大冲击与影响:例如,2005年美国新奥尔良的卡特里娜飓风及其引发的风暴潮—洪涝灾害(Travis, 2005)、2008年初中国南方的特大低温—雨雪—冰冻灾害链(史培军, 2008)、2008年中国汶川地震—滑坡/泥石流等多种灾害链(Stone, 2008; Xu et al, 2012; Huang et al, 2013)、2011年日本福岛3.11地震—海啸—核电站泄露灾害链(Anonymous, 2011; Buesseler et al, 2012)等。这些巨灾惨重的伤亡与损失并不是由单一灾害造成的,而是通过多种灾害在时间和空间上的复杂相互作用造成灾情累积放大(Shi et al, 2010; Anonymous, 2011),因此把灾害相互影响过程纳入灾害损失评估、风险计算等研究,是理解巨灾形成机制与巨灾风险防范的基础。

经典灾害研究往往认为不同灾种之间是同质、线性、相互独立的,然而这一潜在假设并不总是成立(Selva, 2013),多种灾害相互关联形成的灾害系统复杂性,已经成为灾害研究的热点问题之一。21世纪日程可持续发展报告(UNEP, 1992)、美国国家减灾战略(FEMA, 1995)、约翰内斯堡行动计划(UN, 2002)、兵库行动框架(UN-ISDR, 2005)、以及IPCC(IPCC, 2012)等均把多灾种关联现象的研究作为重要内容。国内外研究实践中,灾害间的相互关联类型复杂多样,包括灾害链、灾害遭遇、多灾种或灾害群、协同作用等(史培军, 1991; Kappes et al, 2012; Shi, 2012; Xu et al, 2014)。灾害间存在关联的情形下,灾情往往并不是几个单独灾害的简单叠加,但在灾情、风险评估等研究实践中灾害关联性的影响通常并未有机结合起来,主要是在空间上进行多灾种的简单叠加(Kappes et al, 2012)。

灾害链是指因致灾因子之间存在引发关系而

收稿日期:2014-07;修订日期:2014-10。

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2012CB955403);教育部—国家外国专家局高等学校创新引智计划项目(B08008)。

作者简介:余瀚(1983-),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事灾害链建模研究,E-mail: m05yuh@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者:史培军(1959-),男,陕西靖边人,教授,主要研究方向为环境演变与自然灾害,E-mail: spj@bnu.edu.cn。

1498-1511 页

形成一种灾害引发一系列灾害的现象,是灾害系统复杂性的一种基本形式(史培军, 1996; Shi, 2012)。灾害链具有两方面特殊性:一是先发灾种发生后,次生灾害是否发生存在一定的随机性,但由于灾害间具有因果关系,所以又不是完全的随机现象。这种受到约束的随机性会产生一种网络化的风险,使得灾害系统复杂性大大增加(Helbing, 2013)。二是灾害链存在空间与时间上的扩展过程,而其他类型的灾害关联性一般反映在特定区域上的叠加过程(Shi, 2012)。

灾害链作为一个复杂灾害系统,其灾情累积放大过程研究需要综合分析灾害链系统中各要素以及要素间关系。当前,灾害链研究刚刚兴起,不同学者对灾害链概念存在多种理解,描述灾害链灾情累积放大过程的指标、数据获取、方法等存在明显差异,完整解释灾害链灾情累积放大机制,需要综合考虑多种模型与方法的适用性。本文将首先梳理现有研究对灾害链概念中要素及其关系的主要认识,以此为基础综述现有的经验地理统计模型、概率模型、复杂网络模型、以及灾害模拟这几类分析灾害链灾情累积放大机制模型与方法的特点,探讨其实际应用中的适用性与不足,以期对灾害链研究,乃至灾害链风险防范提供参考。

2 灾害链内涵与组成

灾害链是在 20 世纪 90 年代初随着灾害科学体

系建立而提出的概念(郭增建等, 1987; 史培军, 1991)。随着灾害科学研究的不断深入,以及近年来频发的巨灾灾害链案例,多学科的理论与实践从各自角度出发解释灾害链现象(表 1)。其中数学与物理学角度主要试图从更高一级抽象出灾害链过程的一般形式;工程上把灾害链看作是一种灾害的延续形式或者演变规律;中国传统文化中的灾害链意义则有着更深刻的哲学意义;地理学角度旨在综合人地关系来解释灾害链现象。尽管对灾害链概念存在多种理解,但它们的共性是提出了灾害链现象的两个基本特征:一是灾害链中多种灾害之间存在明确的引发关系;二是灾害链在时间与空间上存在连续扩展过程而造成灾情的累积放大。

灾害链是一个复杂灾害系统,由致灾因子链、孕灾环境和承灾体组成,灾情是由致灾因子危险性、孕灾环境不稳定性、承灾体暴露性以及脆弱性等特征在时间与空间上复杂的耦合作用形成的(史培军, 1996, 2005)。灾害链中孕灾环境往往会被先发灾种改变,例如地震对于土层结构的强烈扰动,使得滑坡灾害孕灾环境不稳定性提高(Xu et al, 2012)。面对灾害链中不同灾种的打击,承灾体的脆弱性、暴露性不是一种简单的线性叠加关系(Carpignano et al, 2009; Kappes et al, 2012),例如建筑物单纯遭受滑坡与遭受地震—滑坡灾害链,其脆弱性水平显著不同。由灾害间引发作用形成的致灾因子链常受到孕灾环境的约束,例如在平原地区的地震就不会引发滑坡、泥石流灾害。承灾体对致灾因

表 1 不同视角下灾害链的典型定义
Tab. 1 General definition of disaster chains

文献	概念	研究视角
郭增建等, 1987	灾害链是系列灾害相继发生的现象,包括因果、同源、互斥、偶排 4 种。	中国传统文化
李永善, 1988	灾害放大效应可分为:大系统的长周期放大过程、成灾时自然放大过程、成灾时社会放大过程。	非线性思维
史培军, 1991	灾害链是一种灾害发生而引起的一系列灾害发生的现象,可划分为串发性与并发性灾害链。	地理学
文传甲, 1994	灾害链是一种灾害启动另一种灾害的现象,或者前种灾害的受灾体变成下一级灾害的致灾因子。	系统结构
刘文方等, 2006	灾害链内各灾害之间相互渗透、相互作用、相互影响、相互之间以及与环境进行着物质、能量和信息 的交换,形成的复杂反馈作用的综合体系。	基于系统论的数 学视角
肖盛燮等, 2006	灾害链是以物质、能量与信息为载体反映和演化的规律,可用“链式关系”或“链式效应”来概括。	工程减灾
黄崇福, 2006	由一种灾害启动另一种或多种灾害的现象称为灾害链,多态灾害链是一种灾害在不同条件下可能 诱发不同灾害链的现象。	基于数学的风险 分析
姚清林, 2007	灾害链是物理、化学场平衡—失衡—平衡的过程产物,自然变异、演化过程中系统“扰动”效应的渐 次影响关系。灾害链的因果关系是场因果而非孤立的点因果。	物理学的场论
Delmonaco et al, 2006	连锁失效(Cascading failure)是指系统中部分失效引发其它相互关联部分的失效,应用于自然灾害 时,其意义是指特定灾害(Certain hazards)引发次生灾害(Secondary hazards)的高可能性。	多灾种风险分析
Carpignano et al, 2009	灾害链(Cascading hazards)是灾害事件(Hazardous event)间的激发(Trigger)作用形成的多米诺现象。	多灾种风险分析

子链有更为复杂的反馈作用,特定情况下承灾体也会转化为致灾因子本身,例如地震毁坏的建筑结构发生倒塌会成为二次灾害的致灾因子,从而导致电网事故、引发火灾等。因此,灾害链现象研究需要综合考虑灾害系统中孕灾环境、致灾因子、承灾体之间的复杂、非线性关系。灾害链过程伴随灾害能量的释放与传递,这个过程必然要依赖一定的物质载体,存在时间与空间上扩展的连续性。灾情的累积放大过程直接体现人—地相互作用系统中的综合的复杂负向关系,因此只有从地理学的视角来理解灾害链才能完整地解释其灾情累积放大机制。

综上所述,灾害链可定义为在特定空间尺度与时间范围内,受到孕灾环境约束的致灾因子引发一系列致灾因子链,使得承灾体可能受到多种形式的打击,形成灾情累积放大的灾害串发现象。灾害链的一般过程(图1)是:致灾因子链向不同的孕灾环境扩展(致灾因子1、2),或者处于相同的孕灾环境中(致灾因子2、3),受到打击的承灾体数量的增加(承灾体1、2),或遭受更多次打击(承灾体2),承灾体可能会促成次生致灾因子形成,灾情在此过程中逐级累加放大。灾害链是多种致灾因子、孕灾环境,承灾体在时间、空间上的人—地相互作用系统综合作用的结果,导致比单个灾种简单叠加更为严重的灾情。

灾害链概念易与致灾因子链的概念混淆。致灾因子链是指存在明确引发关系的一系列致灾因子,如暴雨往往引发洪水,地震往往引发滑坡、崩塌,火山喷发会带来火山灰、熔岩流等。致灾因子链仅是完整的灾害链概念中的一部分,而不等同于灾害链,因为它仅强调了致灾因子的维度,而忽略了灾害链是一个复杂灾害系统,包含了孕灾环境、致灾因子链、承灾体等多个要素在时空上综合作用

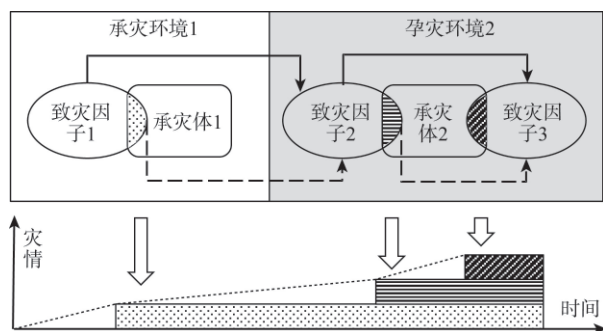


图1 灾害链概念的一般性框架

Fig. 1 General framework of disaster chains

的概念内涵。

3 灾害链灾情累积放大研究方法

灾害链作为一种典型的复杂灾害系统,对它的研究处于起步阶段。当前的研究方法借鉴了其他学科的理论与实践,主要包括了经验灾情地学统计模型、概率模型、复杂网络模型、灾害链模拟和多领域知识下的灾害概念模型等。

3.1 经验地学统计模型

经验地学统计模型的核心是从时间、空间上认识灾害链传播分异规律后,选取特征指标进行地学统计分析得到最终灾情。灾害链中先发灾害发生后,它的影响可能会扩展到不同的孕灾环境中,继而引发不同的次生灾害,然后次生灾害又可能会在时间、空间上扩展而形成灾害链(图2)(Shi et al, 2010)。灾情是孕灾环境不稳定性 E 、承灾体的脆弱性 V 、致灾因子危险性 H 的共同结果,灾害链总损失可用式(1)的概念模型来计算。

$$\begin{aligned} A_{loss} &= f(E_0, V_A, H_A + H_{AB} + H_{AC} + H_{AD}) \\ B_{loss} &= f(E_1, V_B, H_B + H_{AB}) \\ C_{loss} &= f(E_2, V_C, H_C + H_{AC}) \\ D_{loss} &= f(E_3, V_D, H_D + H_{AD}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: A_{loss} 、 B_{loss} 、 C_{loss} 、 D_{loss} 分别指先发灾害 A 和次生灾害 B 、 C 、 D 所引发的损失。 E_0 指 A 的影响范围, $E_0 = E_{1A} + E_{2A} + E_{3A}$ 。用 E 、 V 分别代表灾害链的孕灾环境与承灾体的脆弱性,即 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3$ 、 $V = V_A + V_B + V_C + V_D$, 则一条灾害链的总损失可以用式(2)来计算,其含义是把成灾区域分为多灾种与单灾种两部分区域,多灾种区域部分用多个灾种叠加方法来计量,而单灾种的损失评估方法则直接应用相应单灾种的评估方法。

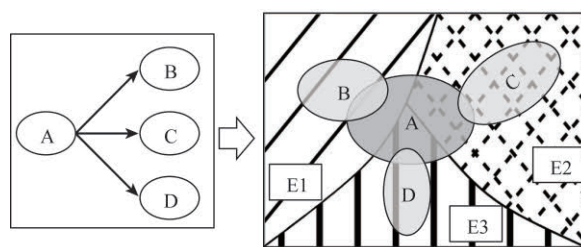


图2 灾害链影响区域与孕灾环境的空间关系

(Shi et al, 2010)

Fig. 2 Spatial relationships between disaster-chain affected areas and the environment(Shi et al, 2010)

$$LOSS = f(E, V, H_A + H_B + H_C + H_D + H_{AB} + H_{AC} + H_{AD}) \quad (2)$$

经验地学统计方法用于灾害链灾情统计时的优点为:一是能反映区域特征,选取的统计指标均是反映区域特征的最显著标志。二是灾害链要素和要素间相互关系意义明确,特征指标、统计方法、权重等直接反映了研究者对灾害链灾情累积放大成因的理解。三是可以开展快速灾害链损失评估。例如周洪建等(2014)在半干旱地区暴雨—山洪—泥石流灾害链损失评估中,根据半干旱地区强降雨引发山洪、滑坡和泥石流灾害分布的基本规律,结合实时降雨、流域范围、遥感数据、河流水系等信息得到不同程度下灾害损失范围,再利用人口数据、房屋数据综合得到甘肃岷县5.10特大强降雨、山洪泥石流灾害链的倒损房屋评估模型,实现了倒损房屋直接经济损失快速评估。

经验的地学统计模型基于已有的灾害链案例和专家经验,是综合理解灾害链机制的重要参考。但式(1)和(2)仅给出了理论计算的概念模型,其中各变量的参数化方法仍有待深入探讨。反映灾害链特征的多个指标需要较多的先验知识与专家经验,这也是一个难点。灾害链中各个灾种的影响范围、叠加区对承灾体的综合作用等信息在现阶段仍然难以获取。此外,承灾体脆弱性、孕灾环境不稳定性、致灾因子链危险性之间相互作用的函数形式主要是加权平均,因此尚不能充分解释灾害链灾情累积放大过程,需要进一步改进。

3.2 概率模型

灾害链过程涉及多种形式的灾害引发关系,但这种引发关系只是逻辑上的关联,在实际灾害链案例中并不表示一种灾害事件发生后,一定能引发次级灾害的发生。如地震过后,地表物质的结构强度降低使得滑坡灾害的可能性增大,但不一定会引发滑坡灾害。因此,概率模型适合用于描述灾害与次生灾害间引发关系的可能性。应用概率模型的一般模式是列出先发灾种可能会引起的各种次生灾害事件以及更下一级次生事件,往往用灾害事件树形式来表达,再计算先发灾种发生后各种次生事件发生的条件概率,条件概率计算方法的差异成为不同概率模型的主要区别。

构建灾害链事件树依赖于研究目的,一般性灾害链研究中要考虑到灾害发生后所有可能的次生事件情形,因此灾害事件树结构比较复杂。如地震可能会引起多种可能的次生事件(余世舟等, 2010;

Wang et al, 2013),如果研究中涉及到了社会经济因素,则可能的后果复杂性更高(Khan et al, 2001)。灾害事件树也常用于描述特定的灾害组合(Kappes et al, 2012),如地震引发滑坡(Keefer, 2002)、滑坡引发堰塞湖洪水(Perucca et al, 2009)等。

确定灾害链次生灾害事件发生的条件概率方法是概率模型的核心。在研究实践中,可应用多种理论与方法。例如,贝叶斯网络方法根据有限信息推演得到其他事件的概率信息,可用于信息不足的情况(董磊磊, 2009; 裘江南等, 2012; Wang et al, 2013)。地震—滑坡—堰塞湖—洪水灾害链中涉及较多过程,每个过程信息都可能不完备,可以应用贝叶斯网络模型来进行灾害链中事件的概率推理(图3)。神经网络、专家系统、数学概念模型、经验模型等方法也被尝试用于确定灾害链事件条件概率,

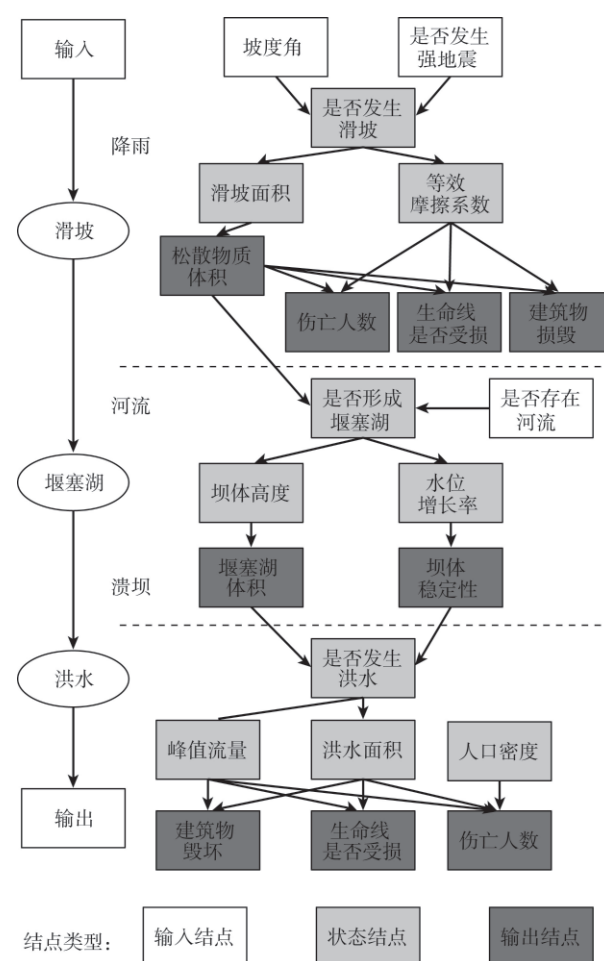


图3 地震—滑坡—堰塞湖—洪水灾害链贝叶斯网络模型
(改编自 Wang et al, 2013)

Fig. 3 Bayesian networks of earthquake-landslide-barrier lake-flood disaster chain (modified from Wang et al, 2013)

它们在刻画灾害链过程机制、进行反向推演、以及不确定性分析方面各有所长(Gitis et al, 1994; Badal et al, 2005; Chavoshi et al, 2008; Wang et al, 2010; 李藐等, 2010; Wang et al, 2013)。

利用概率模型刻画灾害链事件将灾害链中多个灾害看作由一定条件概率连接的事件结点,利用多种方法推理事件结点的条件概率,解决了信息量不足的困难,但事件树表达的并不是真实世界中发生的灾害链,它仅提供了所有可能事件组合的一个概览(Kappes, 2011)。当前灾害链研究中,条件概率主要集中于致灾因子引发关系的可能性上,并没有深入考虑灾害链灾情累积放大过程中的承灾体分布、孕灾环境约束,以及它们的空间、时间上综合作用等因素,因此其改进方向是在构建事件网络与计算条件概率时应纳入多种要素的限制,以便更精确地刻画灾害链事件间的关系。

3.3 复杂网络模型

复杂网络(Complex Network)是一种在社会科学、生命科学、信息科学等多领域中存在的具有十分复杂的拓扑结构特征的网络,其结构形式既不是完全规则,也不是完全随机的。现实中各类高复杂性系统,如互联网网络、神经网络和社会网络都与其有密切关系。复杂网络模型融合了图论、统计物理学、计算机网络、生态学、社会学以及经济学等不同领域的知识,研究内容主要集中于探讨网络的几何性质、形成机制、演化的统计规律,网络模型性质、结构稳定性、演化动力学机制等问题(Watts et al, 1998; Barabasi et al, 1999)。

典型复杂网络的特征是一个微小结点的扰动会触发整个系统或网络的连锁反应,从而导致系统产生崩溃的灾难性后果(Helbing et al, 2003; Weng et al, 2007)。当初始扰动发生后,复杂网络系统状态 x_i 随时间的变化可以表示为三项之和(式(3)):结点的自修复功能、结点失效的蔓延机制和结点的固有特征(即结点的内部随机噪声),复杂网络演化过程依赖于网络拓扑结构、结点参数等。

$$\frac{dx_i}{dt} = -\frac{x_i}{\tau(t)} + \theta(x_i) \left(\sum_{j \neq i} \frac{M_{ij} x_j (t - t_{ij})}{f(O_i)} e^{-\beta t_{ij}/\tau(t)} \right) + \xi_i(t) \quad (3)$$

式中: i, j 分别为复杂网络的结点标号; x_i 为结点 i 的状态; τ 为自修复因子; t 为时间因子; t_{ij} 是 i 结点与 j 结点之间的延迟时间因子; M_{ij} 为表示 i 结点连

结到 j 结点的相互关系强度值; $f(O_i)$ 为 i 结点的出度函数,出度值 O_i 用于表征 i 结点直接影响其他结点的程度; $\xi_i(t)$ 表示结点固有特征,即结点的内部噪声(翁文国, 2007)。

灾害链可看作是一个灾害复杂网络,灾害链中单个灾害事件可表示为复杂网络的结点,灾害间引发关系构成网络中的有向边,灾害损失可用网络结点的状态来表述,它同时存在不完全规则与不完全随机的特征,因此可直接应用复杂网络理论来研究灾害链灾情累积放大的动力学过程(Duenas-Orsorio et al, 2009; Li et al, 2014)。当前,复杂网络在诸如冰雪、暴雨、台风等灾害链中都有应用(陈长坤等, 2008, 2009, 2012; 朱伟等, 2011)。这种方法的一般步骤是:①构建复杂网络,通过案例或逻辑判断等方法列举先发灾害可能引发的次生灾害(王铎, 2010; 朱伟等, 2011; 陈长坤等, 2012; 葛月, 2012; 路光, 2013; Li et al, 2014)。例如台风灾害链事件可概括为图4中的一般性复杂网络形式,研究范围与尺度较大时,复杂网络系统中结点数量更多,结点连接形式更为复杂(Helbing, 2013)。②计算灾害链复杂网络演化过程,通过设定灾害系统复杂网络的初

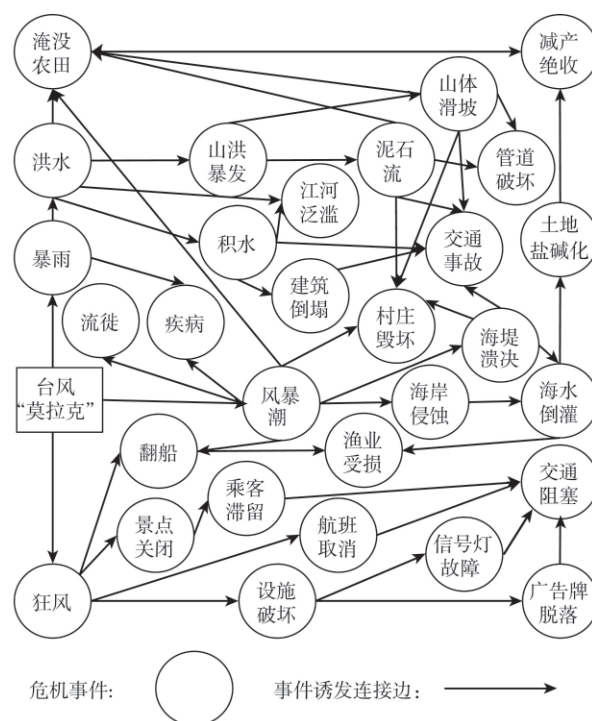


图4 “莫拉克”台风灾害链构成的复杂网络(陈长坤等, 2012)
Fig. 4 The complex network of disaster chains of typhoon "Morakot" (Chen et al, 2012)

始与边界条件,确定复杂网络基本动力学演化过程模型(式(3))的具体形式,如Li等(2014)构建因果回路的复杂网络来表示某种灾害引发城市停电灾害链的过程,计算其动态演化过程时共考虑了5项因素:引发结点的影响、系统外影响的综合作用、自恢复效应、修复行为、内部噪声(式(4)):

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = \sum \varphi M_{ji} x_j(t - tp_{ji}) [1 - (1 - P_{ji})^{V_{ji}}] + M_{oi} x_o(t - tp_{oi}) [1 - (1 - P_{oi})^{V_{oi}}] - \frac{x_i}{\tau_i} - \Phi_i Y_i(t) + \zeta_i(t) \quad (4)$$

式中: i, j, o 分别为构成复杂网络的结点 i, j 和网络的外部影响因素; t, tp_{ji}, tp_{oi} 分别为时间、结点 i 与 j 间延迟系数和外部因素与结点 i 间延迟系数; M_{ji}, M_{oi} 分别为结点 i 与 j 间和外部因素与结点 i 间的影响强度; p_{ji}, p_{oi} 分别为结点 i 与 j 间和外部因素与结点 i 间有直接连接的条件概率; V_{ji} 为灾害传播速度; $\Phi_i, Y_i(t), \tau_i, \zeta_i(t)$ 分别为结点 i 的最大恢复能力、恢复投入比例、自恢复系数和内部噪声。

复杂网络模型应用于灾害链研究时,可用来描述灾害链事件结构过程和动态演化过程,能通过复杂网络的特征而得到灾害链中事件结构特征。如突发事件灾害链复杂网络具有典型的小世界特性,其平均路径长度为3.2,也即大量结点间连接很少,但少数结点与多数结点连接的强度很大,提示我们断链减灾要关注其中的关键灾害事件(Lubos et al, 2006; 王建伟等, 2008)。当前研究中的不足之处:研究集中于灾害链复杂网络结点的演化过程,对灾害链中事件与关系抽象程度较高,而无法表达灾害链要素的时空特征,因此不能完整解释灾害链复杂性。已有部分研究试图对此加以改进,如加入地理环境信息来约束网络的演化,构建更加宏观的超网模型等(王建伟等, 2008; 倪子建等, 2013)。因此,复杂网络应用于灾害链研究时,综合考虑灾害链时空要素带来的复杂性将会使模型更加接近实际情况。

3.4 灾害系统模拟

灾害系统模拟是指设计一个实际或理论的物理系统模型,运用计算机模拟技术来分析灾害的动态演化过程。现有的灾害系统模拟技术主要有元胞自动机、多智能体系统、离散事件系统等(刘健利等, 2009)。多智能体系统适用于研究人类系统在灾害发生时的认识与行为过程,离散事件系统一般应用于应急响应中的资源配置与协调,而元胞自动机模型适合模拟致灾因子的可能性与动态演变,是

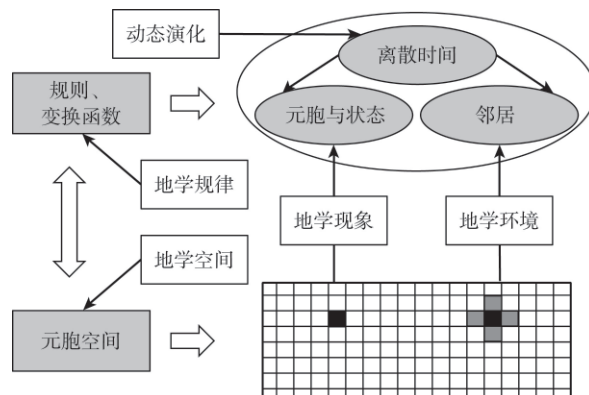


图5 地学应用的CA概念模型(陈建平等, 2004)

Fig. 5 Conceptual model of cellular automata (CA) applied to geoscience (Chen et al, 2004)

现阶段应用较广的灾害系统模拟方法。

元胞自动机(Cellular Automata)模型是一种时间、空间、状态都离散,空间相互作用与时间的因果关系都为局部的网格动力学模型(Wolfram, 1984)。它遵循一种“自下而上”的设计思想,认为系统可划分为不可分割的最小单元(元胞),且元胞状态仅受到周围邻近元胞的影响,局部的元胞间相互作用行为产生了全局的复杂系统状态(图5)。元胞自动机模型的研究和应用提供了一种从地理系统的微观出发,将自然与人文相统一的地理系统模拟的新视角与新途径(周成虎等, 2009)。

灾害链存在空间与时间上的扩展过程,可以看作是一个多灾种系统通过局部的时间—空间相互作用产生损失,由累加扩展作用造成灾情放大的地理过程。元胞自动机模型一般由4个基本要素构成:元胞、元胞状态、邻域与元胞状态转换规则。应用于灾害链过程模拟时分别与灾情统计单元、灾情、灾情产生的周边环境要素、灾情传播机制相对应,因此元胞自动机模型可被用来模拟灾害链的动态过程。

现阶段,元胞自动机模型应用于灾害过程模拟时一般集中于火灾、洪水等典型的空间蔓延型灾害(黎夏等, 2007; 刘健利等, 2009; Li et al, 2013),而应用于灾害链过程模拟的研究还比较少。以堰塞湖溃坝引发洪水为例来说明其实际应用过程(图6),即用规则的四方型网格划分洪水泛滥区作为元胞,一个元胞只与距离最近的4个元胞发生联系(Neumann型),转换规则定义为:元胞 C_{ij} 中的 M, N 值反

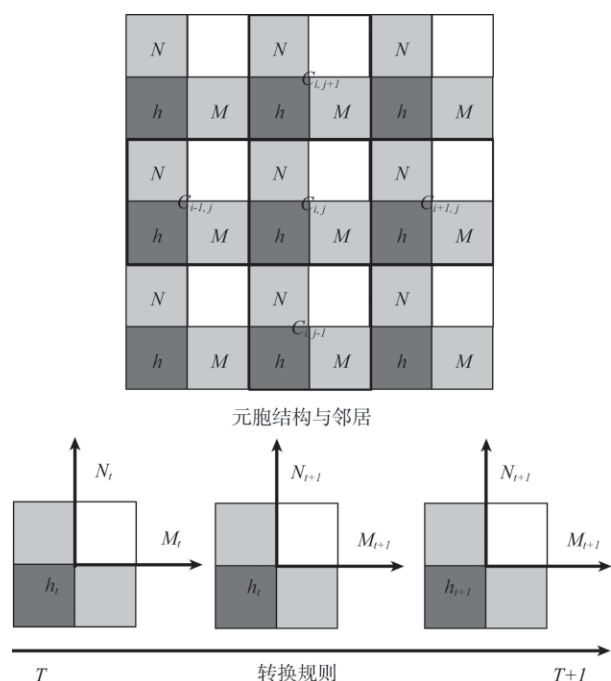


图6 溃堤洪水灾害链元胞自动机模型(改自 Li, 2013)

Fig. 6 Cellular automata (CA) model of barrier lake-flood disaster chain (modified from Li, 2013)

映了与元胞 $C_{i+1,j}$ 、 $C_{i,j+1}$ 之间的单向流量,初始值为 0 表示没有溃坝;在与邻居元胞 $C_{i-1,j}$ 、 $C_{i,j-1}$ 的迭代中,元胞 $C_{i,j}$ 的其他两个方向的单向流量就被更新。从时刻 T 到 $T+1$ 时, M_{ij}^{t+1} 和 N_{ij}^{t+1} 用 T 时刻自身与领域的状态量 h^t 计算得到,这里元胞与领域的相互作用是基于物理意义的圣维南方程组,而后 h_{ij}^t 又由 M_{ij}^{t+1} 和 N_{ij}^{t+1} 值迭代更新。随时间 T 的演化,将可以得到各个元胞在二维平面上的一个洪水变量随时间的状态(Li et al, 2013)。更符合实际的元胞模型与转换规则将极大提高模型的精度。如六边形的元胞模型在岩熔流模拟中比方形元胞更加接近实际现象,因为它能具有更多流向(Crisci et al, 2004)。森林火灾的元胞自动机模拟中,转换规则可以设置按风向给定动态权重值,从而有效提高林火扩散的模拟精度(Karafyllidis, 2004; 黎夏等, 2007)。元胞间转换规则的获取方法是元胞自动机模型的核心,一般有基于多准则判断、主成分分析等,近年来智能获取方法也被尝试引入,如遗传算法、支持向量机算法等(Li et al, 2000; 黎夏等, 2007)。

应用灾害系统过程模拟方法研究灾害链是从传统的“静态—描述—解释”向“动态—过程—启示”的研究思路转变,该方法最大的优点是可刻画

灾情累积演化过程的中间状态,成为理解灾害链灾情放大机制的一种很有前景的方法。现阶段较为成熟的是元胞自动机模型,但应用元胞自动机模型进行灾害模拟还主要集中于单个灾种,在灾害链传播扩散灾情的过程模拟中较少。利用元胞自动机模拟灾害链过程的改进方向为:多个差异较大灾种中元胞模型构建,灾害链元胞状态转换规则获取等。其他模拟方法,如多智能体、离散事件系统有待进一步研究,可与元胞自动机模型结合更加完整地描述灾害链(黎夏等, 2007)。

3.5 多领域知识下的灾害链概念模型

当前,学者尝试应用多领域的理论与方法来描述灾害链。研究较多的有应用知识元理论来刻画突发事件链共性,其核心思想是:现实中存在多种复杂情境,其中的突发事件种类繁多,在成因、性质、演化、后果等方面存在巨大差异,因此对它的统一描述与分析极为困难。利用已有知识来挖掘多种突发事件的共性结构特征、共性演化模型,并用科学符号来统一描述对应对突发事件有重要意义,因此有学者尝试引入知识元理论来解决这一难题。知识元理论来自情报学领域,是指完备表达知识的最小单位,是对复杂知识抽象化、形式化,为了认知事物本质规律而产生的,它与特定领域知识无关,因此可用来描述突发事件的共性属性特征(杨德宽等, 2012; 仲秋雁等, 2012)。基于知识元理论方法的核心在于抽象出灾害链中不同灾害事件的共性。以 2008 年中国南方雨雪冰冻灾害为例,于海峰(2013)通过设定事件知识元(如雨雪冰冻事件、公路交通瘫痪事件、电力中断事件)与灾害知识元(如大气、公路、物流中心),研究这些知识元间属性交集(如平均气温、相对湿度、平均风速等)并建立联系,形成分层的系统结构,最后通过风险熵的计算,来推断整个巨灾的风险。钞柯(2012)通过设定元事件为滑坡,客观事物系统包括斜坡、建筑物、高压输电线、路面,经过推演可以得到滑坡连锁反应的一般性过程。

灾害链灾情累积放大过程利用新算法而得到更多认识,如胡明生等(2012a, 2012b)利用历史灾害资料进行区域灾害链长时间序列的信息挖掘时,采用改进的萤火虫群、蚁群优化等算法来确定灾害关联向量,解决了灾害链信息挖掘效率的问题。

灾害链灾情累积放大过程是一个涉及到多个对象、多个过程的复杂现象,多领域知识的交叉融

合为灾害链灾情演化过程建模提供了有价值的参考,但有待更进一步深入研究。

4 重要灾害链灾情累积放大效应研究

常见的灾害链一般有4种:地震灾害链、台风灾害链、寒潮灾害链以及干旱灾害链(史培军, 2002),前两种因近年来巨灾案例频发而受到了较多关注,对其灾情累积放大过程也开展了较多的研究。

4.1 地震灾害链——以汶川地震为例

2008年5月12日,中国汶川发生里氏8.0级地震,引发一系列的崩塌、滑坡、堰塞湖等次生灾害,截至2008年8月25日,共造成69226人死亡,17923人失踪,374643人受伤的严重灾情(国家汶川地震灾后重建规划组, 2008)。汶川地震灾害链现象典型,一系列的崩塌、滑坡、阻断交通、堰塞湖等,对周边人民群众生命财产安全和生态环境造成极大影响,灾情累积放大效应显著(崔云等, 2012)。

汶川地震灾害链引发了一系列的灾害链研究热潮,对其灾情累积放大机制的研究也成为重要内容之一。基于具体案例的地学统计分析,从局部尺度还原了汶川地震灾害链发生时灾害损失在具体时空上的叠加过程。例如,Xu等应用GPS、激光测距仪等测绘灾害区的局部地形,结合遥感、地形图分析还原了汶川地震引发火石沟滑坡、泥石流灾害链的过程,得出地震前后该区地形变化,研究用泥石流土石方量表征灾害能量,表明各级灾害能量沿灾害链衰减,且衰减率约为1/6(Xu et al, 2012)。汶川地震后灾害链损失评估中应用了综合灾情指数,由因灾死亡人口和失踪人口、房屋倒塌、转移安置人口、平均地震烈度以及地质灾害危险度通过加权平均得到权重,通过各方会商最终确定为:平均地震烈度0.3、死亡与失踪人数、万人死亡和失踪权重各为0.15、倒塌房屋和万人倒塌房屋率权重各为0.1、地质灾害危险度0.1、万人转移安置率为0.1,最终得到的结果与经民政部门统计的结果能较好的印证(史培军, 2009)。

基于概率理论的汶川地震灾害链研究主要集中于致灾因子的危险性层面(Xu et al, 2012),而对于灾情,因相互作用复杂,研究还不够深入。而将复杂网络、元胞自动机理论应用于汶川地震灾害链灾情过程中的研究,因其方法还处于初步研究阶段,因此开展较少,灾害链模拟仅针对特定的场景

与对象,如地震中压埋人员等(肖东升, 2004)。

4.2 台风灾害链

台风灾害致灾因子为强风与暴雨,同时台风具有移动性的特征使得台风灾害链的复杂性大大增强。当前针对台风灾害链灾情累积放大作用研究主要从两个方向展开:一是研究区域内台风灾害链灾情累积的一般性机制。如潘安定等(2002)、居丽丽等(2012)分别构建了广东、上海的台风灾害链具体形式,主要是基于经验以及历史案例的定性分析;王静爱等(2012, 2013)基于报刊数据库,统计分析了中国东南沿海的台风灾害链时空分异规律,并以广东为例计算台风灾害链风险,计算仍是通过基于经验的地学统计方法实现的;叶金玉等(2014)研究了福建台风灾害链的空间分布特征。二是针对具体场次台风形成的灾害链,研究其灾情累积具体过程。如近年的“龙王”、“莫拉克”等台风灾害链(陈香等, 2007; 邓睿等, 2011),仍以经验的地学统计分析为主。此外,台风灾害链的建立与初步分析也用到了贝叶斯网络的方法,来求取台风突发事件的条件概率等(董磊磊, 2009; 裘江南等, 2012)。台风灾害链的复杂网络特征显著,因此复杂网络的理论与方法被应用于台风灾害链研究,建立了能模拟瞬时性影响和持续性影响的灾害演化行为的动力学模型,实现对突发灾害事件及其相应次生事件扩散演化状态的数字模拟(李智, 2010; 陈长坤等, 2012; 葛月, 2012)。其主要的改进方向为动力学模型中应当考虑台风灾害链系统中要素在时空上的综合作用。

5 结论与展望

5.1 结论

灾害链研究是解决灾害系统复杂性的重要途径,随着研究深入,新的理论与方法不断引入,必将促进对灾害链以及复杂灾害系统的理解与认识,为防范灾害链风险工作提供指导与依据。

(1) 灾害链是灾害系统复杂性的重要形式之一,灾害链中多种灾害在时间上前后相继,空间上连续扩展,具有时空属性的高度复杂性。只有从地理学视角出发,综合孕灾环境、致灾因子链、承灾体以及其相互联系,才能完整而合理地解释灾害链中灾情累积放大的机制。

(2) 灾害链已成为当前灾害研究中的热点问题

题。国外研究的主要思路是分析一定区域中发生的多灾种(Multi-Hazard)之间的相互关联,而没有单独考虑到灾害链存在的时间、空间扩展的特征(Kappes et al, 2012)。研究方法主要是进行多灾种要素的空间叠加分析,或者以一种灾害损失计算模型的输出作为另一种的输入而对灾害关联性进行研究。国内的研究思路则是基于区域灾害系统论的思想,考虑其灾情形成要素的综合作用,研究方法则需要考虑灾害链系统的各要素及其时空关联性(史培军, 2002; 张卫星等, 2013)。

研究灾情累积放大过程的方法中,引进了大量其他学科知识,从多角度来认识灾害系统复杂性,这些方法各有特点:①在已发生的灾害链案例基础上,经验地理统计类方法考虑到了灾害链的空间、时间要素,但仅能得到最终的灾情,而对灾情放大过程机制则刻画不足;②基于概率、复杂网络的方法,抽象出了一般的灾害链演化规律与特征,但对于灾害链系统的时空特性考虑不足,无法完全解释灾害链复杂性;③以元胞自动机为主的灾害链过程模拟,从理论上分析可以结合诸多要素进入灾害链发生的地理时空内,因此在灾害链灾情演化应用中很有前景。

5.2 展望

虽然国内外的灾害链研究刚刚兴起,并没有形成成熟的理论与方法体系,现有研究中的思路与方法存在诸多不同,但多学科知识交叉为灾害链灾情累积放大效应研究提供了新思路与方法,今后可考虑在以下方面进行改进:

(1) 灾害链研究的共性与差异。当前研究的首要问题是对于灾害链概念的理解多样,造成研究内容常常针对对灾害链中致灾因子链开展,甚至把并不存在引发关系的灾害关联性、单个灾种可能造成的灾情传播过程等也误认为是灾害链过程。因此需要从地理学综合性的角度出发,来理解灾害链系统的复杂性,同时也应顾及不同致灾因子引发的灾害链的特殊性。例如,台风灾害链在空间上是移动的,与台风路径紧密相关;而地震灾害链则相对较为固定,与震区的孕灾环境有关。

(2) 综合考虑灾害链与其他形式的灾害关联性之间关系。灾害链作为复杂灾害关联性的一种,不能代表所有的灾害关联性,如灾害遭遇、多灾种的群聚群发等,它们共同决定了一个区域中的灾情。在实际中灾害链可能与其他灾害在空间与时间上

形成关联,而灾害链系统自身也会存在非灾害链的灾害叠加问题,如台风灾害最终落脚于“风”和“水”对承灾体的影响上,这两者的叠加不具有引发关系,但也不能看作是两种灾害的简单叠加。因此,灾害链分析与模拟过程中,需要区分与综合这种效应的影响。

(3) 灾害链过程研究中综合考虑灾害链的时间、空间要素。灾害链研究思路需要从“静态—描述—解释”向“动态—模拟—启示”的方向发展,研究方法已经不仅仅局限于进行简单的案例分析与统计。灾害链过程演化已经成为理解灾害链灾情放大效应的关键。虽然当前研究中在现有基于概率理论、复杂网络等方法中已开始尝试刻画灾害链过程,但对灾害链过程事件关系的抽象简化程度较高,很少考虑灾害链因时间、空间因素造成的复杂性,因而不能完整解释灾情累积放大机制。灾害链过程研究中加入时间、空间要素将成为必然,元胞自动机因其可扩展性与灵活性而成为一种很有前景的研究方法。

参考文献(Reference)

- 钞柯. 2012. 基于知识元的突发事件连锁反应模型研究[D]. 大连: 大连理工大学. [Chao K. 2012. Research on emergency chain reaction model based on knowledge unit[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 陈长坤, 纪道溪. 2012. 基于复杂网络的台风灾害演化系统风险分析与控制研究. 灾害学, 27(1): 1-4. [Chen C K, Ji D X. 2012. Risk analysis and control for the evolution disaster system of typhoon based on complex network. Journal of Catastrophology, 27(1): 1-4.]
- 陈长坤, 李智, 孙云凤. 2008. 基于复杂网络的灾害信息传播特征研究. 灾害学, 23(4): 126-129. [Chen C K, Li Z, Sun Y F. 2008. Study on characteristics of disaster information transmission based on complex networks. Journal of Catastrophology, 23(4): 126-129.]
- 陈长坤, 孙云凤, 李智. 2009. 冰雪灾害危机事件演化及衍生链特征分析. 灾害学, 24(1): 18-21. [Chen C K, Sun Y F, Li Z. 2009. Characteristic analysis of evolution and derivation chain of risk events caused by snow and ice disaster. Journal of Catastrophology, 24(1): 18-21.]
- 陈建平, 丁火平, 王功文, 等. 2004. 基于GIS和元胞自动机的荒漠化演化预测模型. 遥感学报, 8(3): 254-260. [Chen J P, Din H P, Wang G W, et al. 2004. Desertification evolution modeling through the integration of GIS and cellular automata. Journal of Remote Sensing, 8(3): 254-260.]
- 陈香, 陈静, 王静爱. 2007. 福建台风灾害链分析: 以2005年

- "龙王"台风为例. 北京师范大学学报: 自然科学版, 43(2): 203-208. [Chen X, Chen J, Wang J A. 2007. Analysis of typhoon disaster chain in Fujian: a case study of typhoon Longwang in 2005. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 43(2): 203-208.]
- 崔云, 孔纪名, 吴文平. 2012. 汶川地震次生山地灾害链成灾特点与防治对策. 自然灾害学报, 21(1): 109-116. [Cui Y, Kong J M, Wu W P. 2012. Cause characteristics and prevention/control strategies of the secondary mountain disaster chain of the Wenchuan Earthquake. Journal of Natural Disaster, 21(1): 109-116.]
- 邓睿, 黄敬峰. 2011. "莫拉克"台风引起的滑坡泥石流灾害 HJ-1 图像遥感监测研究. 国土资源遥感, (1): 106-109. [Deng R, Huang J F. 2011. The monitoring of landslide and debris flow caused by typhoon Morakot based on HJ-1 images. Remote Sensing for Land & Resources, (1): 106-109.]
- 董磊磊. 2009. 基于贝叶斯网络的突发事件链建模研究[D]. 大连: 大连理工大学. [Dong L L. 2009. Modeling emergency events chain based on Bayesian Networks[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 葛月. 2012. 突发公共事件台风的衍生网络模型研究[D]. 大连: 大连理工大学. [Ge Y. 2012. Research of the derived network model about the public emergency of typhoon [D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 郭增建, 秦保燕. 1987. 灾害物理学简论. 灾害学, (2): 25-33. [Guo Z J, Qin B Y. 1987. Brief discussion on disaster physics. Journal of Catastrophology, (2): 25-33.]
- 国家汶川地震灾后重建规划组. 2008. 国家汶川地震灾后恢复重建总体规划 [DB/OL]. 2012-09-23[2014-11-07]. www.gov.cn/wcdzzhhfcjghzqyj-g.pdf [State Planning Group of Post-Wenchuan Earthquake Restoration and Reconstruction. 2008. The state overall planning for Post-Wenchuan Earthquake restoration and reconstruction[DB/OL]. 2012-09-23[2014-11-07]. www.gov.cn/wcdzzhhfcjghzqyjg.pdf]
- 胡明生, 贾志娟, 吉晓宇, 等. 2012a. 基于改进萤火虫群的区域灾害链挖掘方法. 计算机应用与软件, 29(11): 29-31, 86. [Hu M S, Jia Z J, Ji X Y, et al. 2012a. Regional disaster chain mining approach based on improved glowworm swarm optimization. Computer Applications and Software, 29(11): 29-31, 86.]
- 胡明生, 贾志娟, 刘思, 等. 2012b. 基于蚁群优化的历史灾害关联分析方法. 计算机应用与软件, 29(10): 62-64. [Hu M S, Jia Z J, Liu S, et al. 2012b. Approach for historical disaster correlation analysis based on ant colony optimization. Computer Applications and Software, 29(10): 62-64.]
- 黄崇福. 2006. 综合风险管理的地位、框架设计和多态灾害链风险分析研究. 应用基础与工程科学学报, 14(S): 29-37. [Huang C F. 2006. Role of integrated risk management, framework design and study on risk analysis of polymorphic disaster chain. Journal of Basic Science and Engineering, 14(S): 29-37.]
- 居丽丽, 穆海振. 2012. 上海台风、大雾和高温灾害链的建立和分析. 第十四届中国科协年会第14分会场: 极端天气事件与公共气象服务发展论坛. 石家庄: 2012-09-08. [Ju L L, Mu H Z. 2012. Establishment and analysis on typhoon, heavy fog and high temperature disaster chain in Shanghai. The 14th annual of china association for science and technology: the extreme weather events and public meteorological services development forum. Shijiazhuang, China: September 8th-10th, 2012.]
- 黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 等. 2007. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社. [Li X, Ye J A, Liu X P, et al. 2007. Dili moni xitong: yuanbao zidongji. Beijing, China: Science Press.]
- 李藐, 陈建国, 陈涛, 等. 2010. 突发事件的事件链概率模型. 清华大学学报: 自然科学版, 50(8): 1173-1177. [Li M, Chen J G, Chen T, et al. 2010. Probability for disaster chains in emergencies. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 50(8): 1173-1177.]
- 李永善. 1988. 灾害的放大过程. 灾害学, (2): 18-24. [Li Y S. 1988. Amplification process of disaster. Journal of Catastrophology, (2): 18-24.]
- 李智. 2010. 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. [Li Z. 2010. Jiyu fuza wangluo de zaihai shijian yanhua yu kongzhi moxing yanjiu[D]. Changsha, China: Central South University.]
- 刘健利, 温家洪, 尹占娥, 等. 2009. 灾害系统模拟技术和方法述评. 灾害学, 24(1): 106-111. [Liu J L, Wen J H, Yin Z E, et al. 2009. Simulation technologies and methods for disaster system: a review. Journal of Catastrophology, 24(1): 106-111.]
- 刘文方, 肖盛燮, 隋严春, 等. 2006. 自然灾害链及其断链减灾模式分析. 岩石力学与工程学报, 25(S1): 2675-2681. [Liu W F, Xiao S X, Sui Y C, et al. 2006. Analysis of natural disaster chain and chain-cutting disaster mitigation mode. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(S1): 2675-2681.]
- 路光. 2013. 基于分层认知模型的突发事件衍生网络研究 [D]. 大连: 大连理工大学. [Lu G. 2013. Research on emergency derivative network based on layered cognitive model[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 倪子建, 荣莉莉. 2013. 面向灾害关联的灾害超网模型. 系统

- 管理学报, 22(3): 407-414. [Ni Z J, Rong L L. 2013. Supernetwork of the emergency for association of disasters. *Journal of Systems & Management*, 22(3): 407-414.]
- 潘安定, 唐晓春, 刘会平. 2002. 广东沿海台风灾害链现象与防治途径的设想. *广州大学学报: 自然科学版*, 1(3): 55-61. [Pan A D, Tang X C, Liu H P. 2002. Preliminary research into the typhoon disaster chain in Guangdong coastal area. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*, 1(3): 55-61.]
- 裘江南, 刘丽丽, 董磊磊. 2012. 基于贝叶斯网络的突发事件链建模方法与应用. *系统工程学报*, 27(6): 739-750. [Qiu J N, Liu L L, Dong L L. 2012. Modeling method and application of emergent event chain based on Bayesian network. *Journal of Systems Engineering*, 27(6): 739-750.]
- 史培军. 1991. 灾害研究的理论与实践. *南京大学学报*, (专刊): 37-42. [Shi P J. 1991. Theory and practice of disaster system research. *Journal of Nanjing University*, (special edition): 37-42.]
- 史培军. 1996. 再论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 5(4): 8-19. [Shi P J. 1996. Theory and practice of disaster study. *Journal of Natural Disasters*, 5(4): 8-19.]
- 史培军. 2002. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 11(3): 1-9. [Shi P J. 2002. Theory on disaster science and disaster dynamics. *Journal of Natural Disasters*, 11(3): 1-9.]
- 史培军. 2005. 四论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 14(6): 1-7. [Shi P J. 2005. Theory and practice of disaster system research in a fourth time. *Journal of Natural Disasters*, 14(6): 1-7.]
- 史培军. 2008. 从南方冰雪灾害成因看巨灾防范对策. *中国减灾*, 2008(2): 12-15. [Shi P J. 2008. Cong nanfang bingxue zaihai chengyin kan juzai fangfan duice. *Disaster Reduction in China*, 2008(2): 12-15.]
- 史培军. 2009. 五论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 18(5): 1-9. [Shi P J. 2009. Theory and practice of disaster system research in a fifth time. *Journal of Natural Disasters*, 18(5): 1-9.]
- 王铎. 2010. 基于关联度的突发事件网络模型研究[D]. 大连: 大连理工大学. [Wang D. 2010. Network model of emergency events based on correlation[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 王健伟, 荣莉莉. 2008. 突发事件的连锁反应网络模型研究. *计算机应用研究*, 25(11): 3288-3291. [Wang J W, Rong L L. 2008. Research on chain-reacting network model of emergency events. *Application Research of Computers*, 25(11): 3288-3291.]
- 王静爱, 雷永登, 周洪建, 等. 2012. 中国东南沿海台风灾害链区域规律与适应对策研究. *北京师范大学学报: 社会科学版*, (2): 130-138. [Wang J A, Lei Y D, Zhou H J, et al. 2012. Regional features and adaptation countermeasures of typhoon disaster chains in southeast coastal region of China. *Journal of Beijing Normal University: Social Science*, (2): 130-138.]
- 王静爱, 周洪建, 袁艺, 等. 2013. 区域灾害系统与台风灾害链风险防范模式: 以广东为例. 北京: 中国环境出版社. [Wang J A, Zhou H J, Yuan Y, et al. 2013. Quyu zaihai xitong yu taifeng zaihai lian fengxian fangfan mosh: yi Guangdong weili. Beijing, China: China Environment Press.]
- 文传甲. 1994. 论大气灾害链. *灾害学*, 9(3): 1-6. [Wen C J. 1994. On atmosphere disaster chain. *Journal of Catastrophology*, 9(3): 1-6.]
- 翁文国, 倪顺江, 申世飞, 等. 2007. 复杂网络上灾害蔓延动力学研究. *物理学报*, 56(4): 1938-1943. [Weng W G, Ni S J, Shen S F, et al. 2007. Dynamics of disaster spreading in complex networks. *Acta Physica Sinica*, 56(4): 1938-1943.]
- 肖东升. 2009. 基于GIS和CA的地震灾害压埋人员情景分析与评估理论[D]. 成都: 西南交通大学. [Xiao D S. 2009. Study on scenario analysis and evaluating theory of seismic buried personnel based on GIS and CA[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University.]
- 肖盛燮, 冯玉涛, 王肇慧, 等. 2006. 灾变链式阶段的演化形态特征. *岩石力学与工程学报*, 25(S1): 2629-2633. [Xiao S X, Feng Y T, Wang Z H, et al. 2006. Shape characteristics of evolvement chain-styled phases of disasters. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(S1): 2629-2633.]
- 杨德宽, 王雪华, 裘江南, 等. 2012. 基于知识元网络的突发事件模型组合调用. *系统工程*, 30(9): 87-93. [Yang D K, Wang X H, Qiu J N, et al. 2012. Emergency model integrate based on knowledge element net. *System Engineering*, 30(9): 87-93.]
- 姚清林. 2007. 自然灾害链的场效机理与区链观. *气象与减灾研究*, 30(3): 31-36, 75. [Yao Q L. 2007. Field effect and regional conversion as the mechanism of natural hazard chains. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 30(3): 97-93.]
- 叶金玉, 林广发, 张明锋. 2014. 福建省台风灾害链空间特征分析. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 30(2): 99-106. [Ye J Y, Lin G F, Zhang M F. 2014. Spatial characteristics of typhoon disaster chains in Fujian Province. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 30(2): 99-106.]
- 于海峰. 2013. 基于知识元的突发事件系统结构模型及演化

- 研究[D]. 大连理工大学. [Yu H F. 2013. Research on structure model and evolution of emergency system based on knowledge element[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 余世舟, 张令心, 赵振东, 等. 2010. 地震灾害链概率分析及断链减灾方法. 土木工程学报, 43(S): 479-483. [Yu S Z, Zhang L X, Zhao Z D, et al. 2010. Probability analysis of earthquake disaster chain and chain-cutting disaster mitigation method. China Civil Engineering Journal, 43(S): 479-483.]
- 张卫星, 周洪建. 2013. 灾害链风险评估的概念模型: 以汶川5.12特大地震为例. 地理科学进展, 32(1): 130-138. [Zhang W X, Zhou H J. 2013. Conceptual model of disaster chain risk assessment: taking Wenchuan Earthquake on 12 May 2008 as a case. Progress in Geography, 32(1): 130-138.]
- 仲秋雁, 郭艳敏, 王宁, 等. 2012. 基于知识元的非常规突发事件情景模型研究. 情报科学, 30(1): 115-120. [Zhong Q Y, Guo Y M, Wang N, et al. 2012. Research on unconventional emergency scenario model based on knowledge element. Information Science, 30(1): 115-120.]
- 周成虎, 欧阳, 马廷, 等. 2009. 地理系统模拟的CA模型理论探讨. 地理科学进展, 28(6): 833-838. [Zhou C H, Ou Y, Ma T, et al. 2009. Theoretical perspectives of CA-based geographical system modeling. Progress in Geography, 28(6): 833-838.]
- 周洪建, 王曦, 袁艺, 等. 2014. 半干旱区极端强降雨灾害链损失快速评估方法: 以甘肃岷县“5.10”特大山洪泥石流灾害为例. 干旱区研究, 31(3): 440-445. [Zhou H J, Wang X, Yuan Y, et al. 2014. Rapid-assessing methods of loss in extremely heavy rainfall disaster chain in semiarid region. Arid Zone Research, 31(3): 440-445.]
- 朱伟, 陈长坤, 纪道溪, 等. 2011. 我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析. 灾害学, 26(3): 88-91. [Zhu W, Chen C K, Ji D X, et al. 2011. Analysis on the risk and evolution process of rainstorm disaster in cities of North China. Journal of Catastrophology, 26(3): 88-91.]
- Anonymous. 2011. Chain reaction. Nature Geoscience, 4(5): 269-269.
- Badal J, Vazquez-Prada M, Gonzalez A. 2005. Preliminary quantitative assessment of earthquake casualties and damages. Natural Hazards, 34(3): 353-374.
- Barabasi A L, Albert R. 1999. Emergence of scaling in random networks. Science, 286(5439): 509-512.
- Buesseler K O, Jayne S R, Fisher N S, et al. 2012. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(16): 5984-5988.
- Carpignano A, Golia E, Di Mauro C, et al. 2009. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application. Journal of Risk Research, 12(3-4): 513-534.
- Chavoshi S H, Delavar M R, Soleimani M, et al. 2008. Toward developing an expert GIS for damage evaluation after an earthquake (case study: Tehran). Proceedings of the 5th International ISCRAM conference, Washington, WA: May 5th.
- Crisci G M, Rongo R, Di Gregorio S, et al. 2004. The simulation model SCIARA: the 1991 and 2001 lava flows at Mount Etna. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132(2-3): 253-267.
- Delmonaco G, Margottini C, Spizzichino D. 2006. ARMONIA methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps[DB/OL]. 2010-07-19 [2014-11-07]. http://forum.eionet.europa.eu/eionet-air-climate/library/public/2010_citiesproject/interchange/armonia_project/armonia_project_5/download/1/ARMONIA_PROJECT_Deliverable%203.1.1.pdf
- Duenas-Orsorio L, Vemuru S M. 2009. Cascading failures in complex infrastructure systems. Structural Safety, 31(2): 157-167.
- FEMA. 1995. National mitigation strategy: partnerships for building safer communities[DB/OL]. 1995-12-06[2014-11-07]. http://hazardmitigation.calema.ca.gov/docs/1995_National_Mitigation_Strategy_web.pdf
- Gitis V G, Petrova E N, Pirogov S A. 1994. Catastrophe chains: hazard assessment. Natural Hazards, 10(1-2): 117-121.
- Helbing D. 2013. Globally networked risks and how to respond. Nature, 497: 51-59.
- Helbing D, Kühnert C. 2003. Assessing interaction networks with applications to catastrophe dynamics and disaster management. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 328(3-4): 584-606.
- Huang R Q, Fan X M. 2013. The landslide story. Nature Geoscience, 6: 325-326.
- IPCC. 2012. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 1-19.
- Kappes M S. 2011. Multi-hazard risk analyses: a concept and its implementation[D]. Wien, Austria: University of Vienna.
- Kappes M S, Keiler M, von Elverfeldt K, et al. 2012. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. Natural Hazards, 64(2): 1925-1958.
- Karafyllidis I. 2004. Design of a dedicated parallel processor for the prediction of forest fire spreading using cellular

- automata and genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17(1): 19-36.
- Keefer D K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes: a historical review. *Surveys in Geophysics*, 23(6): 473-510.
- Khan F I, Abbasi S A. 2001. An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(4): 283-306.
- Li J, Chen C K. 2014. Modeling the dynamics of disaster evolution along causality networks with cycle chains. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 401: 251-264.
- Li X, Yeh A G O. 2000. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2): 131-152.
- Li Y, Gong J H, Zhu J, et al. 2013. Spatiotemporal simulation and risk analysis of dam-break flooding based on cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(10): 2043-2059.
- Lubos B, Karsten P, Dirk H. 2006. Modeling the dynamics of disaster spreading in networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363(1): 132-140.
- Perucca L P, Esper Angillieri M Y. 2009. Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: the flash flood of Rio Santa Cruz, Province of San Juan-November 12, 2005. *Natural Hazards*, 50(2): 305-320.
- Selva J. 2013. Long-term multi-risk assessment: statistical treatment of interaction among risks. *Natural Hazards*, 67(2): 701-722.
- Shi P J, Shuai J B, Chen W F, et al. 2010. Study on large-scale disaster risk assessment and risk transfer models. *International Journal of Disaster Risk Science*, 1(2): 1-8.
- Shi P J, Wang J A, Xu W, et al. 2012. Formation mechanism, process and risk evaluation system of disaster chain. *Proceedings of the international disaster and risk conference. Davos, Switzerland: August 25th.*
- Stone R. 2008. Wenchuan Earthquake-Scientists race against the clock to gauge landslide risk. *Science*, 320(5882): 1408.
- Travis J. 2005. Hurricane Katrina-Scientists' fears come true as hurricane floods New Orleans. *Science*, 309(5741): 1656-1659.
- UN. 2002. Johannesburg plan of implementation of the world summit on sustainable development[EB/OL]. 2014-11-07 [2014-11-07]. http://www.un.org/esa/sustdev/documents/WSSD_POI_PD/English/WSSD_PlanImpl.pdf
- UNEP. 1992. Agenda 21[EB/OL]. 2011-10-03[2014-11-07]. <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=52>
- UN-ISDR. 2005. Hyogo framework for action 2001-2015: building the resilience of nations and communities to disasters. World conference on disaster reduction. Kobe, Hyogo, Japan: January 18th.
- Wang J J, Gao H Y, Xin J F. 2010. Application of artificial neural networks and GIS in urban earthquake disaster mitigation. *International conference on intelligent computation technology and automation*. Changsha, China: May 11st-12nd.
- Wang J X, Gu X Y, Huang T R. 2013. Using Bayesian networks in analyzing powerful earthquake disaster chains. *Natural Hazards*, 68(2): 509-527.
- Watts D J, Strogatz S H. 1998. Collective dynamics of small-world' networks. *Nature*, 393(6684): 440-442.
- Weng W G, Ni S J, Yuan H Y, et al. 2007. Modeling the dynamics of disaster spreading from key nodes in complex networks. *International Journal of Modern Physics C*, 18(5): 889-901.
- Wolfram S. 1984. Computation theory of cellular automata. *Communications in Mathematical Physics*, 96(1): 15-57.
- Xu L F, Meng X W, Xu X G. 2014. Natural hazard chain research in China: a review. *Natural Hazards*, 70(2): 1631-1659.
- Xu M Z, Wang Z Y, Qi L J, et al. 2012. Disaster chains initiated by the Wenchuan Earthquake. *Environmental Earth Sciences*, 65(4): 975-985

Review on research methods of disaster loss accumulation and amplification of disaster chains

YU Han¹, WANG Jing'ai^{1,2}, CHAI Mei^{3,4}, SHI Peijun^{2,3}

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. PICC Property and Casualty Company of Guangdong Province, Guangzhou 510600, China)

Abstract: In recent years, the frequent catastrophic disasters have caused great losses of human lives and properties in the world. This indicates that disaster losses may be accumulated and amplified through disaster chains, in which one disaster triggers another, and so forth. The losses are much heavier in disaster chains than in a single disaster. Disaster chain is a typical complex form of regional disaster system. Understanding the amplification mechanisms of disaster chains is very important in catastrophe risk governance. This review first focuses on the concepts and understandings of disaster chain and summarizes a comprehensive definition from the geographic perspective through literature research. It is found that disaster chains have two common features, including the casualty relationship between different disasters and the spatial and temporal expansion of disaster losses. Only under a geographical framework, a sound and complete understanding of the disaster chain concept may be possible. A regional disaster system includes the environment, hazards, and exposure units and the complex spatial and temporal interactions of these elements. Second, considering the different research philosophies, five method categories in recently disaster chain research are summarized and analyzed. The five categories include empirical statistics methods, probabilistic models, complex network models, disaster system simulations, and multidisciplinary theories. The appropriateness and disadvantages of each category of methods are discussed with respect to their utility in describing disaster chain loss accumulation and amplification. Empirical statistics methods are a classical one that often use weighted average of a series of indicators. They have great advantage in taking into consideration various geographic factors and the modeling process is simple. But these methods cannot reveal the disaster chain evolution and processes. Probabilistic models can generate an overview of all possible events after a disaster have happened, as well as calculate the conditional probability. But they have the same problem as the statistics models. Disaster chain is a typical complex network. So the complex network theory may be used to describe the evolution of disaster chain networks. Such method should consider the spatial and temporal features of the disaster chain components in order to make the result more precise. Simulation methods are a promising one that can support the understanding of disaster chains dynamics, as well as the mechanism of the accumulation and amplification of disaster chain losses. However, simulation precision should be improved by including the spatial and temporal features of disaster chains in the future. Two types of important disaster chains, the seismic and typhoon disaster chains were used as examples to show the practical application of these methods. Finally, this review shows that the main trend of disaster chain research is to build and improve the dynamical model of disaster chain loss accumulation and amplification processes. The key is to connect all the factors spatially and temporally in a disaster chain system. It is necessary to transform the research approaches from "static-descriptive-explanatory" to "dynamic-process oriented-simulation" in order to understand the complexity of a disaster system.

Key words: disaster chain; disaster loss assessment; disaster loss accumulation and amplification; disaster system complexity