# 基于承灾体的区域灾害链风险评估模型

## 荣莉莉, 刘玙婷

(大连理工大学系统工程研究所, 辽宁大连 116024)

摘要:重大突发事件往往引发次生灾害,形成灾害链,产生更严重的灾害后果.辨识灾害链风险,有利于事先的断链减灾,避免灾害的进一步扩大.针对重大突发事件类型繁多、作用区域不同的特点,本文提出了一种适应不同事件及区域的灾害链风险评估模型.通过分析突发事件灾害链的形成机理,辨析出了区域灾害链风险的关键构成要素——承灾体,并从灾害链形成的致灾因子和孕灾环境角度,建立了区域灾害链风险评价指标及度量标准.在此基础上,构建了区域灾害链风险评估模型.最后,针对某具体区域进行了灾害链风险评估,辨识出了该区域的固有灾害链风险,以及不同灾害情景下可能形成的灾害链,验证了所提方法的可行性和有效性.

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.01.011

# Modeling the evaluation for regional disaster chain risk based on elements at risk

#### Rong Lili, Liu Yuting

(Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Major emergencies usually trigger secondary disasters which may form disaster chains and cause more serious consequences. Evaluating disaster chain risk can help implement chain-cutting disaster mitigation and avoid amplifying the consequence. Considering that major emergencies have various types and may occur in diverse regions, this paper proposes an evaluation model of regional disaster chain risk for different emergencies and different regions. Through analyzing the formation mechanism of disaster chain, this paper recognizes the core elements of disaster chain risk, i.e. the elements at risk, and builds evaluation indexes of regional disaster chain risk from both hazard and disasters-pregnant environment perspectives. On this basis, the evaluation model is then established. Finally, this paper evaluates the disaster chain risk of a specified region, including identifying the inherent disaster chain risk and the possible disaster chains in different disaster scenarios. The evaluation results demonstrate the feasibility and validity of the proposed method.

Key words: region; disaster chain; elements at risk; risk evaluation; emergency

#### 1 引 言

近年来,国内外重特大突发事件引发连锁反应的事例频繁发生,如吉林石化爆炸事故引发跨国环境污染,南方冰雪灾害导致交通、电力等瘫痪,日本福岛地震引发海啸、核泄漏等一系列灾害链,给人们的生命财

收稿日期: 2016-05-27;修订日期: 2017-01-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71871039;71371039;71501022).

产造成了严重的损失,尤其是巨型灾害的发生,连锁反应是其显著特征,对灾情产生巨大的放大作用<sup>[1,2]</sup>.因此,研究灾害链的风险,对于断链减灾,避免灾害的进一步扩大具有重要的理论和实际意义.

灾害风险防范是减灾备灾的有效手段,是应急准备的重要内容.国内外学者对于灾害风险进行了广泛而 深入的研究,提出了不同的风险模型<sup>[3-5]</sup>,用于评估各类不同尺度区域中具体灾害的风险水平,对于区域防 灾减灾起到了重要的作用.目前,相对于灾害风险,对灾害链风险的研究还处于起步阶段.这些研究归纳起 来大致有以下两种类型.

一类是针对灾害链风险概念的研究,多是从定性角度进行灾害链式效应的机理分析、特征研究、断链减 灾策略分析等<sup>[6-8]</sup>,如文献[6]认为灾害链是由于灾害事件间的激发作用而形成的多米诺现象;文献[7]提出 多态灾害链的概念,从风险分析的角度对多态灾害链进行形式化描述,并提出风险分析任务;文献[8]根据 灾害链风险评估中是否考虑孕灾环境或灾害间的诱发关系,归纳出三类灾害链风险评估概念模型,认为灾 害链风险应包括单个灾害事件的风险和灾害间的链发风险.

另一类是对灾害链风险的定量评估研究,如基于指标体系的评估<sup>[9]</sup>、基于模型构建的评估<sup>[10-17]</sup>,主要 采用规则推理<sup>[10]</sup>、复杂网络<sup>[11,12]</sup>、系统动力学<sup>[13-15]</sup>、贝叶斯网络<sup>[16,17]</sup>等方法. 文献 [10]在分析事件情景 要素的构成以及情景对事件演变作用的基础上,构建了由情景要素属性状态识别到事件演变描述的概率规 则,通过概率规则推理方法分析事件发展的可能态势,继而对可能的突发事件链作出预测. 文献 [11]提出灾 害链风险评估需要结合区域特性,并考虑灾害链中灾害的区域孕灾环境特征及其受灾频次对灾损的影响, 构建了考虑灾害事件节点的损失、边的概率和边的脆弱性的区域灾害链风险评估模型. 文献 [14]在灾害事 件网络构建的基础上,提出了描述灾害事件演化行为的系统动力学模型,并对突发事件及其相应次生事件 演化扩散状态进行了数值模拟. 文献 [16]基于对突发事件的统一模型表示,将具有关联关系的单一突发事 件贝叶斯网络合并,构建突发事件链贝叶斯网络模型,并对事件间的连锁反应过程进行分析预测.

纵观目前对灾害风险及灾害链风险的评估研究,可以发现如下的特点:一般多针对某个具体区域,如某 工业园区<sup>[18]</sup>、某行政区域<sup>[19]</sup>等,研究某具体灾种引发的灾害链风险;评估方法一般根据风险的不同定义, 从致灾因子、孕灾环境、承灾体等一个或多个方面来考虑,如基于风险的概念,从事件发生的可能性和后果 的严重性两个方面进行评估,发生的可能性一般基于具体区域某灾害发生的频次及强度等相关历史数据进 行计算,而后果的严重性一般选取统计指标中灾害损失相关数据,再综合区域社会经济指标如人口密度、经 济发展GDP等获得.这种方法对历史数据依赖性强,而实际上灾害相关信息,尤其是由于灾害连锁反应而导 致的次生事件的相关数据,往往有限且不易获取.

然而,突发事件种类繁多,包括自然灾害、生产安全事故、公共卫生事件和社会安全事件四大类,每一类 又有若干小类,这些事件之间存在着多种可能的连锁反应情况;并且,突发事件可能发生在任何区域,由于 不同区域之间存在差异,导致灾害后果具有很大的不确定性,即使是同样的事件,产生的连锁反应情况也不 同,如分别发生在唐山、汶川、日本福岛的大地震.怎样构建灾害链风险评估模型以综合反映上述特点,是本 文研究的出发点.

基于上述考虑,本文以区域为对象,从突发事件灾害链形成机理的角度出发,提出不针对具体灾种,具有 更广泛的区域适应性的灾害链风险的定义及其评估模型和方法:分析区域灾害链的形成机理,从而获得区 域灾害链风险构成核心要素,从致灾因子和孕灾环境的角度构建区域灾害链风险评估模型,并给出相应的 算法.最后对模型进行实例仿真,以说明模型的有效性.该模型可以对不同区域的灾害链风险进行评估,达 到灾害链发预警的目的,为断链减灾提供参考依据.

#### 2 区域灾害链风险概念模型

#### 2.1 基于连锁反应机理的区域灾害链风险构成要素分析

灾害系统论认为,灾害是由致灾因子、孕灾环境和承灾体相互作用产生的结果<sup>[20]</sup>.其中,孕灾环境是孕

育致灾因子的环境,致灾因子的类型和强度导致的灾害后果,体现在承灾体上,灾害后果的严重程度由致灾 因子的危险性和承灾体的脆弱性共同决定.而连锁反应中的次生事件也是一种突发事件,因此,其发生同样 需要致灾因子和孕灾环境.文献 [2] 通过分析不同类型突发事件、致灾因子、孕灾环境和承灾体的关系,提 出了不同类型突发事件间的连锁反应形成机理,即一个突发事件作用于某区域环境,产生一定的灾害后果, 另一个事件的发生所需要的致灾因子和孕灾环境条件得到满足,则两个事件间就形成了灾害链.

一个突发事件可使多种承灾体受损,有些受损承灾体只能作为事件本身的灾害后果,不会继续引发次生 事件;有些受损承灾体则可能成为新的致灾因子,继续引发其他事件.



Fig. 1 The formation mechanism of regional disaster chain risk

如图1 所示,当一个突发事件(初始事件)发生在某区域后,其作用区域如图1 中的虚线所示,该区域内该 事件作用的承灾体①、④受到了不同程度的损害,如果损失控制在该区域内(如④),则仍然视为该初始事件 的灾害后果,如果受损承灾体与发生区域外的其他承灾体之间存在某种关联(如①),扩大了初始事件的影响 范围,使得初始事件间接作用于发生区域外的承灾体(如②),则产生了连锁事件的损失,如化工厂爆炸引发 水污染,导致了次生事件的发生.

因此,从灾害链形成的角度来看,区域中存在的承灾体,是形成灾害链的关键因素.如果类似图中①这样的承灾体在一个区域中较多,则灾害链风险就比较大,这类承灾体实际上是起到了次生事件的致灾因子的作用;作为致灾因子的承灾体,通过与其他承灾体关联,形成了次生事件的孕灾环境,导致了灾害链的发生.

文献 [21]梳理了灾害连锁反应的三种模式:链式,如地震引发海啸;网状,如电网相继故障;超网,如南方 雪灾引发电力、交通、能源系统瘫痪.显然,这是由于承灾体的类型及其关联关系的不同所构成的区域灾害 链的致灾因子和孕灾环境不同的结果.

由此可见,区域灾害链形成的直接原因是区域内不同类型承灾体及其间复杂关联关系的存在,区域中的承灾体及承灾体关联关系不同,区域中可能引发的灾害链则不同.

为此,本文以承灾体为核心,分别从致灾因子和孕灾环境两个方面分析区域灾害链风险的构成要素.

1) 作为致灾因子的承灾体固有危险性;

2) 作为孕灾环境的承灾体之间的关联特征.

#### 2.2 承灾体固有危险性评价指标

从灾害损失的角度来看,一个区域是由若干不同类型的承灾体构成的,如一个城市几乎具有各类承灾体,包括人、建筑、生命线系统、工矿商贸、环境、动植物等.不同的区域,不仅在承灾体的类型和数量上有差异,在承灾体的分布上也不同.承灾体的固有危险性,是与承灾体自身固有属性相关的性质,是区分不同类型的承灾体灾害后果的指标.承灾体固有危险性评价,是对承灾体作为灾害链致灾因子的危险性进行度量.通过对各类典型突发事件灾害后果及其演化的分析,本文从承灾体的特征、传播性质及在灾害链中的作用

132

第1期

等方面,提出承灾体的固有危险性(以下简称危险性)评价指标,如图2所示,将承灾体的危险性分为直接危险 性和次生危险性.



#### 图 2 承灾体固有危险性评价指标

Fig. 2 The inherent risk evaluation indexes of elements at risk

#### 2.2.1 直接危险性

1) 承灾体易被作用性

从承灾体作为灾害受体的角度来考虑,即承灾体易被作用性,表示客观存在的承灾体是否容易被突发事件作用的程度,体现了承灾体的受灾可能性.

由于不同事件作用的承灾体不同,因此,突发事件集合与承灾体集合之间存在着不同的映射关系.本文 根据国家标准、应急预案、灾害公报以及相关文献等资料,将四大类突发事件中15个二级子类,共74个三级 子类事件,作为事件集合,其中包含33种自然灾害类型、22种事故灾难、11种公共卫生事件以及8种社会安 全事件.基于搜集到的包含各种突发事件类型的大量灾害案例、灾情报告、《自然灾害分类与代码》(GB/T 289212012)等资料,从突发事件受体及灾害后果的角度,对74种突发事件与承灾体的作用关系进行统计分 析,得到了每类承灾体可以被哪些突发事件作用的映射结果.以74种突发事件为评价全集,用承灾体可被作 用的事件的比例来衡量其易被作用性.其中,人可被74种突发事件中的54种作用,是最易受灾害影响的承 灾体,其次是生命线系统等,如交通系统,可被74种突发事件中的36种作用,建筑可被74种突发事件中的24 种突发事件作用,易被作用程度中等,等.

2) 承灾体灾害后果扩散性

灾害后果在空间上的扩散存在两种形式,一种是灾害自身的扩散,如电网级联故障、火灾蔓延、传染病 传播等;另一种是灾害间的扩散,即一个灾害触发另一种灾害的形式,这种扩散即表现为灾害链现象.根据 灾害后果扩散性质的不同,可将承灾体分为灾害后果不扩散、灾害后果扩散两大类,后者对灾害传播的作用 更大.如,建筑物被破坏后发生倒塌,灾害后果不具有扩散性质;化工厂等重大危险源,由于储存着有毒物质, 灾害后果具有扩散性质,如化工厂爆炸,由于工厂中储备大量有毒物质,爆炸后有毒气体等扩散造成化工污 染,因此,承灾体灾害后果具有扩散性质,则危险性较大;电力系统、河流等,由于其自身的线状或面状传播, 其灾害后果也具有扩散性质.

2.2.2 次生危险性

1) 承灾体链发可能性

承灾体的链发可能性是衡量承灾体在连锁反应中的重要程度的指标,即承灾体在灾害链中的作用大小. 基于区域灾害链形成机理,存在原生事件一承灾体一次生事件的链发关系,不论灾害链长短,都是各种承灾 体在灾害链中起着连接两个事件的作用,即在灾害链的每一层级,都有承灾体在起作用.同一承灾体可能 在不同的灾害链层级中发挥连锁作用,也可能处于一条灾害链的多个层级;处于灾害链末端的承灾体对灾 害链风险的影响程度小,处于灾害链前端的承灾体比处于后端的承灾体对灾害链的影响程度大.因此,本文 从灾害链角度,基于实际发生的灾害链对承灾体的作用进行了统计分析.首先.从应急管理案例库、网络新 闻报道(网易、新浪新闻等)、政府网站灾情报告(如广东省应急网中的典型案例库)、突发事件典型案例汇编 等资料中搜集近千个灾害案例; 然后, 基于事件树分析法提取灾害链, 并以相关研究文献进行补充完善, 得 到200 余条灾害链, 包括如文献 [20] 中总结的四类常见的自然灾害中的灾害链: 台风一暴雨灾害链、寒潮灾 害链、干旱灾害链、地震灾害链; 以及交通事故—危化品事故—水污染—食物中毒; 地震—电力事故—核事 故—水、大气、土壤污染/意外辐射照射事件— 必需品市场混乱; 恐怖袭击—传染病, 等. 基于获得的灾害链, 对在每一条灾害链的每一层级中起作用的关键承灾体进行辨识, 从而得到承灾体在灾害链中的层级分布情 况. 表1 为统计方式, 其中x<sub>i,j</sub> 表示承灾体*i* 是否可处于灾害链的第*j* 层级, 取值1 或0, 分别表示可以和不可 处于该层级, 共有*l* 级. 承灾体处于灾害链层级越靠前, 危险性越大; 在多个灾害链层级中起作用的承灾体比 只处于一个层级的承灾体的危险性大.

		衣 1 承火	仲仁火古铤中的	层级力印						
	Table 1 The hierarchies of elements at risk in disaster chains									
链层级	1	2		j		l				
承灾体i	$x_{i,1}$	$x_{i,2}$		$x_{i,j}$		$x_{i,l}$				

通过对所得到的灾害链进行分解分析,得到承灾体在灾害链中的层级分布情况.其中,生命线工程在灾 害链中的层级比较靠前,且占据的层级数比较多,在灾害链中的作用比较大;而建筑等对灾害链的重要程度 较小,一般处于灾害链的末端.

2) 承灾体的功能传播性质

承灾体的功能传播性质,即承灾体是否能够对其他承灾体产生功能影响,该性质主要是针对生命线工程 这类承灾体.不同的承灾体其功能重要性不同,且在不同的区域同一承灾体的功能重要性也不同,如电力系 统可以对交通、通讯系统等承灾体产生物质输出,从而可以影响多种承灾体.

部分学者详细地分析了电力、通讯、交通、供水、石油、天然气系统等生命线系统间的依存关系,对生命 线系统中各类承灾体的相对重要程度进行了研究<sup>[23]</sup>,如在地震中,这些承灾体的影响重要性程度从强到弱 依次为电力系统,交通系统,通讯系统,给排水系统和供气系统.

综合分析来看,对承灾体作为致灾因子的危险性进行评价,需要综合考虑上述4个指标.

#### 2.3 区域灾害链孕灾环境分析

如前所述,区域灾害链风险评估,就是基于区域灾害链的形成机理,综合考虑承灾体的致灾危险性、区域中承灾体及其间的关联关系构成的孕灾环境,进行风险辨识和评估.

作为致灾因子,一个承灾体的固有危险性可能很大,但处于不同的区域环境中,产生的实际危害程度也 可能存在较大差距.如,某化工厂,处于空旷、渺无人烟的地区,与处于人口密集、建筑设施集中的区域相比, 显然,后者的危险性更大.

区域中的承灾体之间存在着客观的地理关联,它们在距离上可能是相离、相邻、相交或者包含关系.承 灾体受损后可能产生一定的影响范围,由于影响范围的存在,使得地理位置相离的承灾体也可能在影响关系 上存在相邻、相交或者包含的关系.并非所有区域中的承灾体都能够产生灾害链风险,只有暴露在承灾体影 响范围内的承灾体,即与承灾体的影响范围存在包含、相交和相邻的承灾体,才可能被作用,具有继续产生 连锁反应的可能.从灾害传播的角度来看,突发事件连锁反应的表现就是灾害后果在空间上的蔓延,通过承 灾体灾害后果的扩散性质以及区域承灾体之间的关联来体现.一方面,承灾体受损后,不同承灾体的灾害后 果的扩散性质不同,具有扩散性质的承灾体,较之其他承灾体影响范围较大,对灾害演化的作用也越大.另 一方面,由于承灾体对其他承灾体存在物质、能量、信息传输等功能关联,当承灾体受损后,其影响范围因为 这种功能关联的存在而扩大.

区域中承灾体之间的各种关联方式构成了灾害链的复杂孕灾环境.目前对承灾体关联关系的研究主要 集中在关键基础设施间的依存关系<sup>[24]</sup>方面,被学者们广泛认可及使用的分类方式主要有:物理、信息、地 理、逻辑关联<sup>[25]</sup>;功能、空间关联<sup>[26]</sup>.本文借鉴第二种方式,将承灾体之间的关联类型分为如下的地理(空

134

间)关联和功能关联.

地理关联:两个承灾体间由于地理位置的接近而产生关联;

功能关联:两个承灾体间存在着物质、信息的输入或输出而产生的相互依赖关系.

在区域中,暴露在危险性高的承灾体周围的其他承灾体数量越多,与之距离越近,则该承灾体的区域危险性越大.承灾体的影响范围,不仅与致灾强度、承灾体的自身性质相关,还与区域中承灾体与其他承灾体的功能关联关系相关,它们共同构成了灾害链的孕灾环境(图3).



图 3 区域灾害链孕灾环境指标

Fig. 3 The disaster-pregnant environment indexes of regional disaster chains

图3 中,致灾强度表示初始事件致灾因子的危险程度,致灾强度和承灾体脆弱性共同决定了灾害后果的 严重程度,体现为承灾体的受损程度.在承灾体受损程度一定的前提下,影响承灾体作用范围的因素主要有 承灾体的灾害后果扩散性质和承灾体在区域中存在的功能关联关系,如图3 中的虚线框所示.

因此,受损承灾体影响范围可表示为以该承灾体为圆心,以r为半径的一个圆形区域,此半径可表示为

$$r = f(\varepsilon, s, e),\tag{1}$$

其中 ε表示承灾体受损程度参数, s表示承灾体的灾害后果扩散性, e表示承灾体在区域中的功能关联性.

#### 3 区域灾害链风险评估模型构建

#### 3.1 基于致灾因子的区域灾害链风险评估

3.1.1 承灾体危险性评估指标的确定

如前所述,不同区域的差异体现在承灾体类型、数量及关联关系的不同上,这些不同导致了不同区域灾 害链致灾因子和孕灾环境的不同,从而,灾害链风险水平也就不同.为此,需要从不同角度对区域灾害链风 险进行评估.

首先需要评估区域中承灾体的危险性,分别对直接危险性和次生危险性进行评估,然后综合得到最终的承灾体危险性.由于对风险的评估常用风险矩阵的形式表现<sup>[9]</sup>,因此,基于上述承灾体危险性评价指标,通过构建风险矩阵实现危险性分级,将评价结果通过危险性等级的形式表征出来<sup>[22]</sup>.本文针对单个承灾体,将每个指标论域分为三个子集 $U = \{U_1, U_2, U_3\},$ 其中子集 $U_3$ 对危险性的影响最大,其次是子集 $U_2, U_1$ 影响最小.具体子集划分标准如表2所示.

1) 承灾体易被作用性

*x<sub>i</sub>*为承灾体*i*可被作用的突发事件数的归一化结果.由于大部分自然灾害可直接作用于多数承灾体类型,区别主要体现在其他类型的突发事件与承灾体作用关系上,因此以0.3和0.6为界进行子集划分.

基于前文对突发事件与承灾体的作用关系统计分析结果可得,大部分承灾体处于U<sub>2</sub>子集,人处于U<sub>3</sub>子集,经济市场、土地等承灾体属于U<sub>1</sub>子集.

2) 承灾体灾害后果扩散性

通过对大量承灾体灾害后果的梳理,可以发现,灾害后果具有扩散性质的承灾体,在形成灾害链的过程 中具有重要的影响作用;同时,由于承灾体自身结构的不同,如点状承灾体和线状、网状承灾体,以及储备的 物质性态的不同,如气体、液体等,使得扩散的方式也不同.因此,对于承灾体的灾害后果扩散性质的界定, 只要其灾害后果中存在一种可以扩散的形式,则认为该承灾体灾害后果可扩散,并按照点、线、面的不同进 行子集划分,来体现承灾体不同的扩散程度.

基于对灾害后果的统计,其中,大部分建筑物、植物等属于U<sub>1</sub>,水域、工矿设施、大部分生命线系统属于U<sub>3</sub>.

Table 2         The risk evaluation indexes partition of elements at risk									
承灾体质	危险性评价指标		指标论域子集划分						
一级指标	二级指标	$U_1$	$U_2$	$U_3$					
直接危险性	易被作用性 灾害后果扩散性	$0 < x_i \leq 0.3$ 不可扩散	0.3 < x <sub>i</sub> ≤ 0.6 点状扩散	$0.6 < x_i \leq 1$ 线或面状扩散					
次生危险性	链发可能性 功能传播性	$0 ≤ L_i < 0.2$ 无功能传播	$0.2 \leqslant L_i < 0.6$ 弱	$0.6 \leqslant L_i \leqslant 1$ 强					

表 2 承灾体危险性评价指标子集划分 Fable 2 The risk evaluation indexes partition of elements at r

3) 承灾体的链发可能性

*L<sub>i</sub>*为承灾体*i*在灾害链中作用大小,用承灾体处于灾害链层级数的大小和多少来度量.基于前文的分析, 承灾体处于灾害链中的位置不同,作用也不同.

因此, 对灾害链中每一层级赋予不同的权重系数, 来体现每一层级危险性的不同, 且越处于前端权重越 大.  $\alpha_j$  表示承灾体处于灾害链中第*j* 层级的权重, 有 $\alpha_1 > \alpha_2 > \cdots > \alpha_j > \cdots > \alpha_l$ , 表明承灾体对灾害链 风险的影响是逐级减小的;  $L_i$  为综合考虑承灾体在灾害链中的层级及数量所得到的承灾体*i* 在灾害链中作 用大小, 计算公式为

$$L_i = \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{i,j},\tag{2}$$

其中  $\sum_{j=1}^{l} \alpha_j = 1, L_i \in [0,1], x_{i,j}$ 的含义同表1.

基于前文对灾害链案例的统计分析可知,灾害链最大长度为6(不包括循环链),则层级数*l* = 5. 每一层级的权重可取值如表3所示.

表 3 权重取值								
		Table 3 The	values of weight					
权重	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$lpha_3$	$lpha_4$	$\alpha_5$			
取值	0.35	0.25	0.20	0.15	0.05			

有些承灾体处于灾害链末端,不再继续引发其他灾害,不具有灾害传播性质,这类承灾体的危险性低, 链发可能性小.因此, 对应到*L<sub>i</sub>*值, 即以0.2 为界, 将小于0.2 的划为一个集合; 将剩下区间划分为两个集合, 以0.6 为界进行划分.

根据上节承灾体链层级的统计分析结果,利用公式(2)计算得到每个承灾体的链发可能性评估值L<sub>i</sub>,进 而得到每个子集中的承灾体类型.其中,建筑物(除工矿设施)、农业设施、农作物属于U<sub>1</sub>,工矿设施、大部分 生命线系统、河流等属于U<sub>3</sub>,人、动物等属于U<sub>2</sub>.

4) 承灾体的功能传播性

承灾体功能传播的强弱程度,如前文所述,参考学者们对生命线系统中各类承灾体影响顺序的研究来划分. 一般地,电力、交通、通讯系统属于U<sub>3</sub>,供排水、供气、供油、供热系统等属于U<sub>2</sub>,除生命线系统的大部分承灾体属于U<sub>1</sub>.

3.1.2 承灾体作为灾害链致灾因子的危险性等级划分

基于上述子集划分标准,可以分别建立直接危险性、次生危险性等级矩阵,如图4所示,每个矩阵的纵横 坐标都分别划分为低、中、高三个等级,分别对应U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>和U<sub>3</sub>.

作为灾害链的致灾因子风险,是由图4中四个坐标所代表的指标综合形成的,但它们所起的作用存在程度上的差异.其中,承灾体的灾害后果扩散性、链发可能性对连锁反应的影响较大,所以等级划分时可赋予这些指标较大的权重,本文为1;承灾体功能传播性次之,可赋予中等权重;而承灾体易被作用性主要是为了衡量承灾体受灾程度,对造成灾害链影响程度低,可以给予较小的权重,或不考虑,本文赋予0,这时,在直接危险性等级矩阵中,直接危险性只由灾害后果扩散性决定.具体划分情况如图4 中(a)和(b)所示.



图 4 直接和次生危险性等级矩阵

Fig. 4 The matrixes of direct risk and secondary risk

综合直接危险性和次生危险性评价结果,就可得到承灾体作为灾害链致灾因子的危险性大小.在进行 综合时,次生危险性的权重要大于直接危险性的权重,得到如图5所示的等级矩阵.承灾体危险性评估结果 分为四个等级T:高、较高、较低、低,代表了引发次生事件可能性大小的差异.

由于灾害风险评估也有从致灾因子角度单独考虑的<sup>[5]</sup>,因此利用图5评估区域中的承灾体危险性等级T,结合其相应的数量,也可以反映该区域灾害链的风险水平.一个区域中危险性等级高的承灾体数量越多,灾害链风险也越大;反之,区域中存在大量危险性等级低的承灾体,则其灾害链风险也低.因此,在仅考虑承灾体类型和数量的前提下,利用图5可以评估一个区域的灾害链风险,并且可以区分不同区域灾害链风险的水平差异.



Fig. 5 The risk level matrix of elements at risk

#### 3.2 区域灾害链风险综合评估

#### 3.2.1 承灾体的区域危险性

如前所述,暴露在危险性高的承灾体影响范围内的其他承灾体越多,则该承灾体可能引发次生灾害的机 会越大,在区域中的链发危险性也就越大,因此,可以将暴露在影响范围内的其它承灾体的危险性叠加到该 承灾体上,即为该承灾体在该区域中的危险性,称之为承灾体的区域危险性.承灾体的区域危险性体现了承 灾体本身与其它承灾体所构成的孕灾环境的危险性,是在承灾体固有危险性评价(图5)的基础上,根据承灾 体的影响范围,以及暴露在影响范围内的其它承灾体的数量,衡量由于这些承灾体的存在而造成的该承灾 体在区域中的危害程度大小.

为此,承灾体i的区域危险性可表示为

$$I_i = f(T_i, r_i, d, k), \tag{3}$$

其中 *T<sub>i</sub>* 为承灾体*i* 的固有危险性等级(图5), *r<sub>i</sub>* 为承灾体*i* 的影响范围半径, *d* 为承灾体*i* 影响范围内其他承 灾体与承灾体*i* 的距离, 体现了区域承灾体的地理关联关系, *k* 为影响范围内承灾体的数量, 体现了区域承灾 体的暴露性.

3.2.2 区域灾害链风险评估模型

区域灾害链是由区域中的致灾因子及孕灾环境共同作用所形成的,因此,区域灾害链风险评估,需要综合考虑致灾因子、孕灾环境及所形成的灾害链.

在对承灾体的固有危险性*T<sub>i</sub>* 及区域危险性*I<sub>i</sub>* 进行评估的基础上,基于承灾体间的传播特点,判断所形成的灾害链.若初始影响范围内的某承灾体还能继续影响其他承灾体,那么继续将其周围承灾体的风险叠加到该承灾体上.最后,初始承灾体引发的灾害链风险就是链上所有承灾体危险性的叠加结果,区域灾害链风险就是区域中所有承灾体产生的灾害链风险的综合.

如图6 所示,初始受损承灾体1 影响范围内有两种承灾体2 和承灾体3,其中承灾体2 不再对其他承灾体 产生影响;而承灾体3 继续对暴露在其影响范围内的承灾体产生影响,从而产生了连锁反应,将承灾体3 的 危险性叠加到初始承灾体的危险性上,即为由初始承灾体产生的灾害链风险.



Fig. 6 The risk evaluation of regional disaster chains

基于上述分析,区域灾害链风险评估模型涉及到的因素及计算公式如下.

1) 区域承灾体i 的影响半径为

$$r_{i} = \begin{cases} \varepsilon_{i}(1+s_{i})(1+\eta_{q}e_{i}), & T_{i} \neq 1, \\ 0, & T_{i} = 1. \end{cases}$$
(4)

其中  $s_i$  表示承灾体i 灾害后果是否具有扩散性质, 若是则取1, 否则取0;  $e_i$  表示承灾体i 是否与其他承灾 体存在功能关联, 若存在为1, 否则为0;  $\varepsilon_i$  为承灾体受损程度的基本调节参数;  $T_i$  为承灾体的危险性等级,  $T_i = 1$  表示等级最低的承灾体, 其影响范围为0;  $\eta_q$  用于调节具有功能关联关系的承灾体的相对重要性,  $\eta_q$  主要是针对生命线系统, q 为其中的某类承灾体, 一般地, 影响重要性程度从强到弱依次为为电力系统, 交通系统, 通讯系统, 给排水系统, 供气系统, 供油系统, 供热系统.

2) 承灾体*i* 的区域危险性, 与承灾体的危险等级相关, 也包括暴露于承灾体*i* 影响范围内的承灾体对它的叠加影响. 暴露承灾体与承灾体*i* 的距离越近, 对承灾体*i* 的危险性影响也就越大, 且承灾体数量越多影响也越大. 故承灾体*i* 的区域危险性为

$$I_i = \sum_{m=1}^k \frac{T_i r_i}{d_{im}}, \ d_{im} \leqslant r_i,$$
(5)

3) 承灾体i 引发的灾害链风险R<sub>i</sub>, 即承灾体i 的区域危险性与它可能引发的其他承灾体的危险性的叠加

$$R_i = I_i + \sum_{j=1}^{l} I_j,$$
 (6)

其中 t 为承灾体i 引发的链中的其他承灾体数, I<sub>i</sub> 为链中第j 个承灾体的区域危险性.

由于受损承灾体自身性质的不同,并不是任意两个承灾体之间都存在链发关系,如当人或动物受到传染 性疾病感染时,只能在同类承灾体中传播,并不会对其他类型的承灾体产生作用.根据承灾体类型和灾害链 层级关系的分析,可建立相应的承灾体灾害传播规则库,对承灾体能否继续传播灾害进行判断.

4) 区域灾害链风险R, 即区域中所有承灾体引发的灾害链风险的总和

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i,\tag{7}$$

其中 n 为区域中承灾体的数量.

#### 3.3 流程设计

基于上述模型,给出计算区域灾害链风险的步骤如下.

步骤1 给定区域,并识别区域中承灾体的类型、数量n 及属性.

步骤2 确定各承灾体在区域中的位置,并计算承灾体两两之间的距离,得到区域承灾体的地理关联关系矩阵:  $d = [d_{ij}]_{n \times n}$ .

步骤3 识别每个承灾体的危险性等级T,四个危险性等级的取值由高到低分别取4,3,2,1.

**步骤4** 计算各承灾体的影响半径r,得到以影响范围r 为半径的圆形区域,其中危险性等级最低的承灾体的r = 0,即没有影响范围.

**步骤5** 从危险性等级最高的承灾体*i*开始,依次计算每个承灾体产生的区域灾害链风险值,其中危险性等级最低的承灾体产生的灾害链风险为零,则前三个危险性等级的承灾体产生的风险具体计算步骤如下.

**步骤5.1** 判断承灾体*i* 影响范围内的其他承灾体的数量*k* 及距离. 若k = 0,则该承灾体产生的灾害链风险 $R_i = 0$ ,结束当前承灾体的判断,进行区域承灾体集合中下一个承灾体的计算,即重新开始本步骤; 若 $k \neq 0$ ,则利用公式(5)计算该承灾体*i* 的区域危险性 $I_i$ ,继续下一步;

步骤5.2 根据灾害传播规则库,依次对暴露于承灾体i影响范围内的承灾体j的传播可能性进行判断. 若所有的承灾体j不能继续传播灾害,则承灾体i产生的灾害链风险 $R_i = I_i$ ;若存在承灾体j能继续传播,则继续下一步;

**步骤5.3** 继续对承灾体*j* 重复步骤5.1的判断及计算,直到不再有可继续传播的承灾体,得到承灾体*i* 引发的灾害链,利用公式(6)计算承灾体*i* 产生的灾害链风险*R<sub>i</sub>*.

步骤5.4 重复步骤5.1~步骤5.3, 直到区域中的所有承灾体(除了等级最低的承灾体)都选择完毕, 得到每 个承灾体引发的灾害链风险值, 将所有承灾体产生的灾害链风险叠加得到区域灾害链风险*R*.

步骤6 实验结束.

#### 4 实例仿真

本节以某区域为例,对以上模型进行应用,区域情景如图7所示,该区域中存在一个化工厂,其周围分布 着各种建筑物及设施,包括居民小区、百货大楼、商服场所、办公楼等建筑,东邻人口密集的大学,南面毗邻 一条河流,与河流隔着道路沿河分布着众多居民楼,西邻加油站、商业中心.



图 7 区域情景

Fig. 7 Regional scenario

区域中的承灾体包括: 公共建筑B1、B3, 加油站B2, 工人宿舍B4, 化工厂B5, 居民建筑B6、B7、B8, 学校B9, 河流B10, 交通道路B11, 人B12.

1) 实验参数及设置

主要涉及到的参数有: 区域承灾体的类型和数量*n*; 承灾体B<sub>i</sub> 在区域中的位置; 承灾体的灾害后果扩散 性质 $s_i, s_i \in \{0, 1\}$ ; 承灾体的功能关联性 $e_i, e_i \in \{0, 1\}$  和重要性 $\eta_q, \eta_q \in (0, 1]$ , 取区间随机值; 承灾体影响 范围的调节参数 $\varepsilon_i$ ; 承灾体之间灾害传播规则. 其中 $\eta_q$  具体区间设置基于前文如表4 所示.

			夜 Table 4	4 $\eta_q$ 取通 Values of $\eta_q$			
类别	电力系统	交通系统	通讯系统	供排水系统	供气系统	供油系统	供热系统
$\eta_q$ 值	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.5,0.6]	(0.4,0.5]	(0.3,0.4]	(0.2,0.3]	(0,0.2]

基于以上参数的设计原则, 表5 给出了一组仿真参数, 其中"r(·)"表示在区间内随机取值.

		Table 5	The att	ribute v	alues of	region	al elen	nents at	risk			
承灾体属性	B1	B2	B3	B4	В5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
$s_i$	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
$e_i$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$\eta_{q}$	0	r(0.2, 0.3]	0	0	0	0	0	0	0	0	r(0.6, 0.8]	0
$arepsilon_i$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.01

表 5 区域承灾体属性设置

2) 承灾体危险性等级识别

根据承灾体的性质及前文承灾体危险性评价方法,对区域中的承灾体进行危险性等级辨识.针对每个承灾体,基于承灾体危险性评价的四个指标:承灾体易被作用性、灾害后果扩散性、链发可能性以及功能传播性,依据分级标准,辨别每个承灾体属于各指标下的某个子集,再根据直接和次生危险性矩阵,分别得到直接和次生危险性等级,最后根据综合承灾体危险性矩阵,得到承灾体的危险性等级T,结果如表6所示.

其中,承灾体B12——人最易被作用,其他承灾体的易被作用程度都为中等,属于子集U<sub>2</sub>;承灾体B2、B5、B10的灾害后果具有扩散性,且为线状或面状扩散,即属于该指标下的子集U<sub>3</sub>;承灾体B5、B10的链发可能性最大,属于该指标下的子集U<sub>3</sub>,承灾体B2、B11、B12属于U<sub>2</sub>;承灾体B2、B11具有功能传播性,其中加油站属于供油系统,能够对交通车辆等供油,从而产生功能关联,公路属于交通系统,可为其他生命线系统提供物质运输,但功能关联重要性相对较弱,属于该指标下的子集U<sub>2</sub>.

这样, 就可得到各承灾体的危险性等级向量T = [1, 4, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 1, 4, 3, 3]. 其中, 承灾体B2、B5、B10 危险等级最高, 它们分别是加油站、化工厂和河流; 承灾体B11、B12 危险等级较高, 分别对应交通道路和人, 第1期

其余承灾体危险等级均为低,包括公共建筑、宿舍、学校等.这一结果与人们的常识判断基本一致.其中, B12代表人这一承灾体,其危险等级较高,是因为该模型没有区分突发事件的类型,如地震事件中,人应该和 一般建筑的致灾因子等级相近,但人同时还是传染病的承灾体,而建筑就不是了.因此,该结论是综合考虑 了各类事件灾害后果特点的判断结果.

承灾体	评价指标	易被作用性	灾害后果扩散性	直接危险性	链发可能性	功能传播性	次生危险性	综合危险性等级T			
	B1	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B2	$U_2$	$U_3$	高	$U_2$	$U_2$	中	高 $T = 4$			
	B3	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B4	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B5	$U_2$	$U_3$	高	$U_3$	$U_1$	高	高 $T = 4$			
	B6	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B7	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B8	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B9	$U_2$	$U_1$	低	$U_1$	$U_1$	低	低 $T = 1$			
	B10	$U_2$	$U_3$	高	$U_3$	$U_1$	高	高 $T = 4$			
	B11	$U_2$	$U_1$	低	$U_2$	$U_2$	中	较高 T = 3			
	B12	$U_3$	$U_1$	低	$U_2$	$U_1$	中	较高T=3			

表 6 区域承灾体危险性识别 Table 6 Risk identification of regional elements at risk

3) 区域灾害链风险计算



Fig. 8 Regional risk and disaster chain risk of different elements at risk in the region

利用式(4)~式(6)计算得到各个承灾体的区域危险性及其引发的区域灾害链风险,如图8 所示.承灾体B10(河流)的区域危险性及产生的灾害链风险最大,其次是承灾体B5(化工厂)、B2(加油站);承灾体B11不再继续引发其他承灾体,其灾害链风险等于其区域危险性.对比表6 可以发现,表6 中危险性等级高和较高的承灾体共5 个,而图8 中具有灾害链风险的承灾体有4 个,缺失B12(人)的灾害链风险,是因为人作为始发事件的承灾体,其可影响的承灾体只有人或动物,不影响其它本例中的11 个承灾体.是基于承灾体之间的灾害传播规则判断的结果.

4) 某事件引发的区域灾害链计算

利用该模型,还可计算某种灾害情景下灾害后果的演化情况,发现潜在的灾害链.在图7的区域情景下,基于上述参数设置,假设初始事件为承灾体B5——化工厂发生爆炸,则可计算所引发的其他承灾体受损情况如图9(a)中所示,共引发了三条承灾体受损路径.若承灾体B5——化工厂爆炸的致灾强度增加,即增大*ε* = 0.2 使得影响范围扩大,其它参数不变,则B5 所引发的其他承灾体受损情况如图9(b)所示,承灾体受损情况明显比图9(a)严重,首先是第一层级被影响到的承灾体数量增加,且这些受损承灾体又能够影响到其他承灾体,增加了链的长度,尤其是影响到了危险性最大的承灾体B10——河流,使区域灾害链风险水平显著增加.



Fig. 9 The results of disaster chains caused by the elements at risk B5

吉林石化爆炸事件发生区域涉及到的承灾体包含上述区域情景中的各类承灾体,化工厂爆炸导致的承 灾体间的链发情况类似于图9(b),承灾体B5 与B10 之间的链发则表示化工厂爆炸到河流受损(污染).该模型 在一定程度上可以解释吉林石化爆炸事件中存在的区域灾害链现象.

对该仿真结果进一步分析,可为区域的防灾减灾提供具有针对性的决策依据.图9中,承灾体节点的出度和入度分别表示承灾体可引发多少区域内其他承灾体以及可被其他承灾体引发的情况,如图9(b)中,承灾体B10、B11既有出度又有入度,且度较大,表明它们可以在某些承灾体引发的灾害链中起扩散作用,又可以影响其他承灾体,为灾害链中的关键节点;其余仅有入度的承灾体,表明它们在事件中会受到不同程度的影响,尤其是其中的承灾体B12(人),入度较大,说明其在事件中可能受到多方面的影响.因此,从防灾减灾的角度来看,一方面,区域灾害链风险的防范,不仅应聚焦于出度大且产生的灾害链复杂的源发承灾体(如B5),也应着重控制区域中的关键节点(如B11),起到断链减灾的作用;另一方面,承灾体的受损代表灾害损失,应尽量保护类似于B12这样易受多种影响的承灾体.

#### 5 结束语

本文针对突发事件种类不同、灾害后果多样、作用区域任意等特点,提出了一种适用于评估某一区域不同事件作用下的灾害链风险模型及评估方法,其中区域指事件发生的区域,不特指行政区域,可以是行政区域内部的局部区域,也可以是跨越多个行政区域的较大范围.基于灾害链的形成机理,提取了承灾体这一核心要素,分别建立了评估承灾体固有危险性及区域危险性的模型及方法,以及评估区域灾害链风险的模型和方法.利用该模型可以评估某给定区域的灾害链风险,进行灾害链发预警,为减少灾害损失提供参考依据.该模型的局限在于在形成灾害链判断时,没有考虑链发的可能性大小,而是基于最坏结果,即只要存在链发的可能就确定发生.如果结合具体区域、具体灾害链发生的概率信息,则利用该模型可得到具体灾害的灾害链风险结果.

#### 参考文献:

[1] 余 瀚, 王静爱, 柴 玫, 等. 灾害链灾情累积放大研究方法进展. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1498–1511.
 Yu H, Wang J A, Chai M, et al. Review on research methods of disaster loss accumulation and amplification of disaster chains.
 Progress in Geography, 2014, 33(11): 1498–1511. (in Chinese)

[2] 荣莉莉, 谭 华. 基于孕灾环境的突发事件连锁反应模型. 系统工程, 2012, 30(7): 40-47.
 Rong L L, Tan H. Modeling chain-reactions to emergency based on disaster-pregnant environment. Systems Engineering, 2012,

30(7): 40-47. (in Chinese)

- [3] Pelling M. Visions of risk: A Review of International Indicators of Disaster Risk and Its Management. London: University of London, King's College, 2004.
- [4] Birkmann J, Cardona O D, Carreño M L, et al. Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. Natural Hazards, 2013, 67(2): 193–211.
- [5] 明晓东, 徐 伟, 刘宝印, 等. 多灾种风险评估研究进展. 灾害学, 2013, 28(1): 126–132, 145.
   Ming X D, Xu W, Liu B Y, et al. An overview of the progress on multi-risk assessment. Journal of Catastrophology, 2013, 28(1): 126–132, 145. (in Chinese)
- [6] Carpignano A, Golia E, Di Mauro C, et al. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: First application. Journal of Risk Research, 2009, 12(3/4): 513–534.
- [7] 黄崇福. 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, 2006, 14(S): 29–37.
   Huang C F. Role of integrated risk management, framework design and study on risk analysis of polymorphic disaster chain. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(S): 29–37. (in Chinese)
- [8] 张卫星, 周洪建. 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, 2013, 32(1): 130–138.
   Zhang W X, Zhou H J. Conceptual model of disaster chain risk assessment: Taking Wenchuan earthquake on 12 May 2008 as a case.
   Progress in Geography, 2013, 32(1): 130–138. (in Chinese)
- [9] 叶金玉. 基于多维矩阵的台风灾害链综合风险评估模型及其信息图谱表达. 福州: 福建师范大学, 2015.
   Ye J Y. Typhoon disaster chains integrated risk assessment model and information tupu based on multi-dimensional matrix. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015. (in Chinese)
- [10] 曲 毅, 仲秋雁, 马骁霏, 等. 基于情景的突发事件演变概率规则推理方法. 系统工程学报, 2014, 29(4): 571-578.
   Qu Y, Zhong Q Y, Ma X F, et al. The event evolution scenario-based reasoning method via probability rules. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(4): 571-578. (in Chinese)
- [11] 王 翔. 区域灾害链风险评估研究. 大连: 大连理工大学, 2011.
   Wang X. Research on risk assessment of regional disaster chain. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] Buzna L, Peters K, Helbing D. Modelling the dynamics of disaster spreading in networks. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2006, 363(1): 132–140.
- [13] 刘爱华. 城市灾害链动力学演变模型与灾害链风险评估方法的研究. 长沙: 中南大学, 2013.
   Liu A H. Research on the dynamics evolution model of urban disaster chain and the risk assessment method of disaster chain.
   Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [14] Li J, Chen C. Modeling the dynamics of disaster evolution along causality networks with cycle chains. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 401(5): 251–264.
- [15] 李勇建, 乔晓娇, 孙晓晨, 等. 基于系统动力学的突发事件演化模型. 系统工程学报, 2015, 30(3): 306–318.
   Li Y J, Qiao X J, Sun X C, et al. Modeling the evolution of emergency based on system dynamics. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(3): 306–318. (in Chinese)
- [16] Qiu J N, Wang Z Q, Ye X, et al. Modeling method of cascading crisis events based on merging Bayesian network. Decision Support Systems, 2014, 62(6): 94–105.
- [17] Wang J X, Gu X Y, Huang T R. Using Bayesian networks in analyzing powerful earthquake disaster chains. Natural Hazards, 2013, 68(2): 509–527.
- [18] Cozzani V, Antonioni G, Landucci G, et al. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 28(4): 10–22.
- [19] Menoni S. Chains of damages and failures in a metropolitan environment: Some observations on the Kobe earthquake in 1995. Journal of Hazard Materials, 2001, 86(1/3): 101–119.
- [20] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1–9.
   Shi P J. Theory on disaster science and disaster dynamics. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1–9. (in Chinese)
- [21] 荣莉莉, 张继永. 突发事件的不同演化模式研究. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 1-6.
   Rong L L, Zhang J Y. Research on different evolution models of emergency. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 1-6. (in Chinese)

[22] 何 川, 刘功智, 任智刚, 等. 国外灾害风险评估模型对比分析. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5): 148–153.
 He C, Liu G Z, Ren Z G, et al. Comparative analysis of several wordwide disaster risk assessment models. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(5): 148–153. (in Chinese)

- [23] 苏幼坡, 马亚杰, 刘瑞兴. 城市生命线地震震害相互影响. 河北理工学院学报, 2001, 23(2): 84-89.
   Su Y P, Ma Y J, Liu R X. The study of the mutual effects on earthquake disasters between urban lifelines. Journal of Hebei Institute of Technology, 2001, 23(2): 84-89. (in Chinese)
- [24] Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 121(1): 43–60.
- [25] Rinalidi S M, Peerenboom J P, Kelly T. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies. IEEE Control System Magazine, 2001, 21(6): 11–25.
- [26] Zimmerman R. Social implications of infrastructure network interactions. Journal of Urban Technology, 2001, 8(3): 97–119.

#### 作者简介:

荣莉莉 (1964—), 女, 辽宁大连人, 博士, 教授, 研究方向: 突发事件应急管理、知识管理、复杂网络、计算智能, Email: llrong@dlut.edu.cn;

刘玙婷 (1989—), 女, 山东菏泽人, 硕士, 研究方向: 应急管理, Email: liu\_yu\_ting90@163.com.

## 2018年《系统工程学报》评审专家名单 (排名不分先后)

赵道致	艾兴政	安庆贤	白俊红	白仲林	柏庆国	卞文良	薄立军	卜祥智	曹 柬	曹 裕	柴 建
南国芳	周 伟	陈华友	陈加伟	陈金龙	陈克贵	陈浪南	陈琴	仲秋雁	陈晓红	陈 旭	陈 晔
马军海	陈增强	迟国泰	崔翔宇	达庆利	戴道明	戴丽	戴智华	但 斌	丁琳琳	范龙振	范体军
李 波	方德斌	方华京	房 勇	费为银	付亚平	高红伟	龚旻	关 峻	关贤军	官振中	郭冬梅
陈卫东	郭熙铜	郭亚军	过秀成	韩立岩	何 波	何建敏	贺思辉	胡 昊	胡祥培	胡 勇	胡志华
林 强	黄 俊	黄沿江	惠晓峰	戢守峰	计国君	贾俊秀	周 驰	贾晓菁	姜艳萍	蒋 锋	蒋祥林
兰燕飞	揭筱纹	金星	金卓	乐 琦	李登峰	李红波	李健	李 凯	李美娟	李 迁	李寿德
贾 宁	李 翔	李想	李孝忠	李勇建	李仲飞	李宗平	梁昌勇	梁 樑	林 杰	林祥	林晓伟
刘伟华	刘斌	刘昌臣	刘德海	刘锋	刘建国	刘 杰	刘善存	刘树林	刘天亮	刘晓星	刘 洋
孙晓晨	左文明	刘震宇	刘志峰	陆前进	陆一平	吕跃进	罗 彪	骆建文	骆品亮	马超群	马利军
唐万生	马士华	马卫民	梅 强	孟志青	慕银平	穆海林	倪得兵	牛保庄	牛东晓	庞素琳	彭红枫
李悦雷	浦徐进	钱存华	秦学志	饶从军	任学敏	任一鑫	荣莉莉	阮俊虎	尚 勤	沈厚才	沈 家
荣喜民	沈建男	石宝峰	石 平	史永东	舒 嘉	宋华明	宋 洁	宋金波	周艳菊	苏应生	孙朝苑
熊 熊	孙高济	孙坚强	孙武军	孙秀峰	谭春桥	唐小我	唐应辉	滕春贤	万光羽	汪传旭	汪文帅
庄新田	汪忠志	王 成	王存睿	王道平	王国利	王继霞	王健(男)	王晓伟	周兴建	王军强	周 岩
朱庆华	王 凌	王能民	王群伟	王群勇	王铁男	王小斌	王健(女)	王旭坪	王延荣	王延章	王玉东
周宗放	王增强	王志平	卫强	魏航	魏宇	吴 冲	吴 锋	吴恒煜	吴 杰	吴俊杰	吴 鹏
周永务	吴顺祥	吴卫星	吴肖乐	吴永求	武晓莉	席运江	夏承遗	夏南新	向 阳	肖 剑	肖 进
金淳	肖人彬	肖条军	谢海滨	徐承龙	徐峰	徐 和	徐维军	徐 亚	徐寅峰	周孝华	许明辉
刘 勇	许启发	许 瑞	许 威	薛木森	薛巍立	闫宏斌	闫 强	晏妮娜	晏艳阳	燕夏敏	杨成荣
周永权	杨金强	杨 翼	姚锋敏	姚洪心	叶阿忠	叶 强	叶五一	易平涛	尹力博	尤建新	于 辉
赵廷弟	于 娟	俞 静	曾庆成	张 兵	张娥	张继红	张菊亮	张俊光	张亮	张美璟	张 明
王春发	张卫国	张跃军	张 赞	张智光	赵 达	赵海峰	赵立力	赵林度	赵敏	赵泉午	赵 武
孙 浩	郑君君	钟军委	邹 凯	邹宗保	周德群	周根贵	周鸿卫	周开乐	蔡建湖	刁训娣	胡 毅
钱 洁	李 果	刘 林	马义中	王先甲	樊治平	张立文	万 中	张 慧	徐泽水		