

# 城市雾霾灾害链演化模型及其风险分析

高峰, 谭雪

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 采用灾害系统理论及复杂网络理论, 开展了城市雾霾灾害链演化模型构建及其风险分析。基于雾霾的成因及危害, 从致灾因子、孕灾环境和承灾体特征出发, 分析了城市雾霾灾害链的成灾机制及其灾害链的类型与特征。通过构建城市雾霾灾害链演化网络模型, 基于网络节点的出入度及其子网节点数、最短路径和平均路径与包含节点的支链数进行了定性风险分析, 进一步确定关键环节, 提出了断链减灾的控制建议。风险分析的结果表明: 在城市雾霾灾害链演化系统中, 雾霾事件与其他危机事件之间联系十分紧密, 通过几次过渡, 其危害影响就能蔓延到整个网络, 其中大气能见度下降、空气质量下降或空气污染、交通堵塞或瘫痪、交通事故、城市大气酸雨、危害城市绿化、经济损失和危害人身体健康是关键环节。

**关键词** 城市雾霾灾害; 灾害演化网络; 灾害链; 危机事件; 出入度

雾霾发生时空气中的有毒颗粒物会诱发癌症、呼吸道疾病及各类心血管疾病, 危害人身体健康; 严重的雾霾天气会降低大气能见度, 导致交通事故频发, 造成人员伤亡和财产损失, 并对城市形象造成负面影响; 同时, 雾霾天气还会通过影响植物的光合作用以及危害动物的生长破坏生态平衡等<sup>[1]</sup>。因此, 深入研究城市雾霾灾害的成灾机制, 开展相应的风险分析, 提出科学有效的防治措施, 成为当前亟待解决的问题。

目前, 学术界对于雾霾灾害问题研究已经取得了一定的进展。国外对雾霾的研究起步较早, Nehzat<sup>[2]</sup>发现可吸入颗粒物污染呈现季节趋势, 不同的季节、不同气候条件对污染浓度影响较大。Quinn 等<sup>[3]</sup>开展了区域性霾现象对气候的影响研究, 指出工业和汽车排放、生物质燃烧和灰尘是雾霾产生的重要因素。Pilla<sup>[4]</sup>等对都柏林居民在上下班途中所暴露在 PM<sub>10</sub> 中的情况设定地理信息系统(GIS)模型, 结果发现, 在公交车、自行车和步行方面 GIS 模型与 PM<sub>10</sub> 浓度的相关度较高, 但是在乘

坐火车方面相关度较低。国内学者的研究成果主要集中在雾霾的形成机理、变化特征、成因分析及对经济发展方式和环境治理的反思上。例如, 史军等<sup>[5]</sup>基于 449 个站点的数据对华东地区雾霾成因进行分析, 认为其主要原因是城市化进程加快而导致土地利用变化、大气污染物排放增加, 城市热岛效应日益显著, 加上气象条件的变化和季节性影响, 空气温度、湿度及风速等综合作用, 使华东地区气溶胶厚度增强且二次气溶胶反应频率加快, 雾霾天气加剧。潘本锋<sup>[6]</sup>等研究了中国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因, 指出气溶胶粒子浓度升高是影响大气能见度最重要的因素, 城市细颗粒物来源主要包括工业排放、能源排放、生活排放、汽车尾气、生物质燃烧、道路扬尘及二次气溶胶生成等。程婷等<sup>[7]</sup>研究了近 50 年南京雾霾天气的特征以及气象条件对雾霾天气的影响, 结果表明: 南京市区的年均霾日是南京郊区的 2.7 倍, 南京地区霾日数总体呈上升趋势, 其中平均霾日数冬季最多, 夏季最

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2018-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474252)

作者简介: 高峰, 副教授, 研究方向为矿山开采、灾害机理与控制, 电子信箱: csugaofeng@126.com

引用格式: 高峰, 谭雪. 城市雾霾灾害链演化模型及其风险分析[J]. 科技导报, 2018, 36(13): 73-81; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.13.010

少。茹少峰等<sup>[8]</sup>分析认为,中国经济粗放发展方式是城市雾霾天气形成的主要原因,并提出转变经济增长方式,提高经济增长质量的治理路径。吴伟强等<sup>[9]</sup>将导致城市雾霾出现的原因归结为气象原因(季节气温、空气湿度、风向风力、水平静风现象、垂直逆温现象)、自然原因(土壤扬尘、海盐扬尘、花粉传播、森林燃烧烟尘、沙尘暴颗粒物)及人为原因(工厂“三废”排放、二次气溶胶污染、燃煤等能源活动、机动车尾气排放、生活污染排放、楼群密集)3方面,提出了基于故障树模型的城市雾霾风险评估方法,建立以“城市雾霾”为顶事件的故障树,并进行了定性和定量分析,围绕雾霾产生的人为因素提出了建议。Yang等<sup>[10]</sup>基于空气质量监测、遥感卫星数据和嵌套式空气质量预测模拟系统(NAQPMS)分析了中国东北地区霾污染的具体来源和形成机制,指出气象条件停滞、能源燃烧、非法排放和生物质燃烧是东北特大城市群强烈霾形成和空间分布的主要驱动因素。盛小星等<sup>[11]</sup>对中国长三角雾霾风险进行了风险等级评估,分析表明城市雾霾风险较高的原因是PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>年均浓度差异度过高,此外城市单位机动车数量和人口密度也是重要因素。韩磊<sup>[12]</sup>对雾霾灾害风险指数的实证分析证明,雾霾灾害风险主要受空气质量和污染物排放的影响,在雾霾灾害的治理过程中应重视对空气中颗粒物的治理,加强对工业污染物和生活污染物排放的控制。

由此可见,国内外针对城市雾霾,从灾害演化的链式效应角度开展成灾机制与演化特征的研究鲜有报道。本文以城市雾霾为灾害源,依据灾害系统理论和灾害链的形成规律,分析城市雾霾灾害链的成灾机制,构建危机事件演化网络模型,辨识城市雾霾灾害链系统中的关键环节,确定其最佳断链位置,为城市雾霾衍生灾害的防控提供依据。

## 1 城市雾霾灾害链的特征分析

### 1.1 城市雾霾灾害链成灾机制

根据灾害系统理论<sup>[13]</sup>,灾害是地球表层孕灾环境( $E$ )、致灾因子( $H$ )、承灾体( $S$ )综合作用的复合体系( $D$ ),即 $D=E\cap H\cap S$ 。以下从灾害系统的角度对城市雾霾进行分析。

1) 致灾因子特征。雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述,其中PM<sub>2.5</sub>是造成雾霾灾害的

主要污染物,也是重金属、多环芳烃等有毒物质的载体。雾霾是雾和霾的混合物,其中雾会降低空气透明度,使能见度恶化。霾的组成成分包括数百种大气化学颗粒物,其中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等粒子能使大气混浊、视野模糊,并形成空气污染。

2) 孕灾环境特征。城市雾霾灾害的孕灾环境可分为自然环境和社会环境。自然环境主要是天气气候<sup>[14]</sup>,雾霾的形成需要有“雾”作为载体。“雾”是一种自然现象,多在秋冬季节形成,而雾霾频发地区的冷空气势力逐渐减弱、地面风速减小<sup>[15]</sup>。全球变暖使暖冬频繁出现,也导致空气中污染物难以扩散,雾霾加剧。近年频繁出现的“逆温层”现象<sup>[16]</sup>,促进了雾霾灾害的发生。发生雾霾灾害的多为中大型城市,由于城市化进程的加快,机动车排放量增加、人口聚集带来的生产生活污染和城市建设带来的大量扬尘都加剧了雾霾的发生。而城市产业结构的变化也是诱因之一,第二产业比重越高,环境污染越严重。其中重工业的污染排放物都是雾霾的构成物质,能源的消耗也会带来大量污染排放。

3) 承灾体特征。城市是雾霾灾害的巨大承灾体<sup>[17-18]</sup>,并且是一个庞大复杂的系统,其内部各承灾体之间彼此关联、彼此影响,具备灾害链产生的条件。从宏观层面考虑,城市的可持续发展是以人类社会、城市经济、生态环境等方面的协调发展为前提的,因此将城市雾霾灾害的承灾体分为人类子系统、交通子系统、经济子系统和环境子系统。其中,人类子系统是城市承灾体的核心。因为人的主观能动性和观念意识决定着系统的发展方向,如果雾霾对灾害进行积极的处理,雾霾将可能减弱;如果处理不当,雾霾将会加剧。

综上所述,城市特有的孕灾环境和承灾体特征使其在致灾因子的作用下形成独特的城市雾霾灾害链模式(图1)。

### 1.2 城市雾霾灾害链的特征

#### 1) 城市雾霾灾害链类型

郭增建等<sup>[19]</sup>从灾害链产生原因的角度将灾害链划分为因果链、同源链、互斥链和偶排链等4类。李智<sup>[20]</sup>从灾害链的连接和交错情况对其演变形式进行了分析,将灾害链分为5种类型,分别为直链式灾害链、发散式灾害链、集中式灾害链、循环式灾害链和交叉式灾害链。

根据城市雾霾灾害链成灾机制及其演化网络模型<sup>[20]</sup>,可以看出城市雾霾灾害链是由直链式灾害链、发散式灾害链和集中式灾害链3种类型的灾害链共同构

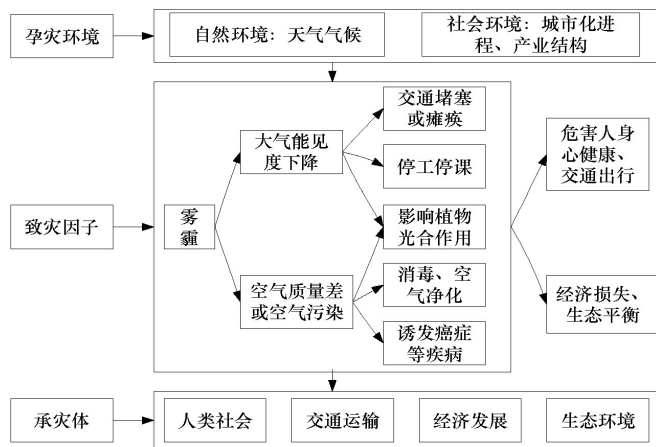


图1 城市雾霾灾害链形成模式

Fig. 1 Urban haze disaster chain formation model

成,分析如下。

(1) 直链式灾害链。直链式灾害链是指在演化过程中单向形成的不同类型灾害之间的演化方式。如图2所示,雾霾会造成空气质量变差或空气污染,进而诱发人的抑郁情绪,影响人的心理健康。而由于直链式灾害链中,子危机事件是否发生是由其父危机事件和两危机事件之间的连接边决定的。因此对于直链式灾害链,其中任意一个条件不发生,子危机事件就一定不会发生。



图2 直链式灾害链

Fig. 2 Chain of direct chain disaster

(2) 发散式灾害链。发散式灾害链是指由一个源灾害事件向若干子灾害事件扩散,发散成多种灾害事件。如图3所示,由大气能见度下降这一灾害事件会导致高速公路和铁路封路、民航航班延误、交通事故等若干公共安全事件。与直链式灾害链不同,发散式灾害链中父危机事件和两危机事件之间的连接边任意一个条件不发生,子灾害事件就一定不发生;且父危机事件不发生,则其所有的子危机事件均不会发生。所以从网络结构上看,在发散式灾害链中,最应优先控制的是父危机事件。

(3) 集中式灾害链。集中式灾害链是指由若干子灾害事件集成综合演化生成一种新的灾害事件,并造成巨大的破坏。如图4所示,影响旅游景点开放、停工停课、增加抗霾用品支出等若干危机事件集成演化生

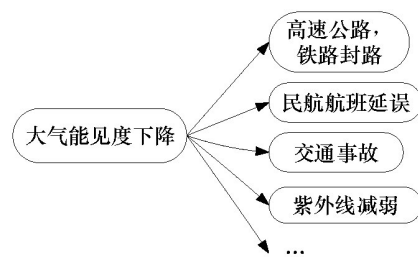


图3 发散式灾害链

Fig. 3 Divergent disaster chain

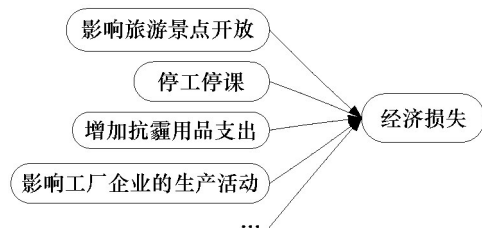


图4 集中式灾害链

Fig. 4 Centralized disaster chain

成了经济损失这一新危机事件。与直链式和发散式灾害链均不同的是,集中式灾害链中任意一个父危机事件和其连接边发生,子危机事件都可能会发生。所以在集中式灾害链中,减低和杜绝子危机事件的发生是十分困难的。这时就需要对子危机事件本身进行相应的控制,或减少子危机事件导致其他灾害的可能性,来降低其危害程度。

### 2) 城市雾霾灾害链的特征

(1) 城市雾霾灾害链<sup>[21]</sup>呈现长链效应。通常把含有3个以上危机事件的灾害链称为长链。长链最突出特点就是即使将前链“扑灭”,后链仍有可能继续,灾害难以停息。造成城市雾霾灾害链长链的原因有很多,主要是因为城市承灾体多,致灾因素也多,雾霾灾害很容易与其他因素耦合叠加,使得灾害效应被放大。

(2) 城市雾霾灾害链的多源性、复杂性。随着经济快速发展和城市化进程加速,使得现代城市极易产生热岛效应、逆温效应,加重了雾霾灾害的发生。同时对城市资源和环境的过度开发利用,使雾霾灾害源不断出现。而城市雾霾灾害链的实质是人为因素引发的,也使城市雾霾灾害链的演化愈加复杂。

(3) 城市雾霾灾害链的影响范围广。由于雾霾灾害的承灾体为城市,雾霾灾害对城市的社会、经济和环境均有可能造成严重的影响。对城市雾霾灾害如果处置不当,就会引起灾害链的放大效应;如果处置得当,则可以减弱灾害链的影响。

## 2 城市雾霾灾害链演化网络模型构建

### 2.1 城市雾霾灾害链演化分析方法

如果将系统内部的各个元素作为节点,元素之间的关系视为连接,那么系统就构成了一个网络,而复杂网络的研究思路是强调系统的结构并从结构角度分析系统的功能,但这些抽象出来的真实网络拓扑结构的性质与之前研究的网络不一样,其节点特别多,故称其为复杂网络<sup>[22]</sup>。一般以复杂系统的网络结构作为出发点,运用图论和统计学等方法研究复杂系统。

本文利用复杂网络理论,分析了城市雾霾灾害后果的蔓延特征,构建灾害链演化模型,确定危机事件的级别,在此基础上进行危机事件后果的风险控制。图5给出了城市雾霾灾害链的定性分析技术路线,主要提出了单元划分、危险因素辨识、灾害链网络模型构建、危机事件分析和灾害风险控制的研究方法。

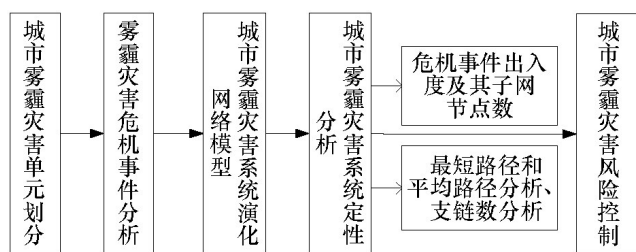


图5 城市雾霾灾害链演化定性分析技术路线

Fig. 5 Urban haze disaster chain evolution qualitative analysis technology roadmap

在城市雾霾灾害链的演化分析中,首先针对城市雾霾灾害系统的基本特征,辨识其可能引发的危机事件及其后果,分析各个次生危机事件的相互演化机制和规律。对现有城市雾霾危机事件后果进行特征分析和归纳分类,在此基础上进行危险因素辨识,构建城市雾霾灾害链演化网络模型,确定了基于节点出入度及其子网节点数、最短路径和平均路径及所含支链数的定性分析方法,依据分析结果,提出合理有效的断链减灾方案。

### 2.2 城市雾霾灾害链演化网络模型

按照城市雾霾灾害致灾因素的独立性、完整性、指标收敛性等原则,对城市雾霾灾害的危机事件进行单元划分,包括交通运输、人的身心健康、经济发展及生态环境4类。依据城市雾霾灾害危机事件的致灾因素和影

响后果,得到城市雾霾灾害链演化网络模型(图6)。

在该网络模型中各危机事件之间的衍生关系错综复杂<sup>[20]</sup>,包括一因一果、一因多果、多因一果和多因多果4种基本关系形式。城市雾霾灾害链演化网络是这些基本关系形式的叠加所形成的复杂网络,从网络结构的角度整体研究可提高对城市雾霾灾害链的整体认识,有助于提出雾霾防控的有效方案。

此外,按照城市雾霾灾害演化链中危机事件的蔓延顺序对次生危机事件,主要分为三级,第一级是城市雾霾灾害直接导致的子危机事件;第二级是城市雾霾灾害子危机事件导致的其他危机事件;第三级是城市雾霾灾害造成最终影响的危机事件。在本文所构建的城市雾霾灾害链演化模型中共有节点38个和62条演化边,其中38个节点表示38个危机事件,包括2个一级演化危机事件,29个二级演化危机事件和7个三级演化危机事件;62条边表明其演化关系。这些事件和演化关系构成不同的灾害链。

## 3 城市雾霾灾害链演化系统风险分析

### 3.1 基于危机事件出入度及其子网节点数的分析

在灾害链的网络结构模型中,各危机事件所处的位置不同,其风险的程度就不同,对灾害系统发展的影响程度也不同,因此可从网络结构入手,分析出关键节点,即灾害链系统中的关键事件,加以控制,进行断链减灾,从而有效地控制灾害的发展。在城市雾霾灾害链网络结构基础上,利用复杂网络和图论理论,确定危机事件的出入度和子网节点数<sup>[23]</sup>,并结合危机事件的分级,分析不同危机事件级别与危机事件入度、出度及子网节点数之间的关系(表1、表2)。

在灾害链的网络结构模型中,入度表示能够诱发该危机事件的父危机事件的数量,入度越大,表明其父危机事件越多,越容易发生。而出度则反映了该危机事件引发的子危机事件的数量,出度越大,表明其子危机事件越多,其后果就越严重,以上危机事件都是灾害系统中的关键节点,是断链减灾的重点。而危机事件及其诱发子危机事件个数累加和越大,即子网节点数越大,则其后果就越严重。一般事件等级与节点子网数呈正相关关系,危机事件级别越高,其子网数越大。一级危机事件节点子网数最大,三级危机事件节点子网数最小。因此,一级危机事件也是断链减灾的重点。

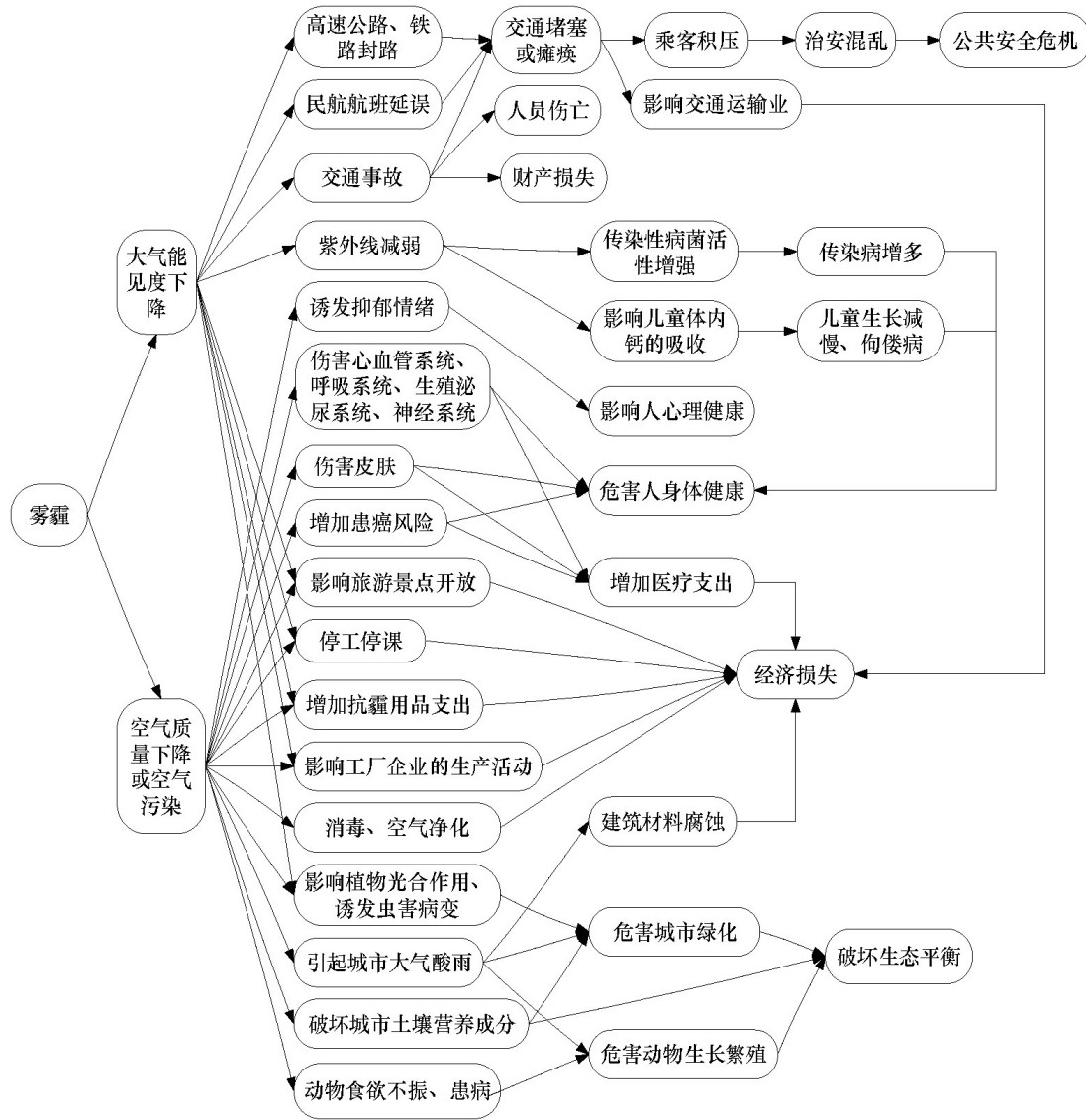


图6 城市雾霾灾害链演化网络模型

Fig. 6 Urban haze disaster chain evolution network model

表1 城市雾霾危机事件出入度和事件级别统计

Table 1 Statistics on the level of entry and exit events of urban haze crisis

危机事件名称	事件级别和出入度	危机事件名称	事件级别和出入度
大气能见度下降	一级 9/1	紫外线减弱	二级 2/1
空气质量下降或空气污染	一级 13/1	伤害心血管系统等	二级 2/1
交通堵塞或瘫痪	二级 2/3	伤害皮肤	二级 2/1
交通事故	二级 3/1	增加患癌风险	二级 2/1
引起城市大气酸雨	二级 3/1	破坏城市土壤营养成分	二级 2/1
增加医疗支出	二级 1/3	经济损失	三级*/8
危害城市绿化	二级 1/3	危害人身体健康	三级*4
影响旅游景点开放	二级 1/2	破坏生态平衡	三级*/3
停工停课	二级 1/2	公共安全危机	三级*1
增加抗霾用品支出	二级 1/2	人员伤亡	三级*/1
影响工厂企业的生产活动	二级 1/2	财产损失	三级*/1
影响植物光合作用	二级 1/2	影响心理健康	三级*/1
危害动物生长繁殖	二级 1/2	其余危机事件	二级 1/1

表2 城市雾霾危机事件子网节点数统计

Table 2 Statistics on the number of nodes in urban haze crisis

危机事件名称	子网节点数	危机事件名称	子网节点数
大气能见度下降	23	危害动物生长繁殖	3
空气质量下降或空气污染	22	乘客积压	3
交通事故	9	传染性病菌活性增强	3
高速公路、铁路封路	7	影响儿童体内钙的吸收	3
民航航班延误	7	经济损失	1
紫外线减弱	6	危害人身体健康	1
引起城市大气酸雨	6	破坏生态平衡	1
交通堵塞或瘫痪	6	公共安全危机	1
伤害心血管系统等	4	人员伤亡	1
伤害皮肤	4	财产损失	1
增加患癌风险	4	影响人心理健康	1
影响植物光合作用	3	其余危机事件	2
破坏城市土壤营养成分	3		

根据表1可以看出,交通事故和引起城市大气酸雨事件的出度均达到了3,表明这些危机事件的影响范围广,后果较严重;而经济损失、危害人身体健康、破坏生态平衡、增加医疗支出和危害城市绿化事件的入度相对较大,表明以上危机事件发生的途径多,较难控制;交通堵塞或瘫痪事件出入度均相对较大,表明其既容易发生且发生的后果也较严重。而根据表2从子网节点数看,大气能见度下降、空气质量下降或空气污染、交通事故、高速公路封路、民航航班延误、紫外线减弱、引起城市大气酸雨及交通堵塞或瘫痪等危机事件的子网节点数较多,风险相对较大。综上表明,大气能见度下降、空气质量下降或空气污染、交通事故、交通堵塞

或瘫痪、引起城市大气酸雨、经济损失和危害人身体健康等危机事件是城市雾霾灾害链系统的关键节点。

### 3.2 基于最短路径和平均路径的分析

根据图论中路径的概念,城市雾霾灾害链演化网络中初始事件到达任意危机事件的路径可表示为各项交替的是节点和边的非空有限序列,显然初始事件到达目标危机事件的路径并不一定是唯一的。初始事件到达目标危机事件之间任一路径上包含的边的数目称为路径长度,且所有路径中路径长度最小的一条称为最短路径。通过城市雾霾灾害链演化网络结构可以通过观察危机事件所属网络层级得到由初始事件到达该危机事件的最短路径长度(表3)。

表3 初始节点到达各节点最短路径统计

Table 3 Statistics of shortest path for each node

最短路径	目标危机事件
6	1个,公共安全危机
5	1个,治安混乱
4	4个,乘客积压、影响交通运输业、传染病增多、儿童生长缓慢
3	13个,交通堵塞、增加医疗支出、建筑材料腐蚀、人员伤亡、经济损失、破坏生态平衡等
2	17个,交通事故、紫外线减弱、停工停课、影响工厂企业生产活动、伤害皮肤、增加患癌风险等
1	2个,大气能见度下降、空气质量差或空气污染

根据表3中最短路径的统计结果,网络中初始事件到达任意危机事件之间可以有一条或多条路径,但是大多数的最短路径长度都不大于4。将初始事件到达各危机事件的最短路径长度的平均值规定为平均路径长度<sup>[21]</sup>,则该网络的平均路径长度为2.68。可知,城市雾霾灾害链演化网络中,雾霾事件与其他危机事件之间的联系十分紧密,通过几次过渡,其危害影响就能蔓

延到整个网络。

### 3.3 基于危机事件支链数的分析

包含危机事件的支链数<sup>[23]</sup>在一定程度上也反映了危机事件的严重性。城市雾霾灾害链演化网络系统中危机事件的支链始于一级危机事件,终于三级危机事件,将经过某危机事件的支链数进行累加,则可得到包含该危机事件的支链数(表4)。

表4 城市雾霾灾害链演化系统中危机事件所含支链数统计

Table 4 Statistics of the number of branched chain in the crisis events in the urban haze disaster evolution system

危机事件名称	所含支链数	危机事件名称	所含支链数
大气能见度下降	15	高速公路、铁路封路	2
空气质量下降或空气污染	19	民航航班延误	2
经济损失	16	紫外线减弱	2
破坏生态平衡	7	伤害心血管系统等	2
交通堵塞或瘫痪	6	伤害皮肤	2
危害人身体健康	5	增加患癌风险	2
交通事故	4	影响旅游景点开放	2
危害城市绿化	4	停工停课	2
引起城市大气酸雨	3	增加抗霾用品支出	2
乘客积压	3	影响工厂企业的生产活动	2
治安混乱	3	影响植物光合作用、诱发植物疾病	2
影响交通运输业	3	破坏城市土壤营养成分	2
增加医疗支出	3	危害动物生长繁殖	2
公共安全危机	3	其他危机事件	1

从表4可以看出,城市雾霾灾害链演化系统中,包含大气能见度下降、空气质量下降或空气污染、经济损失、破坏生态平衡、交通堵塞或瘫痪、危害人身体健康、交通事故和危害城市绿化等危机事件的支链数较多,出现的频率较高,影响后果较严重,是相对较危险的危机事件;而包含诱发抑郁情绪、消毒和空气净化、传染病增多、儿童生长缓慢、建筑材料腐蚀等危机事件的支链数为1,因而它们的风险相对较小。

### 3.4 城市雾霾灾害链演化系统断链减灾控制

综上所述,确定城市雾霾灾害在不同时期的关键环节:在雾霾灾害前期,大气能见度下降和空气质量下降或空气污染是关键节点;在雾霾灾害后期,关键危机事件是交通堵塞或瘫痪、交通事故、引起城市大气酸雨、危害城市绿化、经济损失和危害人身体健康。以上关键节点确定了城市雾霾灾害链演化系统的最佳断链位置。在城市雾霾灾害发生前期应及时对其可能造成的大气能见度和空气质量的下降采取防治措施,如空气净化和消毒处理,增加城市绿化等;之后则需要重点关注城市的交通运输状况、空气质量情况、人的身心健康状况、城市的绿化情况以及工厂企业的生产活动状况等,根据情况采取措施以减轻雾霾灾害的影响。

对城市雾霾灾害风险程度的分析评估,吴伟强等<sup>[9]</sup>提出了基于故障树模型的城市雾霾风险评估方法。从导致城市雾霾出现的气象原因、自然原因及人为原因出发建立了城市雾霾风险分析故障树,对其进行定性

分析得出了人为原因是主要因素,再结合杭州市相关监测数据定量分析验证了其可行性,最后围绕雾霾产生的人为因素给出了防控建议。而本文是对城市雾霾造成的衍生灾害的分析,是对其结果的分析;其次本文对城市雾霾灾害链网络模型仅进行了定性的分析,没有结合实际案例进行定量分析;最后本文是从城市雾霾造成的衍生灾害出发提出初步的控制建议。

## 4 结论

对城市雾霾灾害引发的灾害链演化网络模型进行了分析,得到以下结论。

1) 构建了以危机事件为节点,以事件诱发关系为连接边的城市雾霾灾害链演化网络模型,根据城市雾霾灾害链网络结构采用节点出入度及其子网节点数、最短路径和平均路径及包含支链数的分析法,定性的对危机事件和演化链进行分析研究,提出风险控制的重点关注方向和断链减灾方案。

2) 提出一种城市雾霾灾害的风险分析和控制思路。在城市雾霾灾害链演化系统中,雾霾事件与其他危机事件之间联系十分紧密,通过几次过渡,其危害影响就能蔓延到整个网络,其中大气能见度下降、空气质量下降或空气污染、交通堵塞或瘫痪、交通事故、引起城市大气酸雨、危害城市绿化、经济损失和危害人身体健康是关键环节。

3) 本文仅对城市雾霾灾害链系统进行了定性分析,而对城市雾霾灾害链系统进行定量的综合风险评估有待进一步研究深入。

### 参考文献(References)

- [1] Samet J M, Zeger S L, Dominici F, et al. The National morbidity, mortality, and air pollution study, part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States[J]. Research Report (Health Effect Institute), 2000, 94(2): 65-70.
- [2] Nehzat Mtalebi. Winter time PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, source apportionment at sacramento, caledonia[J]. Air & Waste Management, 1999, 12(9): 25-29.
- [3] Quinn P K, Bates T S. North American, Asian and Indian haze similar regional impacts on climate[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(11): 1555-1559.
- [4] Pilla F, Broderick B. A GIS model for personal exposure to PM<sub>10</sub> for Dublin commuters[J]. Sustainable Cities and Society, 2015(15): 1-10.
- [5] 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 533-542.  
Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. The changes and causes of fog and haze days in eastern China[J]. Journal of Geography, 2010, 65(5): 533-542.
- [6] 潘本锋, 汪巍, 李亮, 等. 我国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因分析[J]. 环境与可持续发展, 2013, (1): 33-36.  
Pan Benfeng, Wang Wei, Li Liang, et al. Analysis of the reason of formation key and the characteristic of pollution about fog or haze at key cities in autumn and winter in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2013(1): 33-36.
- [7] 程婷, 魏晓弈, 翟伶俐, 等. 近 50 年南京雾霾的气候特征及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6N): 54-61.  
Cheng Ting, Wei Xiaoyi, Zhai Linli, et al. An analysis of climatic characteristics and influence factors of fog and haze in Nanjing in recent 50 years[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(6N): 54-61.
- [8] 茹少峰, 雷振宇. 我国城市雾霾天气治理中的经济发展方式转变[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2014, 44(2): 90-93.  
Ru Shaofeng, Lei Zhanyu. The governance of fog and haze in cities and the transformation of the mode of economic development[J]. Journal of Northwestern University(Philosophy and Social Sciences Edition), 2014, 44(2): 90-93.
- [9] 吴伟强, 王欣. 基于故障树模型的城市雾霾风险分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2015, 14(5): 76-82.  
Wu Weiqiang, Wang Xin. The risk analysis of urban fog-haze based on Fault Tree[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2015, 14(5): 76-82.
- [10] Yang T, Gbaguidi A, Yan P Z, et al. Model elucidating the sources and formation mechanisms of severe haze pollution over Northeast mega-city cluster in China[J]. Environmental Pollution, 2017, 230: 692-700.
- [11] 盛小星, 叶春明. 基于集对分析法的长三角雾霾风险评估[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(3): 334-337, 359.  
Sheng Xiaoxing, Ye Chunming. Haze risk assessment based on set pair analysis in Changjiang river delta[J]. Resource Development and Marketing, 2017, 33(3): 334-337, 359.
- [12] 韩磊. 雾霾灾害风险指数的构建与测度[J]. 统计与决策, 2017(2): 28-32.  
Han Lu. Construction and measurement of haze-fog disaster risk index[J]. Statistics and Decision, 2017(2): 28-32.
- [13] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.  
Shi Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 1-7.
- [14] Yang T R, Liu X G, Qu Y, et al. Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the mega city Beijing, China, in January 2013[J]. Atmospheric Research, 2015, 155: 192-203
- [15] 孟晓艳, 余予, 张志富, 等. 2013 年 1 月京津冀地区强雾霾频发成因初探[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 190-194.  
Meng Xiaoyan, Yu Yu, Zhang Zhifu, et al. Preliminary study of the dense fog and haze events' formation over Beijing-Tianjin-and-Hebei region in January of 2013[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(1): 190-194.
- [16] 孙亮. 灰霾天气成因危害及控制治理[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 71-75.  
Sun Liang. Hazard and Treatment of Haze Weather[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(10): 71-75.
- [17] 余瀚, 王静爱, 柴玫等. 灾害链灾情累积放大研究方法进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1498-1511.  
Yu Han, Wang Jingai, Chai Mei, et al. Review on research methods of disaster loss accumulation and amplification of disaster chains[J]. Progress in Geography, 2014, 33(11): 1498-1511.
- [18] 陈建均. 地铁灾害链风险评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
Chen Jianjun. Research on risk assessment of the metro disaster chain[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [19] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987(2): 9-17.  
Guo Zengjian, Qin Baoyan. Brief discussion on disaster physics[J]. Journal of Catastrophology, 1987(2): 9-17.
- [20] 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.

- Li Zhi. Research on evolution and control model of disaster events based on complex network[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [21] 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[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Liu Aihua. Research on the dynamics evolution model of urban disaster chain and the risk assessment method of disaster chain[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [22] 刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程, 2005, 23(6): 1-7.
- Liu Tao, Chen Zhong, Chen Xiaorong. A brief review of complex networks and its application[J]. Systems Engineering, 2005, 23(6): 1-7.
- [23] 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.
- Chen Changkun, Ji Daoxi. Risk analysis and control for the evolution disaster system of typhoon based on complex network[J]. Disaster Science, 2012, 27(1): 1-4.

## Evolution model and risk analysis of urban haze disaster chain

GAO Feng, TAN Xue

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Evolution model and risk analysis of urban haze disaster chain are carried out on the basis of disaster system theory and the complex network theory in this paper. Through the information gathering and analysis of the causes and harm of urban haze disaster, the disaster chain mechanism of urban haze is analyzed, as well as the types and characteristics of disaster chain, according to the characteristics of disaster-causing factors, hazard-formative environment and hazard-affected bodies. By building the urban haze disaster chain evolution network model, qualitative risk analysis is made based on the out-in degrees and number of nodes in its subnets, the shortest path and average path, and the number of branched chains. Finally, the key steps are found and the solutions on disconnecting chains are presented. The results of risk analysis show that in the urban haze disaster chain evolution system, the haze event closely relates to the other crisis events. Through several times of transition, the harm effect might spread to the entire network, and the key links are the decline in atmospheric visibility, the decline in air quality or air pollution, traffic jams or paralysis, traffic accidents, resulting in urban atmospheric acid rain, urban greening, economic losses and endanger human health.

**Keywords** urban haze disaster; disaster evolution network; disaster chain; crisis events; out-in degree ●



(责任编辑 祝叶华)