

文章编号:1672-3813(2017)01-0001-07;DOI:10.13306/j.1672-3813.2017.01.001

# 空间脆弱性与传统网络属性的关系

李航,胡小兵,郭晓梅,史培军

(北京师范大学 a. 减灾与应急管理研究院; b. 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)



**摘要:**为探索研究网络系统脆弱性的新思路,并进一步提升空间脆弱性模型的实用性,分析了空间脆弱性与传统网络属性(主要是平均最短路径,平均中间性,连通性和受影响最短路径数目)的关系,并以北京地铁网络为例验证这一关系。结果表明,在网络系统脆弱性研究中,当重点关注空间灾害对系统造成的全局性影响时,新的空间脆弱性模型和传统网络属性的合理结合可以提供一种行之有效的方法。

**关键词:**网络系统;网络属性;空间脆弱性;地铁网络

中图分类号:N94;X43

文献标识码:A

## Relationship Between Spatial Vulnerability and Traditional Network Properties

LI Hang, HU Xiaobing, GUO Xiaomei, SHI Peijun

(a. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management,

b. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** To explore a new thinking for network vulnerability research, and improve the practicality of spatial vulnerability model, this paper analyzes the relationship between spatial vulnerability and four traditional network properties, average shortest path, average betweenness, connectivity and amount of impacted shortest paths, and conducts a case study on Beijing's subway network to verify this relationship. The results show that, when the global impact of spatial hazards is concerned in network vulnerability research, the reasonable combination of the new spatial vulnerability model and traditional network properties can deliver an effective approach.

**Key words:** network system; network properties; spatial vulnerability; subway network

## 0 引言

当今社会,网络系统与人们的生活联系越来越紧密,这促使学者花费大量的精力研究与之相关的问题<sup>[1-3]</sup>。例如,提出一些网络属性,如平均节点度,平均最短路径,平均中间性和连通性等研究这类系统的拓扑结构<sup>[4-5]</sup>。在全球化和气候变化背景下,网络系统在面临自然或人为灾害时表现得越来越脆弱。例如,2010年冰岛火山给欧洲民航系统造成了巨大的影响,导致大面积的机场关闭和航班取消,受影响旅客数超过一千万人次<sup>[6]</sup>。因此,近些年,学者们越来越关注网络系统脆弱性的研究工作<sup>[7-9]</sup>。

一般地,传统网络属性能够反映网络系统的重要行为,于是常被用于研究网络系统的脆弱性<sup>[10-12]</sup>。常用方法是通过分析某一灾害对特定网络属性的影响确定整个系统在面临该灾害时的脆弱性水平,例如最大流量法<sup>[13]</sup>,最短路径法<sup>[14]</sup>,连通性法<sup>[15]</sup>,系统流量法<sup>[16]</sup>等。这些方法的基本思想是,当一个网络系统面临灾害时,识别出该系统中的一些关键节点或者连接,这些节点或者连接因灾害被移除或者失效将对所关注的系统网络属性产生最

收稿日期:2015-11-09;修回日期:2016-03-24

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB955404);国家自然科学基金创新研究群体科学基金(41321001);中央高校基本科研业务费专项资金(2013NT19)

作者简介:李航(1989-),男,陕西岐山人,博士研究生,主要研究方向为复杂系统风险和安全。

严重的影响。例如,在评价一个灾害对某一网络系统最短路径的影响时,通常旨在找到这样的节点或者连接,如果它们失效,将会最大限度增加源节点和目标节点间的最短路径。可以看出,传统网络属性法主要通过识别系统中最脆弱的节点或连接反映整个系统的脆弱性水平。这一方法对研究网络系统在面临小尺度灾害,如恐怖袭击,交通事故等时的脆弱性水平可能很有帮助。但对研究网络系统在面临大尺度的空间灾害,如极端天气,自然灾害等时往往失效。因为当一个网络系统在面临大尺度的空间灾害时,该灾害不仅会影响其覆盖面积内的系统节点和连接,而且会由于系统本身节点间的连接作用,影响灾害覆盖面积外的节点和连接,从而对整个系统产生全局性影响。因此,仅识别出单个的脆弱性节点或者连接,无法反映一个系统在面临大尺度空间灾害时的真实脆弱性水平。正如 Helbing<sup>[17]</sup>所强调,传统上以节点为核心的方法很难帮助我们进行网络系统的风险评价和管理。特别地,在一个网络系统中,灾害的发生通常是局域性的,而灾害的影响可能通过节点间的连接在该系统中扩散出去。因此,需要开拓思路,探索新方法解决这个问题。

新近提出的空间脆弱性模型<sup>[18]</sup>可以为解决上述问题提供一种思路。该模型重点关注空间灾害对网络系统造成的全局性影响。它考虑3个空间因素,灾害位置,灾害覆盖范围,灾害全局性影响(包括直接影响和间接影响),引入中性线和影响曲线,并提出两个空间脆弱性指数,绝对空间脆弱性指数( $V_{ASVI}$ )和相对空间脆弱性指数( $V_{RSVI}$ ),研究网络系统在面临空间灾害时的真实行为。然而,需要注意的是,文<sup>[18]</sup>只是一个初级研究成果,新的空间脆弱性模型还需要进一步地改进和扩展。例如,中性线和影响曲线是量化网络系统空间脆弱性的核心概念,于是,就有两个基本问题:1)对于具体的网络系统,如何定义灾害影响曲线和中性线最合适?2)新的空间脆弱性模型和传统网络属性存在什么联系,比如最短路径和连通性,哪个属性更适合研究网络系统的空间脆弱性?

因此,本文探讨了空间脆弱性与传统网络属性的关系,并尝试基于传统网络属性丰富空间脆弱性模型灾害影响曲线和中性线的定义。一方面,为网络系统面临空间灾害时的脆弱性研究提供一种新思路。另一方面,进一步提升空间脆弱性模型的实用性。

## 1 空间脆弱性模型

首先,就脆弱性定义而言,学者们从不同的角度给出了多样化的描述和解释<sup>[19-22]</sup>。然而,在定义脆弱性时,很少关注空间灾害对系统造成的全局性影响。因此,空间脆弱性模型首先给出了空间脆弱性的定义。简单地说,该模型将一个网络系统的空间脆弱性定义为:暴露于空间灾害下的给定系统容易受到损害的可能程度。这里的空间灾害指一个灾害在空间上具有一定范围,如暴雨和地震。

根据上述定义,计算空间脆弱性需要考虑两个因素,灾害覆盖面积和灾害全局性影响。于是,对于给定的灾害强度,可以建立两者间的函数关系,得到一条灾害影响曲线。然而,仅有灾害影响曲线还不能真实地评价一个网络系统的空间脆弱性。模型进一步引入中性线的概念。

简单地说,中性线反映了一个网络系统在面临空间灾害时抵御灾害能力的一种预期。中性线的提出源于一个争议问题,即脆弱性是绝对概念还是相对概念?例如,假设一个8.0级地震发生在一个城市,但是,灾害对该城市仅造成了10 000元人民币的损失。那么,这座城市是否对地震灾害表现出脆弱性?根据绝对脆弱性概念,只要灾害对系统造成损失,该系统则被认为具有脆弱性。然而,根据认知常识,这座城市实际对地震灾害具有鲁棒性。因为地震给它造成的损失非常少。很显然,绝对脆弱性概念容易错误地认识系统在面临灾害时的行为,相对脆弱性概念则会避免这种情况。因为它要求只有灾害造成的损失达到或超过一定水平,才认为系统具有脆弱性。空间脆弱性模型引入中性线,采用相对脆弱性的概念。换句话说,在该模型中,一个网络系统的空间脆弱性为0,并不意味灾害的全局性影响为0。对于给定的灾害强度和灾害覆盖面积,可以定义一个灾害影响预期的阈值。如果实际的灾害影响等于该阈值,则系统对这一灾害表现为中性,也即,系统对该灾害的脆弱性为0。如果实际的灾害影响在阈值之上,则认为系统对这一灾害具有脆弱性。如果实际的灾害影响在阈值之下,则系统对这一灾害具有鲁棒性。在给定灾害强度下,不同灾害覆盖面积可能存在多个灾害影响预期的阈值。当灾害覆盖面积从0覆盖到整个系统,由一系列阈值构成的曲线则称为该灾害强度下的中性线。中性线一般根据实际情况确定,一个合理的中性线定义对研究网络系统的空间脆弱性非常重要。

确定了灾害影响曲线和中性线,就可以分析一个网络系统的空间脆弱性。在空间脆弱性模型中,为得到灾害影响曲线,用灾害覆盖面积比例代替灾害覆盖面积大小。而一个灾害对网络系统造成的全局性影响因问题而异。例如,文章第二节将特别地讨论如何运用传统网络属性定义灾害的全局性影响。简单起见,本节用网络系统中实际受影响节点的比例定义灾害的全局性影响。很显然,对于每个灾害覆盖面积比例,实际受影响节点的比例越

大,系统对该灾害的空间脆弱性则越高。需要注意,即使相同的灾害覆盖面积比例,由于灾害位置不同,实际受影响节点的比例也会有差异。因此,模型进一步引入实际受影响节点平均比例的概念。对于给定的灾害覆盖面积比例,进行多次灾害仿真实验可以得到实际受影响节点的平均比例。于是,改变灾害覆盖面积比例从0%到100%,对于每个灾害覆盖面积比例,通过仿真或历史数据确定相应的实际受影响节点的平均比例,从而得到灾害影响曲线(如图1a中深色实线和浅色实线所示)。对于中性线,简单起见,本节根据一个认知常识确定,即实际受影响节点比例与灾害覆盖面积比例成正比。于是,中性线则为过(0%,0%)和(100%,100%)两点的一条直线(如图1a中深色虚线所示)。于是,根据上述灾害影响曲线和中性线定义,则可以定性地判断一个网络系统在面临空间灾害时是否具有脆弱性。具体地说,如果灾害影响曲线整体上在中性线以上,则该系统对空间灾害具有脆弱性(如图1a中深色实线所示)。如果灾害影响曲线整体上在中性线以下,则该系统对空间灾害具有鲁棒性(如图1a中浅色实线所示)。

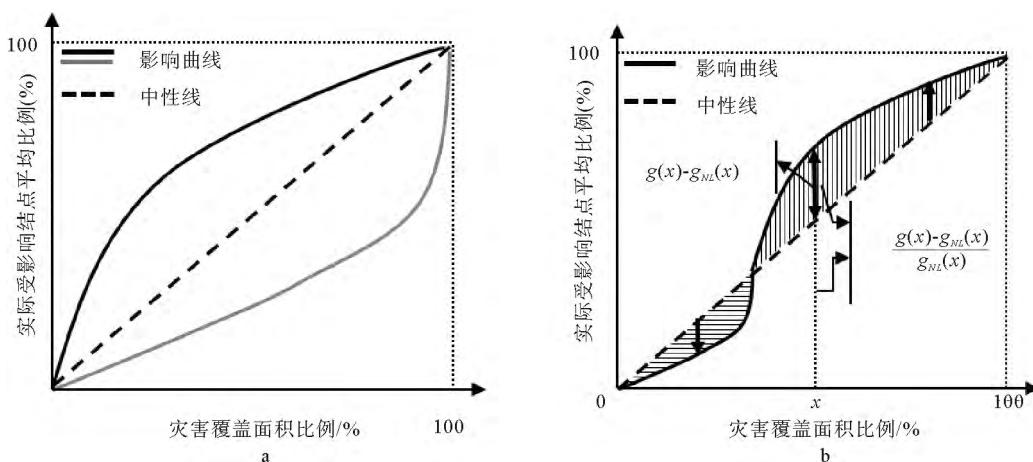


图1 影响曲线,中性线和空间脆弱性计算

Fig. 1 Calculations of impact curve, neutral curve and spatial vulnerability

更进一步,根据灾害影响曲线和中性线,可以得到确定性指标,定量分析一个网络系统的空间脆弱性。空间脆弱性模型提出两个指数:绝对空间脆弱性指数( $V_{ASVI}$ )和相对空间脆弱性指数( $V_{RSVI}$ )。 $V_{ASVI}$ 的数学表达式为

$$V_{ASVI} = \int_0^1 (g(x) - g_{NL}(x)) dx \quad (1)$$

其中, $x$ 指灾害覆盖面积比例, $g(x)$ 指灾害覆盖面积比例 $x$ 下实际受影响节点的平均比例, $g_{NL}(x)$ 指相应的中性线值。根据本节中性线的定义,则:

$$g_{NL}(x) = x \quad (2)$$

可以看出, $V_{ASVI}$ 通过计算灾害覆盖面积比例从0%到100%过程,灾害影响曲线和中性线差值的积分和得到。 $V_{ASVI}$ 的提出很重要,因为灾害影响曲线存在部分在中性线上,而另一部分在中性线下的情况,如图1b所示。

更进一步,通常需要比较不同网络系统在相同灾害情景下的空间脆弱性水平。例如,比较中国民用航空网络和美国民用航空网络在面临暴雨灾害时的空间脆弱性水平。直接比较 $V_{ASVI}$ 没意义,一种合理的比较方法是计算它们的 $V_{RSVI}$ 。 $V_{RSVI}$ 的数学表达式为

$$V_{RSVI} = \int_0^1 \frac{g(x) - g_{NL}(x)}{g_{NL}(x)} dx \quad (3)$$

更多有关 $V_{ASVI}$ 和 $V_{RSVI}$ 的细节解释和讨论见文献[18]。基本上,一个更大的正 $V_{ASVI}$ 或者 $V_{RSVI}$ 数值表示一个系统更加脆弱,而一个更小的负 $V_{ASVI}$ 或者 $V_{RSVI}$ 数值表示一个系统更加鲁棒。

## 2 与传统网络属性的关系

合理的灾害影响曲线和中性线定义对研究网络系统的空间脆弱性非常重要。通常地,中性线和灾害影响曲线的定义依实际情况确定。本节将详细探讨空间脆弱性和传统网络属性的关系,并基于传统网络属性,提出定义中性线和灾害影响曲线的新方法,提升空间脆弱性模型的实用性。

首先,就中性线而言,它一般反映了网络系统抵御灾害能力的一种预期,文章第一节根据认知常对中性线进行了简单定义。然而,在复杂的实际问题中,这样的预期通常很难确定。因此,需要探索更普遍的方法定义中性线。本节将通过建立基准网络来定义中性线。一般而言,相对于解释实际网络在面临空间灾害时的期望响应,人们更容易描述一个基准网络的拓扑结构。因此,基于具体化的基准网络定义中性线将相对简单可行。需要注意,基准网络的建立也因情况而异。根据基准网络定义中性线有3步:1)对于给定的实际网络,选择所关注的网络属性;2)建立与所选属性数值相同或相似的基准网络;3)计算暴露于与实际网络相同灾害情景下基准网络的灾害影响曲线,以此曲线作为实际网络在面临该灾害时的中性线。例如,实际网络的平均节点度为2,则可以建立与该网络具有相同节点数和/或连接数的单环网络作为基准网络。之后,将基准网络暴露于与实际网络相同的灾害情景下,计算基准网络的灾害影响曲线。并以此曲线作为实际网络的中性线。

就灾害影响曲线而言,它的定义也因具体问题而异。本节将特别地关注基于传统网络属性定义灾害影响曲线的可能性。目前,很多传统网络属性,例如平均最短路径,平均中间性和连通性被认为与网络系统的脆弱性有关。而空间脆弱性模型为研究面临空间灾害时网络系统的脆弱性提出一种新思路。于是,有以下问题:这些传统网络属性与空间脆弱性模型存在什么关系?能否将这些传统属性运用于空间脆弱性模型?答案是肯定的。由于传统网络属性通常反映了网络系统的重要行为,那么,一个灾害对网络系统的影响或许可以通过它对系统网络属性的影响反映。因此,在空间脆弱性模型中,可以用空间灾害对系统网络属性的影响定义它对系统造成的影响。通过这一方法,则可以建立传统网络属性和空间脆弱性模型的关系。

本文从数学的角度将传统网络属性与空间脆弱性模型相结合。选取3个传统网络属性,平均最短路径,平均中间性和连通性进行分析。

1)平均最短路径。一般地,对于一个包含 $n$ 个节点的网络系统,假设该系统中,任意两个节点 $i$ 和 $j$ 间的最短路径为 $L_{sp}(i,j)$ ,方便起见,当这两个节点间没有连接时,设 $L_{sp}(i,j)=0$ 。于是,该系统的平均最短路径 $L_{ASP}$ 为

$$L_{ASP} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{SP}(i,j)}{n \times (n-1)} \quad (4)$$

2)平均中间性。一般地,在一个网络系统中,节点 $k$ 的中间性通常指从任意节点 $i$ 到其他任意节点 $j$ 的最短路径中经过节点 $k$ 的最短路径数目,记为 $\sum_{k \neq i \neq j} \sigma_{ij}(k)$ ,其中 $\sigma_{ij}$ 指从任意节点 $i$ 到任意其他节点 $j$ 的所有最短路径, $\sigma_{ij}(k)$ 指通过节点 $k$ 的最短路径的数目。于是,该系统的平均中间性 $B_{AVE}$ 为

$$B_{AVE} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{k \neq i \neq j} \sigma_{ij}(k)}{n} \quad (5)$$

3)连通性。一般地,一个网络系统的连通性定义为首先建立一个 $n \times n$ 矩阵,记为 $R$ 。对于任意一对节点 $i$ 和节点 $j$ ,如果两者间存在一条路径使其相互连接,则 $R(i,j)$ 为1,否则为0。于是,该系统的连通性 $C$ 为

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R(i,j) \quad (6)$$

此外,也可以根据传统网络属性提出新的指标研究空间脆弱性。例如,将受灾害影响最短路径数目作为新指标。它的定义为,首先,建立两个 $n \times n$ 矩阵, $S1$ 和 $S2$ 。 $S1(i,j)$ 记录了灾害发生前系统中任意节点 $i$ 和 $j$ 之间的最短路径, $S2(i,j)$ 记录了灾害发生后节点 $i$ 和节点 $j$ 的最短路径。于是,一个灾害对系统最短路径数目的总影响 $I_{SP}$ 为

$$I_{SP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i, j=1}^n \alpha(S_1(i,j), S_2(i,j)) \quad (7)$$

其中,如果 $S1(i,j)=S2(i,j)$ , $\alpha(S_1(i,j), S_2(i,j))$ 返回0,否则返回1。

于是,通过灾害对以上4个网络属性的影响定义它对系统的全局性影响,从而得到相应的灾害影响曲线。中性线则通过计算与实际网络具有相同网络属性值的基准网络灾害影响曲线得到。最后,根据新的灾害影响曲线和中性线定义,则可以计算网络系统的 $V_{ASVI}$ 和 $V_{RSVI}$ 值,分析该系统在面临空间灾害时的脆弱性水平。

假设,选取平均最短路径研究网络系统的空间脆弱性。设系统的初始平均最短路径为 $L$ 。在给定灾害覆盖面积比例 $x$ 的灾害发生后,系统的平均最短路径为 $L(x)$ 。于是,灾害覆盖面积比例 $x$ 下,该灾害对系统最短路径造成的影响则为 $L(x)-L$ 。当灾害覆盖面积比例 $x$ 从0变化到100%,相应地,可以得到基于平均最短路径的

灾害影响曲线。在确定中性线时,需要得到基于平均最短路径的基准网络的灾害影响曲线。假定灾害发生前基准网络的平均最短路径为  $L_{BM}$ ,灾害发生后为  $L_{BM}(x)$ 。于是,根据所得到的灾害影响曲线和中性线,则可以计算该网络系统的  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$ ,确定该系统的空间脆弱性水平,具体的数学表达式为

$$V_{ASVI} = \int_0^1 ((L(x) - L) - (L_{BM}(x) - L_{BM})) dx \quad (8)$$

$$V_{RSVI} = \int_0^1 \frac{(L(x) - L) - (L_{BM}(x) - L_{BM})}{L_{BM}(x) - L_{BM}} dx \quad (9)$$

不难发现,式(8)和式(9)实际上是运用平均最短路径长度的变化研究网络系统的空间脆弱性。

当选择平均中间性时,用  $B$ ,  $B(x)$ ,  $B_{BM}$  和  $B_{BM}(x)$  代替式(8)和式(9)中的  $L$ ,  $L(x)$ ,  $L_{BM}$  和  $L_{BM}(x)$ , 分别为给定网络系统灾前和灾后的平均中间性和基准网络灾前灾后的平均中间性。

当选择连通性时  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  的公式变为

$$V_{ASVI} = \int_0^1 ((C - C(x)) - (C_{BM} - C_{BM}(x))) dx \quad (10)$$

$$V_{RSVI} = \int_0^1 \frac{((C - C(x)) - (C_{BM} - C_{BM}(x)))}{C_{BM} - C_{BM}(x)} dx \quad (11)$$

其中,  $C$ ,  $C(x)$ ,  $C_{BM}$  和  $C_{BM}(x)$  分别为灾前灾后给定网络的连通性和基准网络灾前灾后的连通性。

当选取受影响最短路径数目时,  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  则需要通过公式(12), (13)计算:

$$V_{ASVI} = \int_0^1 (I_{SP}(x) - I_{BM}(x)) dx \quad (12)$$

$$V_{RSVI} = \int_0^1 \frac{(I_{SP}(x) - I_{BM}(x))}{I_{BM}(x)} dx \quad (13)$$

其中,  $I_{SP}(x)$  为灾害覆盖面积比例为  $x$  时给定网络受影响最短路径的数量,  $I_{BM}(x)$  为相应的基准网络受影响最短路径的数量。

从式(8)到式(13)可以发现,  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  的计算与文章第一节有关  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  的理论定义形式相同, 即式(1)和式(3)。然而, 依据所选取研究灾害全局性影响的具体网络属性, 实际的计算公式与式(1)和(3)有略微不同。一方面, 它反映出灾害影响曲线和中性线定义因问题而异的特点。另一方面, 它对如何修改  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  的计算公式, 以将传统网络属性结合到空间脆弱性模型中提供参考。

### 3 案例研究

本节以北京地铁网络为例进行简单的案例研究, 验证空间脆弱性模型和传统网络属性的关系, 以及基于传统网络属性新的灾害影响曲线和中性线定义的实用性。实际上, 本研究进行了 4 个仿真实验, 即空间脆弱性模型的灾害影响曲线和中性线分别基于平均最短路径, 平均中间性, 连通性和受影响最短路径数量定义。

本案例中, 假定灾害在空间上均匀分布。北京地铁网络根据 2015 年北京地铁数据建立, 共包括 269 个地铁站, 如图 2 所示。为保证研究的简洁性和有效性, 将任意节点间的最短路径记为节点间通过的最少地铁站数目。

对于给定的网络属性, 相应的灾害影响曲线通过计算灾害对该属性的实际影响得到。例如, 灾害对平均最短路径的影响通过计算灾害覆盖面积比例从 0 到 100% 时, 平均最短路径的变化得到。在确定中性线时, 如前所述, 需要为北京地铁网络建立基准网络。由于北京地铁网络的平均节点度为 2.2528, 数值在 2 到 3 之间。于是, 建立两个基准网络, 一个单环网络, 平均节点度为 2, 一个双环网络, 平均节点度为 3, 如图 3 所示。对于给定的网络属性, 根据两个基准网络得到两条灾害影响曲线, 将两个基准网络的平均影响曲线定义为中性线。于是, 根据灾害影响曲线和中性线, 则可以分析北京地铁网络的空间脆弱性。

具体的仿真结果见表 1 和图 4。在图 4 中, 蓝色虚线表示中性线, 红色实线表示灾害影响曲线, 每个绿点表示一个随机灾害仿真结果。从表 1 和图 4, 可以得到以下结论:

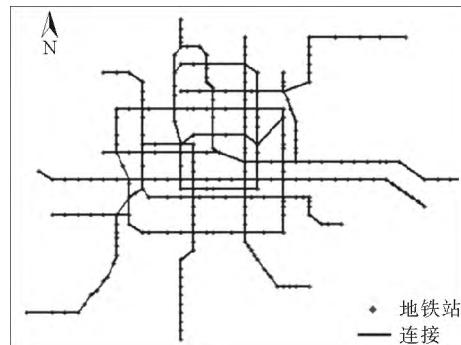


图 2 北京地铁网络示意图

Fig. 2 sketch map of Beijing's subway network

在仿真1中,关注空间随机灾害对平均最短路径的影响,相应的 $V_{ASVI}$ 值为1.877 6, $V_{RSVI}$ 值为-2 434 4。这一结果自相矛盾。根据 $V_{ASVI}$ 的结果可以得出,北京地铁网络对空间随机灾害具有脆弱性。而 $V_{RSVI}$ 的结果表明,北京地铁网络对空间随机灾害具有鲁棒性。于是,根据平均最短路径的变化,无法确定北京地铁网络的空间脆弱性。另一方面,这一结果说明平均最短路径可能不适合研究网络系统的空间脆弱性。实际上,这一结果可以理解。一方面,可能预期灾害发生会导致平均最短路径的增加(例如,图4a中,当灾害覆盖

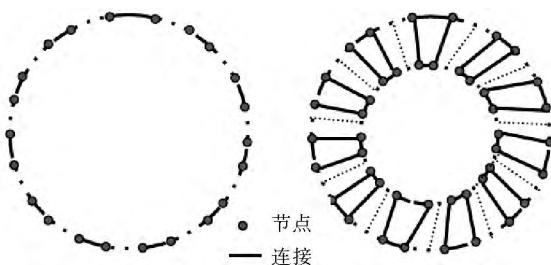


图3 基准网络:单环网络和双环网络

Fig. 3 Benchmark networks: A monocyclic network and a dicyclic network

表1 北京地铁网络空间脆弱性仿真结果

Tab. 1 Simulation results on the spatial vulnerability of the Beijing subway network

	仿真1 (基于平均最短路径变化)	仿真2 (基于平均中间性)	仿真3 (基于连通性)	仿真4 (基于受影响最短路径数量)
$V_{ASVI}$	1.877 6	1.760 4	-5.902 1	-1.125 6
$V_{RSVI}$	-2 434 4	-2 376 7	-8.286 6	-1.371 0

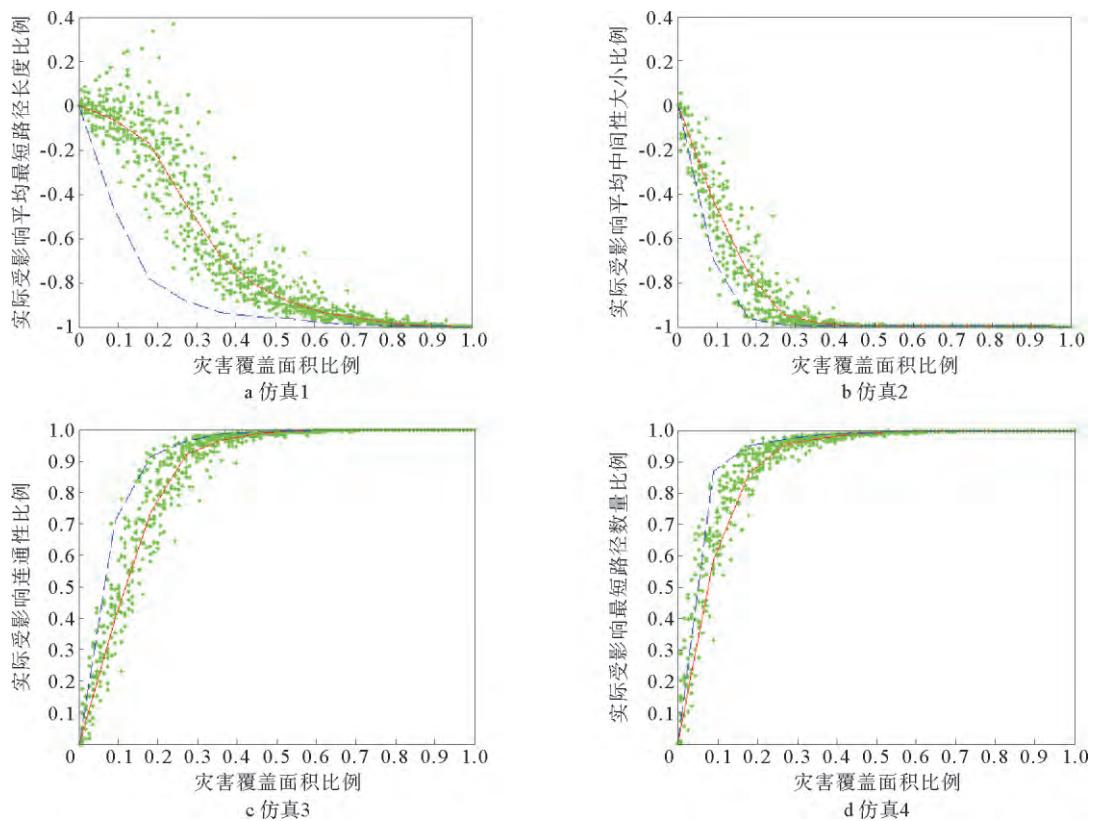


图4 北京地铁网络空间脆弱性仿真结果

Fig. 4 Simulation results on the spatial vulnerability of the Beijing's subway network

面积比例较小时,位置在0以上的绿点),因此,希望一个鲁棒性好的网络平均最短路径不会因灾害而增加过快。另一方面,也可能预期灾害发生将导致原有网络分割成几个子网络,退化最严重的系统将会有更多更小的子网络,这意味着平均最短路径会更大程度地减小(例如,图4a中,灾害覆盖面积比例较大时的绿点)。因此,希望一个鲁棒性好的网络的平均最短路径不会因灾害而减少太快。很显然,当关注网络系统脆弱性时,对于平均最短路径的变化存在两个矛盾的预期。这两个预期支持了基于 $V_{ASVI}$ 和 $V_{RSVI}$ 值的分析,即平均最短路径不适合研究网络系统的空间脆弱性。

在仿真 2 中,考虑了空间随机灾害对平均中间性的影响,与仿真 1 情况类似,  $V_{ASVI}$  值为正,而  $V_{RSVI}$  值为负。这表明平均中间性也不适合空间脆弱性研究。这一结果也可以解释。粗略地说,对于给定节点数的网络,更大的平均最短路径意味着更大的平均中间性。在面临空间灾害时,一个系统的平均最短路径变化存在两个自相矛盾的预期,相应地,平均中间性也存在这样的问题。因此,在定义鲁棒性网络时,我们对系统平均中间性的预期也非常模糊。

在仿真 3 中,考虑了空间随机灾害对北京地铁网络连通性的影响,相应的  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  值分别为 -5.9021 和 -8.2866。两个指数都小于 0,这意味着北京地铁网络对空间随机灾害具有鲁棒性。通常,我们总是希望一个灾害导致更少对原本连接的节点断开。仿真结果表明,北京地铁网络在保持连通性方面比基准网络更具鲁棒性。这一结果可以解释。在比较北京地铁网络和两个基准网络的拓扑结构时,如果随机地移除 2 个或者 4 个节点,基准网络比北京地铁网络有更大的可能断开更多原本连接的节点。这是因为,移除 2 个或者 4 个节点很可能将基准网络划分为两个相似大小的子网络,而对北京地铁网络则不会。为了更具说明性,假设有两个节点数为 12 的网络,在随机移除每个网络中的 2 个节点后,一个系统被分割为两个节点数均为 5 个子网络(代表基准网络)。同时,另一个网络被割裂为两个不同的子网络,一个节点数为 1,另一个节点数为 9(代表北京地铁网络)。对于第一个网络,受灾害影响被迫分开的节点对数为 25,而对第二个网络,分开的节点对数仅为 9。根据这一直观例子也可以看出,北京地铁网络更加鲁棒。于是,可以推断,连通性适用于研究网络系统的空间脆弱性。

仿真 1 得出平均最短路径的变化不适合研究网络系统空间脆弱性。然而,仿真 4 的结果表明,因灾害受影响最短路径的数量这一指标对于研究空间脆弱性有效。根据仿真 4 的结果,相应的  $V_{ASVI}$  和  $V_{RSVI}$  值均小于 0,同时,实际影响曲线也明显位于中性线以下。这说明,当考虑灾害对最短路径数量的影响时,北京地铁网络对空间随机灾害具有更好的鲁棒性。这一结果也解释。北京地铁网络的初始平均中间性为 3.646,而两个基准网络的平均中间性分别为 17.689 和 8.845。通常地,拥有更大平均中间性的网络意味着在移除一个节点后可能会影响更多的最短路径。由于北京地铁网络比两个基准网络有更小的平均中间性,于是,随机移除节点将会对北京地铁网络的最短路径产生更少的影响。

## 4 结论

基于传统网络属性,即,平均最短路径,平均中间性,连通性和受影响最短路径数量,重新定义灾害影响曲线和中性线研究空间脆弱性,探讨了空间脆弱性模型和传统网络属性的关系。并以北京地铁网络为例进行案例研究,验证空间脆弱性模型和传统网络属性的关系。仿真结果表明,空间脆弱性模型可以分析传统网络属性是否适合研究网络系统的空间脆弱性,一旦合理地与传统网络属性结合,该模型可以为研究空间灾害下网络系统的脆弱性提供行之有效的方法。同时,本研究也进一步提升了空间脆弱性模型的实用性。

## 参考文献:

- [1] Palla G, Derenyi I, Farkas I, et al. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society[J]. *Nature*, 2005, 435(9): 814-818.
- [2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286: 509-512.
- [3] 罗贊騫,汤锦辉,赵钟磊,等. 中国航空交通网络时变和多层次特性分析[J]. 复杂系统和复杂性科学,2014,11(4):4-9.
- [4] Luo Yunqian, Tang Jinhui, Zhao Zhonglei, et. al. Analysis of Chinese airport network's time-varying and multi-layered features[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2014,11(4):4-9.
- [5] 孟仲伟,鲁宗相,宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化,2004,25(15):21-24.
- [6] Meng Zhongwei, Lu Zongxiang, Song Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004,25(15):21-24.
- [7] 刘业政,周云龙. 无尺度网络平均路径长度的估计[J]. 系统工程理论与实践,2014,34(6):1566-1571.
- [8] Liu Yezheng, Zhou Yunlong. Estimation for the average path length of scale-free networks [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(6):1566-1571.
- [9] Mazzocchi M, Hanssstein F, Ragona M. The 2010 volcanic ash cloud and its financial impact on the European airline industry [J]// CESifo Forum. 2010,11(2): 92-100.
- [10] 杨露萍,钱大琳. 道路交通网络脆弱性研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,12(2):105-110.
- [11] Yang LuPing, Qian DaLin. Vulnerability analysis of road networks [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011,12(2):105-110.

(下转第 65 页)

- ence on Geoinformatics (GEOINFORMATICS). Hong Kong: IEEE, 2012: 1-5.
- [21] Gulati R, Sytch M, Tatarynowicz A. The rise and fall of small worlds: Exploring the dynamics of social structure[J]. Organization Science, 2012, 23(2): 449-471.
- [22] 周璇,张凤鸣,李克武,等.利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J].物理学报,2012,61(5):050201.
- Zhou Xuan, Zhang Fengming, Li Kewu, et al. Use importance evaluation matrix to determine the complex network nodes [J]. Journal of Physics, 2012, 61(5): 050201.
- [23] 任晓龙,吕琳媛.网络重要节点排序方法综述[J].科学通报,2014,13:1175-1197.
- Ren Xiaolong, Lv Linyuan. Review of ranking nodes in complex networks[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 13: 1175-1197.
- [24] Zhang X, Cheng G, Ge W Y, et al. Summarizing vocabularies in the global semantic web[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(1): 165-174.

(责任编辑 耿金花)

(上接第7页)

- [8] Liu H, Hu X B, Yang S N, et al. Application of complex network theory and genetic algorithm in airline route networks[J]. Transportation Research Record, 2011, 2214: 50-58.
- [9] 许凤,朱金福,苗建军.基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J].复杂系统和复杂性科学,2015,12(1):1-6.
- Xu Feng, Zhu JinFu, Miao JianJun. The robustness of high-speed railway and civil aviation compound network based on the complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015,12(1):1-6.
- [10] 王志强,李欣,李岩,等.基于复杂网络与风险的电网综合脆弱性评估[J].现代电力,2014,31(3):49-55.
- Wang ZhiQiang, Li Xin, Li Yan, et al. Comprehensive vulnerability evaluation of power grid based on complex network and risk theory [J]. Modern Electric Power, 2014,31(3):49-55.
- [11] 尹洪英,徐丽群.道路交通网络脆弱性评估研究现状与展望[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(3):7-13.
- Yin HongYing, Xu LiQun. Vulnerability assessment of transportation road networks [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010,10(3):7-13.
- [12] 叶青.基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析[J].中国安全科学学报,2012,22(2):122-126.
- Ye Qing. Vulnerability analysis of rail transit based on complex network theory [J]. China Safety Science Journal, 2012,22(2):122-126.
- [13] Wollmer R. Removing arcs from a network[J]. Operation research, 1964,12(6): 934-940.
- [14] Corley H W, Sha D Y. Most vital links and nodes in weighted networks[J]. Operations Research Letters, 1982,1(4):157-160.
- [15] Grubesic T H, O'Kelly M E, Murray A T. A geographic perspective on commercial Internet survivability[J]. Telematics & Informatics, 2003, 20(1):51-69.
- [16] Murray A T, Matisziw T C, Grubesic T H. Critical network infrastructure analysis: interdiction and system flow[J]. Journal of Geographical Systems, 2007,9(2): 103-117.
- [17] Helbing D. Globally networked risks and how to respond[J]. Nature, 2013,497: 51-59.
- [18] 李航,郭晓梅,许珍,等.空间局域性灾害下网络系统的空间脆弱性研究[J].自然灾害学报,2015,24(6):19-32.
- Li Hang, Guo XiaoMei, Xu Zhen, et al. Research on spatial vulnerability of network systems under spatially local hazards[J]. Journal of Natural Disasters, 2015,24(6):19-32.
- [19] 李鹤,张平宇,程叶青.脆弱性的概念及其评价方法[J].地理科学进展,2008,27(2):18-25.
- Li He, Zhang PingYu, Chen YeQing. Concepts and assessment methods of vulnerability [J]. Progress in Geography, 2008,27(2):18-25.
- [20] Strihou J P V Y D. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, summary for policymakers[M]// Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001.
- [21] Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. Social vulnerability to environmental hazards[J]. Social Science Quarterly, 2003,84(2): 242-261.
- [22] Shi P, Ning L I, Qian Y E, et al. Research on global environmental change and integrated disaster risk governance[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(4):428-435.

(责任编辑 耿金花)