

蓄意攻击下全球集装箱海运网络脆弱性变化

王 诺,董玲玲,吴 暖,颜华锬

(大连海事大学交通运输管理学院,大连 116026)

摘要: 为探究近年来全球集装箱海运网络脆弱性的变化趋势,提出了研究网络脆弱性变化度的分析思路和量化方法。基于2004和2014年两个年度的世界主要集装箱班轮公司航线分布数据,将相关港口按节点度大小排序后以1%~10%的比例逐步删除,选择删除前后的网络平均度、网络聚类系数、网络孤立节点比例、网络平均距离和网络效率等特征值的变化率作为量化指标;提出了网络压力测试方法,由此求出各特征值对网络脆弱性的影响权重及贡献值,进而得到了在设定攻击规模内集装箱海运网络脆弱性变化的量化值。研究结果表明:在蓄意攻击下,近10年的全球集装箱海运网络的脆弱性呈变差趋势;当攻击规模为整体网络的10%以内时,网络脆弱性的变差幅度约为6.1%。研究成果对于深化港口地理学研究具有重要意义,其分析思路和方法对其他领域的网络脆弱性变化趋势研究也可提供借鉴。

关键词: 集装箱;海运;网络;蓄意攻击;脆弱性

DOI: 10.11821/dlxb201602009

1 引言

随着世界经济一体化的进程不断加快,集装箱海上运输已成为推动全球经济发展的重要引擎。在当前全球集装箱港口和航线不断增加、恐怖主义肆意蔓延的背景下,研究全球集装箱海运网络在扩展过程中脆弱性的变化趋势,预测集装箱港口遭到蓄意攻击时整个海运网络受到的影响程度,对于制定港口规划、设置航线、建立更为可靠的海运网络体系和世界经济运行安全机制具有重要意义。

在地理学领域,脆弱性概念常见于灾害管理、生态学、公共健康、气候变化、土地利用、可持续性科学、经济学、工程学等方面的研究^[1],如气候变化背景下生态系统脆弱性评估^[2]及自然灾害脆弱性评估^[3]等。进入21世纪,此类研究开始转至对特殊类型城市的经济社会^[4]、人地系统的脆弱性^[5]以及对城市脆弱性的综合测度与空间分异特征的分析^[6]。由于不同应用领域的研究对象和学科的视角不同,对“脆弱性”概念的界定角度和方式有很大差异,如自然灾害、气候变化等自然科学领域认为脆弱性是系统由于灾害等不利影响而遭受损害的程度或可能性,侧重研究单一扰动所产生的多重影响;社会科学领域认为脆弱性是系统承受不利影响的能力,注重分析脆弱性产生的原因等。

与上述角度不同,交通网络的脆弱性概念通常是指当采取有选择删除(蓄意攻击)网络的部分节点或者边时对网络连通性的影响程度。此部分研究成果较为集中^[7-9],包括如何选择网络体系的要素,分析网络的脆弱性^[10];计算删除节点和边后的网络效能损

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(71372087) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.71372087]

作者简介: 王诺(1954-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交通运输规划研究。

E-mail: wangnuodl@126.com

失^[11-12]；建立基于网络平均节点度的攻击模型^[13]和网络级联失效模型^[14]，以及动态情景下基于级联失效条件的复杂网络抗毁性能研究^[15]等。在应用上，具体研究了轨道交通体系的可靠性和车站故障对整个交通网络的影响程度^[16-19]，集装箱海运网络的拓扑特性^[20-21]和有选择攻击下海运网络的脆弱性^[22-25]，集装箱环球航线的枢纽区位优势^[26]，国际集装箱枢纽港的形成演化机理与发展模式^[27]，中国沿海集装箱港口体系的演化机理^[28]以及世界集装箱港的形成^[29]等。

分析上述研究成果可以发现，集装箱海运网络的脆弱性问题与地理学领域中所研究的生态学以及城市学的脆弱性概念既有联系，又有区别。尽管很多学者对此类问题在交通网络上做过探讨，但对于网络脆弱性研究还存在明显不足，主要表现在：①在删除网络的节点过程中，通常只对网络特征值本身开展研究，而对于网络节点被删除前后的变化缺少分析；②对随时间不断扩展的网络，缺少不同时空网络特征值相应变化的对比分析；③在客观判断网络脆弱性变化的测度方面，缺少相应的量化分析。本文认为，集装箱海运网络的脆弱性具有一定的客观属性，不仅要通过网络节点被删除前后各网络特征值的变化来度量网络本身的结构特性，而且当网络体系处于不断扩展时，还需要从时空跨度对网络特征相应变化进行对比分析，应用某种测度方法洞察整个网络体系脆弱性的变化趋势并得到相应的量化结果。针对以上问题，本文利用2004和2014两个年度的全球主要集装箱班轮公司挂靠港口和航线分布数据，采取有选择攻击节点作为删除策略，提出了研究网络脆弱性变化度的新思路 and 量化方法，最终得到全球集装箱海运网络脆弱性随时间的变化趋势以及变化幅度。

2 海运网络特点分析

2.1 网络模型

近几十年来，海上运输正从传统的散杂货直达运行方式向着现代的集装箱中转运行方式转变。随着集装箱港口和航线的不断增加，在全球范围内迅速形成了由枢纽港、干线港、支线港以及喂给港等分工有序的复杂网络体系。在地缘特征上，以苏伊士运河、马六甲海峡以及巴拿马运河走廊构成了集装箱环球海运主航道，其航运核心区已逐步从欧洲至北美，再从北美向东北亚转移。在功能上，枢纽港和干线港以承担集装箱中转业务为主，班轮依次挂靠，航线设置密集；支线港和喂给港主要与邻近的枢纽港通航，班轮往返直开，航线相对较少。在海运网络的形成过程中，枢纽港居于核心地位，但数量较少；喂给港数量较多，但对运输网络的影响有限。从网络脆弱性的特性出发，以枢纽港及干线港等具有中转业务的港口群作为研究对象，将更有利于挖掘网络的本质特性。因此，本文分别选择2004年和2014年集装箱运量排名前25位班轮公司（占全球总运力80%以上）挂靠的所有港口和开辟的航线（不计各船公司重叠航线）进行统计。结果显示：2004年，世界海运网络中共有集装箱港口503个，航线1436条；2014年，港口为634个，航线为2728条，分别比2004年增加了26%和17.8%，表明近10年全球的集装箱海运网络正处于迅速扩展中。

为便于理论分析，将全球集装箱海运网络中的各个港口抽象为网络节点，以 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_z\}$ 表示港口的集合， Z 表示港口的数量。设 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_s\}$ 为所有港口之间关系的集合， R_{ij} 表示港口 v_i 和港口 v_j 之间的联系状态（即是否建有班轮航线）。若 v_i 和 v_j 之间存在联系，则 $R_{ij} \neq \emptyset$ 且 $R_{ij} \subseteq R$ ；若 v_i 和 v_j 之间尚未建立联系，则 $R_{ij} = \emptyset$ 。将 v_i 和 v_j 存在的联系抽象为网络的边，其矩阵表达式为：

$$E_{z \times z} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,z} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{z,1} & \cdots & e_{z,z} \end{bmatrix} e_{i,j} = \begin{cases} 1, R_{i,j} \subseteq R, R_{i,j} \neq \emptyset; \\ 0, R_{i,j} = \emptyset; \end{cases} \quad 1 \leq i, j \leq z \quad (1)$$

式中: $e_{i,j}=1$ 和 $e_{i,j}=0$ 分别表示 v_i 和 v_j 之间存在或不存在边的连接。

由以上分析, 全球集装箱海运网络可以用无向无权图 $W = (V, E)$ 表示, 为表达清晰, 选取节点度为30及以上的港口绘出相应的空间结构示意图(图1)。经统计分析, 得到各港口节点度及相应的概率分布曲线(图2)。港口节点度的概率满足截断递减幂律分布, 即度值(航线数)较大的节点(港口)所占的比例较小, 度值较小的节点所占的比例较大, 不同年度略有差异, 但概率分布基本相同。

容易证明, 当截断 $k=1$ 点后, 节点度的概率分布为:

$$p(k) \propto k^{-n} \quad (2)$$

式中: k 为网络中的节点度。

经拟合, 得到 $n_{2004} = 2.0394$, $n_{2014} = 2.0315$, 表明集装箱海运网络符合无尺度网络特征。统计结果显示: 2004年网络节点度最大的前3位分别为108、64和61; 到2014年, 已分别上升至119、95和87, 表明连通枢纽港的航线数又有较大幅度的增长, 网络结构的变化十分明显。分析发现, 目前港口节点度排名最前的是新加坡港、釜山港和巴生港, 都分布于亚洲地区。

2.2 删除策略

根据定义, 集装箱海运网络的脆弱性可以由部分节点在遭到蓄意攻击后, 网络连通性受到的影响程度来描述。为证明选取节点度较高的节点作为删除对象的合理性, 需要对网络的度一度相关性和介数进行分析判断。

设以边两端节点度的 Pearson 相关系数 r 来描述网络的度一度相关性^[30], 以 $[-1, 1]$ 之间变化的参量, 表示网络中某节点与其他节点是否会优先建立边的连接, 具体公式为:

$$r = \frac{M^{-1} \sum_{e_{ij}} k_i k_j - [M^{-1} \sum_{e_{ij}} \frac{1}{2} (k_i + k_j)]^2}{M^{-1} \sum_{e_{ij}} \frac{1}{2} (k_i^2 + k_j^2) - [M^{-1} \sum_{e_{ij}} \frac{1}{2} (k_i + k_j)]^2} \quad (3)$$

式中: k_i 、 k_j 分别表示连接边 e_{ij} 的两个节点 v_i 、 v_j 的度; M 表示网络的总边数。

容易证明, 度一度相关系数 r 的变化区间为 $0 \leq |r| \leq 1$ 。当 $r < 0$ 时, 网络各节点的节点度为负相关, 即度值高的节点优先与度值低的节点连接; 当 $r = 0$ 时, 网络各节点的节点度不相关, 表明连接任意两个节点为同等概率; 当 $r > 0$ 时, 网络各节点的节点度为

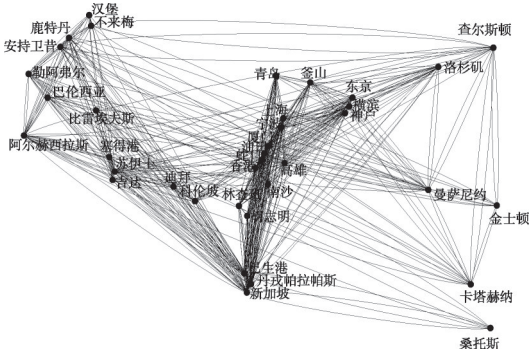


图1 集装箱航运网络空间结构示意图

Fig. 1 Spatial structure sketch map of container shipping network

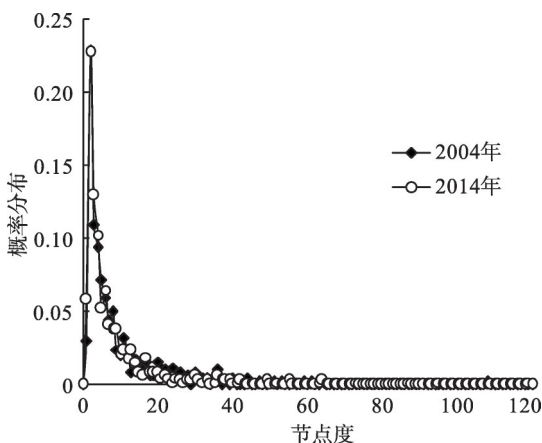


图2 2004和2014年集装箱海运网络节点度概率分布

Fig. 2 Node connectivity distribution of container-shipping network in 2004 and 2014

正相关,即节点度值高的节点优先与度值高的节点连接, r 值越大,优先连接的倾向就越明显。利用公式(3)对2004年和2014年集装箱海运网络节点度进行分析,得到度一度相关系数分别为 $r_{2004} = 0.0244$ 和 $r_{2014} = 0.0333$,表明集装箱海运网络在连接过程中度值高的节点优先与度值高的节点连接,2014年的这一倾向性比2004年更为明显。

理论上,衡量节点在网络中的重要性还应排除例外情况,因此还需要分析节点的全局几何量——介数。这是由于有可能存在节点度并不是很大,但却是连接两个局部网络的关键节点。如果该节点被删除,会导致两个区域的联系中断,因而要对集装箱海运网络是否存在这类节点进行甄别。

设介一度相关性以 $B(k) \sim k$ 表示,分析2004年和2014年的集装箱海运网络中所有度为 k 的节点平均介数值与 k 的相关关系。利用PAJEK软件,计算得到两者之间的相关系数分别为 $r_{2004} = 0.7969$ 和 $r_{2014} = 0.8723$,说明节点介数与度之间具有较强的相关性,即拥有较多航线的港口,其介数也会较大,而且2014年较2004年呈增长趋势。

以上分析表明,在集装箱海运网络中,节点度的特征值能够揭示出各港口在海运网络体系中的地位 and 作用,因而选择节点度值较大的港口作为目标进行逐步删除,对比删除前后网络特征值的影响程度,是衡量网络特性变化的有效方法。基于以上分析,本文将网络中节点按度的大小进行排序,以占网络节点总数1%~10%的比例进行删除,分别计算2004年和2014两个年度网络特征值的变化率,为下一步分析网络的脆弱性奠定基础。

3 网络特征值变化分析

为分析集装箱海运网络的脆弱性变化,首先需要选择对其影响最为相关的特征值^[22-25]。由复杂网络理论并结合集装箱班轮的运行特点,这类网络特征值主要有:①网络所有节点度的平均值,即网络平均度。这一指标反映了各港口节点度的偏差程度,体现了海运网络中各航线同步运行的能力;②网络节点的相邻关系,即网络聚类系数。这一指标刻画了海运网络中各港口的聚集程度,尤其是枢纽港的分布状况;③网络的离散程度,即网络孤立节点比例。这一指标反映了网络中各港口之间保持联系的能力;④网络各节点距离的平均值,即网络平均距离。这一指标反映了海运网络中的集装箱中转港口的平均次数;⑤网络运行的难易程度,即网络效率。这一指标反映了集装箱在海运网络中运行的难易程度 and 所有港口效率的总和。

综上,本文选择网络平均度、网络聚类系数、网络孤立节点比例、网络平均距离和网络效率等特征值分析网络脆弱性的变化。

3.1 网络平均度

设 K 为网络平均度,由复杂网络理论,有:

$$K = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z k_i \quad (4)$$

式中:节点度 k 反映了该节点的重要程度。如果某集装箱港口为枢纽港或干线港,那么该港口的节点度必然较大,而支线港或喂给港的节点度通常较小。网络在受到蓄意攻击导致部分节点失效后,其网络平均度必然会发生变化,设 ΔK 表示网络受到蓄意攻击前后平均节点度变化的比率,有:

$$\Delta K = (1 - \frac{K'}{K}) \times 100\% \quad (5)$$

式中: K 和 K' 分别为蓄意攻击前后的网络平均度。

当蓄意攻击规模分别占节点总数的1%~10%时，可得到网络平均节点度的变化率（表1，图3a）。结果显示，当蓄意攻击的规模以1%的比例递增至10%时，2014年的网络平均度变化率要比2004年高出约4~6个百分点，表明网络平均度对集装箱海运网络脆弱性的影响是负面的。

3.2 网络聚类系数

如果港口*i*与其他港口可以直接通行，那么这些港口即定义为港口*i*的邻居。由复杂网络理论，港口的簇系数*C_i*为：

$$C_i = \frac{2M_i}{[k_i(k_i + 1)]}, i = 1, 2, 3, \cdots Z$$
 (6)

式中：*M_i*为港口*v_i*与相邻港口间存在的边数。

设网络聚类系数*C*为所有港口簇系数的平均值，有：

$$C = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z C_i, i = 1, 2, 3, \cdots Z$$
 (7)

显然，0 ≤ *C* ≤ 1。当*C* = 0时，意味着所有节点都是孤立节点，没有边连接；当*C* = 1时，表示网络成为两两节点之间都有边连接的完全图。设蓄意攻击后得到的网络聚类系数与原网络相比减少的比例为Δ*C*，又有：

$$\Delta C = (1 - \frac{C'}{C}) \times 100\%$$
 (8)

式中：*C*和*C'*分别表示蓄意攻击前后的网络聚类系数。

当蓄意攻击规模分别占节点总数的1%~10%时，可得到网络聚类系数的变化率（表2，图3b）。结果显示，当蓄意攻击的规模在整个网络的10%以内时，2014年的网络聚类系数比2004年要高出约4~10个百分点，表明网络聚类系数对集装箱海运网络脆弱性的影响是负面的。

3.3 网络孤立节点比例

设Δ*N*为网络孤立节点比例变化，有：

$$\Delta N = (1 - \frac{N'}{N}) \times 100\%$$
 (9)

式中：*N*和*N'*分别为蓄意攻击前后的网络节点数。

表1 蓄意攻击下集装箱海运网络平均度变化

蓄意攻击比例 <i>h</i> (%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004年网络平均度 <i>K</i>	9.21	7.94	7.11	6.49	6.00	5.52	5.15	4.86	4.53	4.21	4.01
2014年网络平均度 <i>K</i>	8.61	7.12	6.12	5.56	5.05	4.51	4.19	3.92	3.64	3.40	3.23
2004年变化率Δ <i>K</i> (%)	—	13.78	22.82	29.50	34.89	40.02	44.07	47.19	50.79	54.24	56.47
2014年变化率Δ <i>K</i> (%)	—	17.29	28.86	35.38	41.27	47.57	51.34	54.50	57.70	60.53	62.43

表2 蓄意攻击下集装箱海运网络聚类系数的变化

蓄意攻击比例 <i>h</i> (%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004年网络聚类系数 <i>C</i>	0.40	0.34	0.32	0.31	0.29	0.27	0.26	0.25	0.23	0.21	0.21
2014年网络聚类系数 <i>C</i>	0.38	0.31	0.27	0.26	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.19	0.17
2004年变化率Δ <i>C</i> (%)	—	14.30	20.55	22.55	26.80	32.25	33.55	36.02	42.46	46.42	47.98
2014年变化率Δ <i>C</i> (%)	—	18.84	29.22	32.68	37.00	40.58	43.16	45.11	48.49	50.33	54.50

当蓄意攻击规模分别占节点总数的1%~10%时,可得到网络孤立节点比例的变化率(表3,图3c)。结果显示,2014年网络孤立节点比例比2004年趋于增加,表明网络孤立节点比例对集装箱海运网络脆弱性的影响是负面的。

3.4 网络平均距离

实际中,集装箱班轮公司选择开通航线时并不只是考虑港口间距离的远近,一般还会综合考虑货物运量、中转成本以及运输条件等各个方面的因素。所以,通常并不以传统的物理长度来表示港口之间的运输距离,而是选取连接两个港口之间最少的中转次数,即以两港最短路径需经过的边数来表示港口 v_i 和港口 v_j 之间的距离 d_{ij} 。设网络平均距离(特征路径长度) L 为所有节点对之间最短距离的平均值。由复杂网络理论,其计算公式为:

$$L = \frac{1}{Z^2} \sum_{j=1}^Z \sum_{i=1}^Z d_{ij} \tag{10}$$

对于集装箱海运网络的实际情况, $d_{ij} = d_{ji}$ 且 $d_{ii} = 0$,则上式可简化为:

$$L = \frac{2}{Z(Z-1)} \sum_{i=1}^Z \sum_{j=i+1}^Z d_{ij} \tag{11}$$

设蓄意攻击后网络平均距离变化率为 ΔL ,有:

$$\Delta L = (1 - \frac{L}{L'}) \times 100\% \tag{12}$$

式中: L 和 L' 为蓄意攻击前后的网络平均距离。

利用公式(11)对集装箱海运网络进行分析,得到2004年和2014年的网络平均路径长度分别为3.33和3.41,即集装箱在任意两个港口间的运输平均要经过2~3个港口中转,且2014年的网络平均距离要大于2004年,表明集装箱中转的次数有所增加。

当蓄意攻击规模分别占节点总数的1%~10%时,可得到网络平均距离的变化率(表4,图3d)。结果显示,当蓄意攻击比例较小时,2014年的网络平均距离与2004年相比增加的不明显,但随着攻击比例的提高而迅速增加,受到的影响在逐步扩大,即网络平均距离对集装箱海运网络脆弱性的影响是负面的。

3.5 网络效率

设网络的节点效率以 I_i 表示,根据复杂网络理论,其表达式为:

$$I_i = \frac{1}{(Z-1)} \sum_{j=1, j \neq i}^Z w_{ij} \tag{13}$$

式中: w_{ij} 为距离 d_{ij} 的倒数。

表3 蓄意攻击下集装箱海运网络孤立节点比例的变化

蓄意攻击比例 $h(\%)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004年比例 $\Delta N(\%)$	0.00	1.79	3.18	4.17	5.96	7.55	8.95	9.94	10.93	12.13	13.32
2014年比例 $\Delta N(\%)$	0.00	1.42	3.31	4.73	6.94	8.83	11.04	12.46	13.72	14.83	16.40

表4 蓄意攻击下集装箱海运网络平均距离的变化

蓄意攻击比例 $h(\%)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004年网络平均距离 L	3.34	3.70	3.90	4.06	4.23	4.43	4.57	4.70	4.87	5.04	5.09
2014年网络平均距离 L	3.41	3.78	4.04	4.25	4.48	4.94	5.16	5.54	5.85	6.33	6.95
2004年变化率 $\Delta L(\%)$	-	9.80	14.42	17.69	21.00	24.56	26.91	28.90	31.37	33.77	34.40
2004年变化率 $\Delta L(\%)$	-	9.95	15.54	19.79	23.94	30.98	34.01	38.51	41.77	46.14	50.94

设蓄意攻击后得到的网络效率与原网络的变化率为 ΔI ，有：

$$\Delta I=(1-\frac{I'}{I})\times 100\% \tag{14}$$

式中： I 和 I' 为蓄意攻击前后的网络效率。当蓄意攻击规模分别占节点总数的1%~10%时，由公式（13）和（14），可得到网络效率的变化率（表5，图3e）。结果显示，2014年的网络效率的变化率比2004年有所提高，其增长幅度达3%~13%，表明2014年的网络效率影响更为敏感，即网络效率对集装箱海运网络脆弱性的影响是负面的。

表5 蓄意攻击下集装箱海运网络效率的变化

蓄意攻击比例 $h(\%)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004年网络效率 I	0.33	0.29	0.27	0.26	0.24	0.23	0.21	0.21	0.20	0.19	0.17
2014年网络效率 I	0.32	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.16	0.16	0.14	0.13
2004年变化率 $\Delta I(\%)$	-	12.63	18.85	21.90	26.41	30.95	35.52	37.32	40.34	42.83	47.68
2014年变化率 $\Delta I(\%)$	-	15.43	23.48	29.09	34.42	40.90	45.10	49.18	51.97	56.85	60.40

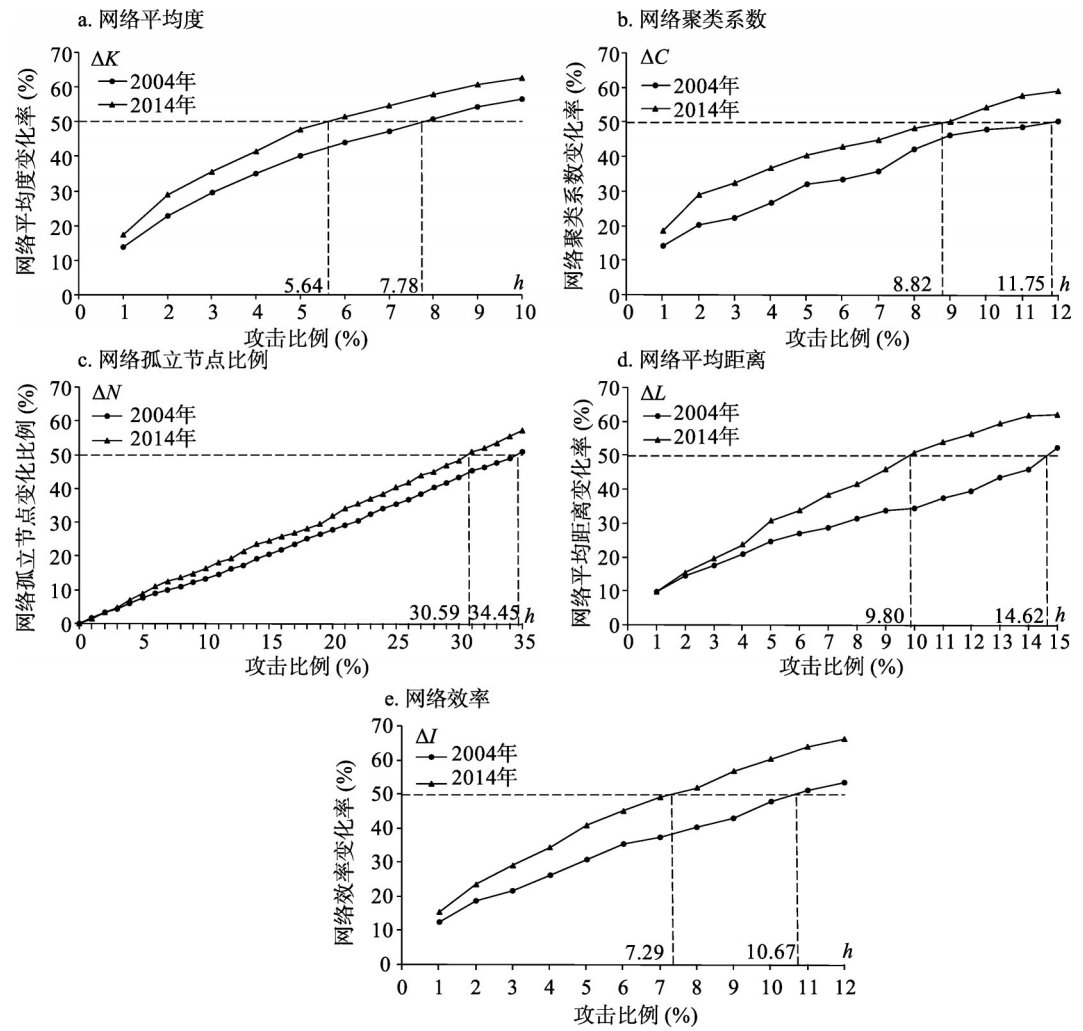


图3 蓄意攻击下集装箱海运网络各特征值变化率

Fig. 3 The change rate on the eigenvalues of container shipping network under intentional attack

4 网络脆弱性变化的量化分析

4.1 网络压力测试

要定量分析网络脆弱性的变化程度,关键是如何确定各网络特征值变化率对网络脆弱性影响的贡献度,即相对应的权重。为此,本文提出网络压力测试法,有关概念如下。

(1) 网络半衰度:在特定攻击策略下,网络某一特征值的变化率达到最大值(即网络完全失效)的50%时所受到的攻击强度,以 G_s 表示,其中 s 表示某一特征值。之所以采用网络半衰度来确定敏感系数,是因为在通常情况下,以50%的比例即网络未失效和完全失效的中值进行压力测试是最合理的选择。

(2) 敏感系数:在特定攻击策略下,网络在不同研究时间点 T_1 和 T_2 的半衰度比值,即:

$$O_s = \frac{G_s(T_2)}{G_s(T_1)}, s = 1, 2, \dots \quad (15)$$

式中: O_s 为敏感系数; $G_s(T_1)$ 和 $G_s(T_2)$ 分别为 T_1 年度和 T_2 年度的网络半衰度; s 为网络某一特征值。

(3) 影响权重:在特定攻击策略下,某一特征值对网络脆弱性的贡献度,即:

$$Q_s = \frac{O_s}{\sum_s O_s}, s = 1, 2, \dots \quad (16)$$

式中: Q_s 为特征值 s 对网络脆弱性影响的权重。

4.2 量化分析

为便于表达,设 $U_{s,h}$ 为网络特征值 s 在攻击比例为 h 时的变化率集合。例如,以 $U_{1,1\%}$ 表示网络平均度特征值在攻击比例为1%时的变化率,以此类推。定义 $\overline{U}_s(T_t)$ 为网络某一特征值 s 的变化率在不同攻击比例下的平均值, T_t 表示 T 时间段的 t 时间点,有:

$$\overline{U}_s(T_t) = \frac{\sum_h U_{s,h}}{\text{num}(h)}, t = 1, 2; s = 1, 2, \dots; h = 1\%, 2\%, \dots \quad (17)$$

设各网络特征值变化率均值在 T_1 与 T_2 时间下的差为 $\Delta\overline{U}_s$,即:

$$\Delta\overline{U}_s = \overline{U}_s(T_2) - \overline{U}_s(T_1), s = 1, 2, \dots \quad (18)$$

设网络脆弱性变化度为 F ,有:

$$F = \sum_s [Q_s \times \Delta\overline{U}_s], s = 1, 2, \dots \quad (19)$$

综合以上分析过程,将具体步骤归纳如下:步骤1,选择攻击策略,利用不同年度集装箱海运网络的基础数据分别计算出网络节点按一定比例删除前后特征值的变化率,即 ΔK , ΔC , ΔN , ΔL 和 ΔI ;步骤2,进行网络压力测试,即假定网络处于半毁状态时,不同年度网络所承受的攻击强度 G_s ,进而得到网络特征值敏感系数 O_s ,利用网络各特征值敏感系数 O_s 所占比例,求出各网络特征值对网络脆弱性影响权重 Q_s ;步骤3,在一定的攻击比例内,计算出网络各特征值变化率的平均值 $\overline{U}_s(T_t)$,得到不同年度网络各特征值变化率的差值 $\Delta\overline{U}_s$;步骤4,将不同年度各网络特征值变化率平均值的差值 $\Delta\overline{U}_s$ 分别乘以相对应的影响权重 Q_s ,求和后即得到网络脆弱性变化度 F ;步骤5,结束。

按上述步骤,将2004年和2014年集装箱海运网络特征值分别代入公式(15)~(19),计算结果如表6和表7所示,压力测试计算结果如图3所示。结果表明:网络平均度、网络聚类系数、网络孤立节点比例、网络平均距离和网络效率等特征值对网络脆弱性影响权重分别为0.20、0.20、0.24、0.18和0.18,各网络特征值对网络脆弱性的贡献值分别为

1.23%、1.56%、0.38%、1.24% 和 1.70%。各项贡献值累加后, 可知 2014 年集装箱海运网络比 2004 年更为脆弱, 其幅度为 6.1%。

5 结论

(1) 近 10 年的统计分析, 全球规模以上集装箱港口已由 2004 年的 503 个增加到 2014 年的 634 个, 增长了 26.0%; 连接上述港口的航线 (重叠航线不计) 由 2004 年的 1436 条增加到 2728 条, 增长了 17.8%, 表明目前全球集装箱海运网络仍处于扩展中, 网络的脆弱性也处于变化中。

(2) 为揭示网络脆弱性的变化, 可采用压力测试方法, 通过分析网络各特征值的半衰度、敏感系数以及对网络脆弱性影响权重, 进而得到集装箱海运网络某个时段内的脆弱性变化度。

(3) 基于复杂网络的各项特征值探讨集装箱海运网络扩展中脆弱性的变化, 按节点度从大至小排序, 以 1%~10% 的比例进行删除后, 发现 2014 年与 2004 年相比, 其网络平均度、网络聚类系数、网络孤立节点比例、网络平均距离和网络效率等特征值变化对网络的脆弱性均有负面影响, 使整个网络朝着更加脆弱的方向发展。经量化分析, 得到在蓄意攻击下 2014 年集装箱海运网络的脆弱性比 2004 年变差的幅度约为 6.1% (表 7)。

表 7 蓄意攻击下集装箱海运网络脆弱性变化度分析

Tab. 7 The analysis of the change on the vulnerability of container shipping network under intentional attack

特征值指标	网络平均度	网络聚类系数	网络孤立节点比例	网络平均距离	网络效率	合计
2004 年半衰度 $G_s(\%)$	7.78	11.75	34.45	14.62	10.67	-
2014 年半衰度 $G_s(\%)$	5.64	8.82	30.59	9.80	7.29	-
敏感系数 O_s	0.73	0.75	0.89	0.67	0.68	3.72
影响权重 Q_s	0.20	0.20	0.24	0.18	0.18	1
变化率均值差 $\Delta \bar{U}_s(\%)$	6.31	7.70	1.58	6.87	9.24	-
网络脆弱性变化度 $F(\%)$	1.23	1.56	0.38	1.24	1.70	6.10

需要指出, 尽管随着集装箱港口的持续增加, 使得枢纽港和干线港的发展更快, 因而更易受到蓄意攻击的影响。但在实际中, 由于近年来集装箱运量的迅速增长, 促使位于主航道上邻近港口形成了双核枢纽港布局, 如上海港与宁波港, 新加坡港与巴生港, 釜山港和横滨港, 香港港与深圳港以及洛杉矶港与长滩港等。这些相邻的具有高节点度的网络节点实际上类似于计算机的备份机制, 一旦某一枢纽港在蓄意攻击下暂时失效, 邻近的另一枢纽港会立即承担起运输功能, 可使整个集装箱海运网络受到的影响大为减少。对于网络脆弱性的变化速率以及因天气、地震等随机因素对集装箱海运网络的影响等问题, 将是下一步需要继续研究的内容。

参考文献(References)

- [1] Tian Yaping, Chang Hao. Bibliometric analysis of research progress on ecological vulnerability in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1515-1525. [田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报, 2012, 67(11): 1515-1525.]
- [2] Zhao Dongsheng, Wu Shaohong. Responses of vulnerability for natural ecosystem to climate change in China. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 602-610. [赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究. 地理学报, 2013, 68(5): 602-610.]

- [3] Liu Yi, Huang Jianyi, Ma Li. The assessment of regional vulnerability to natural disasters in China based on DEA model. *Geographical Research*, 2010, 29(7): 1153-1162. [刘毅, 黄建毅, 马丽. 基于 DEA 模型的我国自然灾害区域脆弱性评价. *地理研究*, 2010, 29(7): 1153-1162.]
- [4] Su Fei, Zhang Pingyu, Li He. Vulnerability assessment of coal-mining cities' economic systems in China. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 907-916. [苏飞, 张平宇, 李鹤. 中国煤矿城市经济系统脆弱性评价. *地理研究*, 2008, 27(4): 907-916.]
- [5] Tian Yaping, Xiang Qingcheng, Wang Peng. Regional coupled human-natural systems vulnerability and its evaluation indexes. *Geographical Research*, 2013, 32(1): 55-63. [田亚平, 向清成, 王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系. *地理研究*, 2013, 32(1): 55-63.]
- [6] Fang Chuanglin, Wang Yan. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 234-247. [方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征. *地理学报*, 2015, 70(2): 234-247.]
- [7] Albert R, Jeong H, Barabasi A. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 2000, 406: 378-382.
- [8] Crucitti P, Latora V, Marciatori M et al. Error and attack tolerance of complex networks. *Physica A*, 2004, 340: 388-394.
- [9] Freeman L. Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1979(3): 215-239.
- [10] Barrat A, Barthelemy M, Pastor-sa-torras, et al. The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2004, 101: 3747-3752.
- [11] Latora V, Marciatori M. Is the Boston subway a small-world network. *Physica A*, 2002, 314: 109-113.
- [12] Latora V, Marciatori M. How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism. *Physica A*, 2004, 340: 388-394.
- [13] Wu Hongrun, Qin Jun, Zheng Bojin. Anti attack ability based on costs in complex network. *Computer Science*. 2012, 39(8): 224-227. [吴泓润, 覃俊, 郑波尽. 基于代价的复杂网络抗攻击性研究. *计算机科学*, 2012, 39(8): 224-227.]
- [14] Duan Dongli, Wu Jun, Deng Hongzhong, et al. Cascading failure model of complex networks based on tunable load redistribution. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2013, 33(1): 203-208. [段东立, 吴俊, 邓宏钟, 等. 基于可调负载重分配的复杂网络级联失效模型. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 203-208.]
- [15] Xie Feng, Cheng Suqi, Chen Dongqing, et al. Cascade based attack vulnerability in complex network. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2011, 51(10): 1252-1257. [谢丰, 程苏琦, 陈冬青, 等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(10): 1252-1257.]
- [16] Liu Zhiqian, Song Rui. Reliability analysis of Guangzhou rail transit with complex network theory. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(5): 194-200. [刘志谦, 宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(5): 194-200.]
- [17] Ye Qing. Vulnerability analysis of rail transit based on complex network theory. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(2): 122-126. [叶青. 基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析. *中国安全科学学报*, 2012, 22(2): 122-126.]
- [18] Jenelius E. Network structure and travel patterns: Explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, 2009, 17: 234-244.
- [19] Tu Yingfei, Yang Chao, Chen Xiaohong. Analysis of road network topology vulnerability and critical links. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(3): 364-367. [涂颖菲, 杨超, 陈晓鸿. 路网拓扑脆弱性及关键路段分析. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(3): 364-367.]
- [20] Wang Jie, Li Xue, Wang Xiaobin. Complex network evolution of different scale shipping based on improved BA Model. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(2): 103-110. [王杰, 李雪, 王晓斌. 基于改进 BA 模型的不同规模海运复杂网络演化研究. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(2): 103-110.]
- [21] Mou Xiangwei, Chen Yan, Yang Ming, et al. Topological features of liner shipping network. *Journal of Dalian Maritime University*, 2009, 35(2): 34-37. [牟向伟, 陈燕, 杨明, 等. 班轮航运网络拓扑特性. *大连海事大学学报*, 2009, 35(2): 34-37.]
- [22] Wu Peijian, Deng Guishi, Tian Wei. Research on topology character of container shipping network. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2008, 32(4): 665-668. [武佩剑, 邓贵仕, 田炜. 集装箱航运网络拓扑特性研究. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2008, 32(4): 665-668.]
- [23] Tian Wei, Deng Guishi, Wu Peijian. Analysis of complexity in global shipping network. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(4): 605-609. [田炜, 邓贵仕, 武佩剑, 等. 世界航运网络复杂性分析. *大连理工大学学报*, 2007, 47(4): 605-609.]
- [24] Tian Wei, Deng Guishi, Wu Peijian. Analysis of network effect in port and shipping system characterized by scale-free

- network. Chinese Journal of Management, 2008, 5(3): 380-385. [田炜, 邓贵仕, 武佩剑. 具有无标度特性的港航系统网络效应分析. 管理学报, 2008, 5(3): 380-385.]
- [25] Deng Guishi, Wu Peijian, Tian Wei. Research on robustness and vulnerability of global shipping network. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(5): 765-768. [邓贵仕, 武佩剑, 田炜. 全球航运网络鲁棒性和脆弱性研究. 大连理工大学学报, 2008, 48(5): 765-768.]
- [26] Xu Hua, Jin Fengjun, Wang Chengjin. Optimization of the locations of hub-ports in round-the-world container service. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(6): 593-602. [徐骅, 金凤君, 王成金. 集装箱环球航线的枢纽区位优化. 地理学报, 2008, 63(6): 593-602.]
- [27] An Xiaopeng, Han Zenglin, Yang Yinkai. A study on the formation & evolvement mechanism and development mode of international container load center. Geographical Research, 2000, 19(4): 383-390. [安筱鹏, 韩增林, 杨荫凯. 国际集装箱枢纽港的形成演化机理与发展模式研究. 地理研究, 2000, 19(4): 383-390.]
- [28] Cao Youhui, Cao Weidong, Jin Shisheng, et al. The evolution mechanism of the coastal container port system of China. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(3): 424-432. [曹有挥, 曹卫东, 金世胜, 等. 中国沿海集装箱港口体系的形成演化机理. 地理学报, 2003, 58(3): 424-432.]
- [29] Wang Cheng-jin, Yu Liang. Formation and evolution of world container ports system and coupling mechanism with international trade networks. Geographical Research, 2007, 26(3): 557-568. [王成金, 于良. 世界集装箱港的形成演化及与国际贸易的耦合机制. 地理研究, 2007, 26(3): 557-568.]
- [30] Newman M E J. Assortative mixing in networks. Physical Review Letters, 2002, 89(20): 208701/1-4.

The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack

WANG Nuo, DONG Lingling, WU Nuan, YAN Huakun

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: To explore the current trend of the global container shipping network vulnerability, the analytical approach and quantitative methods were put forward for researching the change rate of the network vulnerability. We chose the routes distribution data from the world's main container liner companies in 2004 and 2014 as the study foundation. Sorted by the node degrees, the ports were gradually removed at a proportion from 1% to 10%. The quantitative foundation was the change rates of the eigenvalues before and after node removal, including the eigenvalues of network average degree, network clustering coefficient, network isolated-node proportion, network average shortest-path length and network efficiency. With the proposed pressure test, we calculated the weights and the values that each network eigenvalue has influence on the network vulnerability. Then we obtained the values of the change on the container shipping network vulnerability within the range of setting attack strength. The result shows that the vulnerability of the global container shipping network has the trend of becoming weaker in recent 10 years under intentional attack. When the scale of attack is less than 10% of the whole network, the vulnerability of the container shipping network has weakened by about 6.1%. The research conclusion in this paper has an important significance for deepening the research of port geography, and the analytical approach and method also provide reference to network characteristics analysis in other fields.

Keywords: container; shipping; network; intentional attack; vulnerability