

全球海洋运输网络健壮性评估

彭 澎^{1,2}, 程诗奋^{1,2}, 刘希亮¹, 梅 强^{3,4}, 陆 锋¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 集美大学航海学院, 厦门 361021;

4. 船舶辅助导航技术国家地方联合工程研究中心, 厦门 361021)

摘要: 海洋运输网络结构健壮性与运输效率密切相关,也是海洋运输系统抗干扰能力的具体表现。目前的海洋运输网络健壮性研究主要基于集装箱班轮运输网络开展,忽略了货运船舶的多态性。针对上述问题,本文利用2015年全球海洋货物运输船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据,构建了包含港口中转停留信息的全球海洋货物运输网络,然后从原油、集装箱、散货三种货物运输模式网络入手,证明其结构符合幂律分布,并采用随机性攻击和蓄意攻击策略,分析了三种网络在不同攻击策略下的破碎过程。结果表明:①与基于集装箱班轮起止港口信息构建的运输网络相比,利用货运船舶AIS数据构建的运输网络更完整地反映了全球海洋运输格局和过程;②不同货运网络结构健壮性存在巨大差异,散货运输网络最健壮,其次为原油运输网络,集装箱运输网络最脆弱;③小规模蓄意攻击会对集装箱运输网络完整性产生较大的影响,而对散货运输网络和原油运输网络完整性影响较小。研究成果可为港口规划、航线设计与优化以及建立更可靠的海洋运输网络体系提供参考和决策支持。

关键词: 复杂网络;海洋运输;健壮性;船舶自动识别系统

DOI: 10.11821/dlxb201712009

1 引言

海洋运输占全球进出口货物运输量的90%以上^[1]。海洋运输效率对全球经济发展、国际政治和社会经济交流影响重大。同时,海洋运输效率也极易受到自然灾害和政局变化等突发事件的影响^[2]。因此,定量评估海洋运输网络结构的抗干扰能力,并提出针对性的改进建议,对于提高海洋运输效率、增强海洋运输基础设施投资的决策科学性具有重要的现实意义。

结构稳定性分析是复杂网络研究的重要命题。健壮性(Robustness)和脆弱性(Vulnerability)从对立的角来衡量网络结构保持稳定的能力。健壮性是指在网络中的节点(边)发生随机故障或遭受蓄意攻击的条件下,网络维持其功能的能力^[3-4]。亦有研究采用可靠性^[5]或鲁棒性^[6]等概念。在复杂网络研究中,采用健壮性的概念更为普遍^[7-8]。而脆弱性是指由于系统对内外扰动的敏感性以及缺乏应对能力从而使系统的结构和功能容易发生改变的一种属性^[9]。脆弱性是从健壮性的对立面来阐述网络结构的稳定性。健壮性高低反映了抗干扰能力的强弱。而脆弱性高低的含义可能会引起认知歧义。本文通过

收稿日期: 2017-02-22; 修订日期: 2017-10-18

基金项目: 中国科学院重点项目(ZDRW-ZS-2016-6-3) [Foundation: Key Project of the Chinese Academy of Sciences, No.ZDRW-ZS-2016-6-3]

作者简介: 彭澎(1989-), 男, 博士生, 主要从事海上交通地理信息科学、复杂网络分析研究。E-mail: pengp@lreis.ac.cn

通讯作者: 陆锋(1970-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为交通地理信息系统、导航与位置服务技术、复杂网络分析等。E-mail: luf@lreis.ac.cn

攻击网络来观察网络中各项评估指标的变化,以对比不同海洋运输网络之间抗干扰能力的差异。因此,采用健壮性这一概念来衡量网络结构。

网络健壮性在道路网络^[10-11]、航空货运网络^[5, 12]、电力网络^[13]等多个领域均已有广泛研究。针对海洋运输网络, Woolley et al. 等将之与航空运输网络进行了对比,认为海洋运输网络在面对蓄意攻击时体现出更好的健壮性^[14]。邓贵仕等分析了全球海洋运输网络节点度分布、度值相关性和节点度与介数相关性,发现度值大的节点优先与度值较大节点连接,度值大的节点介数也较大,因而度值较大的节点对海洋运输网络影响程度较大^[15]。王诺等采用2004年和2014年世界主要集装箱班轮公司航线数据开展分析,发现在蓄意攻击下,近10年来全球集装箱海洋运输网络呈现越来越脆弱的趋势^[16]。然而,当前针对海洋运输网络健壮性的研究多采用大型集装箱公司所提供的班轮数据,仅包含主要集装箱运输航线和集装箱港口。实际上,海洋货物运输涉及不同的货物类型。除集装箱运输外,散货和原油运输也是海洋运输的重要组成部分^[17]。而且,不同的港口具有不同的功能定位,且港口呈现很强的运输货物差异性,这种差异对全球海洋运输网络结构有着重要影响。因此,海洋货运网络结构分析不能仅聚焦于网络几何形态的分析过程,将所有港口界定为具有相同功能,而需要考虑不同类型港口和航线特征差异。

船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)能实时获取船舶位置与轨迹、停留点、停留时长、其他货运相关信息等,具有实时性强、数据量大、数据内容丰富的特点,能够很好地反映不同类型船舶的货运状态^[18]。岸基与卫星AIS设备通过实时或周期性的与船载AIS设备进行数据交换,可获取船舶的实时位置等相关信息。本文基于海运船舶AIS数据,分别构建细粒度的原油运输网络、集装箱运输网络和散货运输网络,并采用复杂网络分析方法,评估三种网络的健壮性,为海洋货物运输系统的优化决策提供支持。

2 实验数据

本文利用2015年全年的全球海洋货物运输船舶AIS数据开展分析工作,船舶运输轨迹密度分布如图1所示。完整的全球海洋货运网络是由很多不同类型船舶行驶航线组成

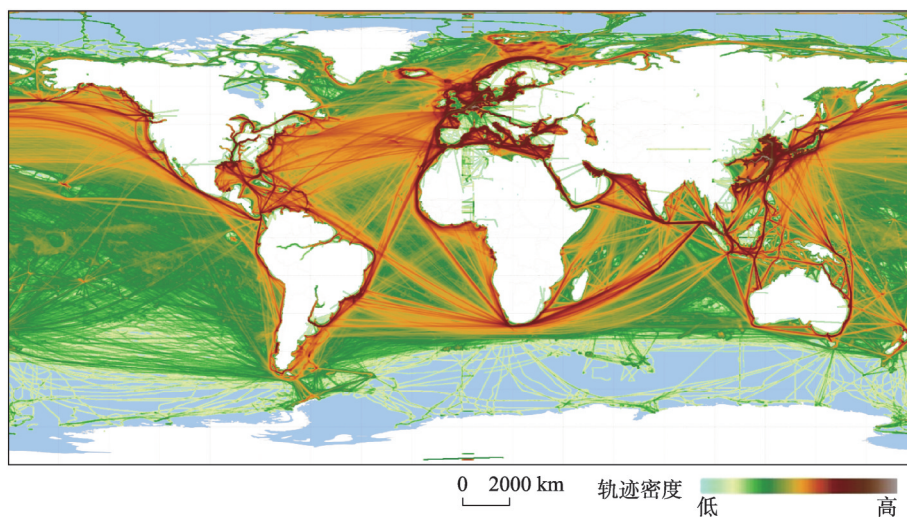


图1 2015年全球海洋运输船舶轨迹密度

Fig. 1 Traffic density of global maritime transportation in 2015

的子网络构成的^[19], 不同子网络具有不同的运输特征和港口需求。海洋运输网络健壮性分析需要在不同类型子网络上进行。由于原油船、集装箱船和散货船这三种类型船舶在海洋货物运输量中占比达89%, 因此本文选取这三类货物运输船舶产生的轨迹数据来识别船舶进出港记录, 并据此分别构建运输网络, 三种货物运输网络如图2所示。表1所示为三种货运网络的基本统计特征。

以往研究所采用的集装箱班轮运输网络涉及港口和航线数量有限, 如文献^[20]所采用的运输网络仅包含777个港口、7553条航线, 而本文采用货运船舶AIS数据构建的货运网络涉及2000以上港口、8万多条航线, 且很多港口并非集装箱港口。与班轮运输网络相比, 利用货运船舶AIS数据构建的运输网络更完整地反映了全球海洋运输格局和过程。此外, 较之集装箱班轮运输网络, 基于AIS数据构建的货运网络能够反映出不同功能类型的港口在网络中的特征。

即使是对集装箱运输而言, 本文采用AIS数据构建的全球集装箱运输网络也涉及1488个港口、17135条航线, 远大于以往研究所采用的集装箱班轮数据, 几乎覆盖所有的集装箱货运航线。此外, 集装箱班轮数据仅仅包含定期航线, 而实际上集装箱运输还存在大量不定期航线, 经营大宗, 低价货物运输业务。通过对比班轮运输网络与基于AIS数据建立的集装箱运输网络发现, 实际上集装箱港口之间存在更多的贸易往来。反映在港口节点度值这一指标上, 利用AIS数据构建的集装箱运输网络的平均度值为23.03, 而集装箱班轮运输网络的平均度值仅为9.7207^[21]。在平均最短路径上, 基于AIS数据建立的集装箱运输网络的平均最短路径为2.99, 而班轮运输网络的平均最短路径为3.26^[21], 说明集装箱运输在实际中需要更少的港口中转。

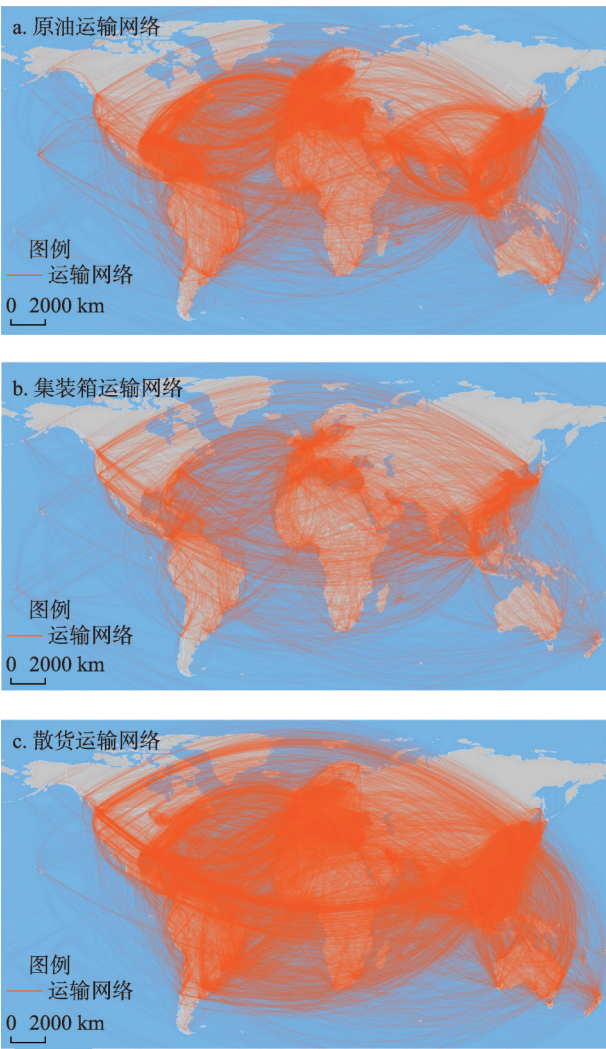


图2 不同类型海洋货物运输网络结构

Fig. 2 Structure of different cargo ship networks

表1 三种货运网络的基本特征

Tab. 1 Characterization of different cargo ship networks

网络类型	船舶数量	船舶进出港数	港口数	航线数	平均度	聚类系数	平均最短路径
原油运输网络	8913	521628	2042	44219	43.31	0.56	2.75
集装箱运输网络	4936	396833	1488	17135	23.03	0.55	2.99
散货运输网络	10189	274435	1969	45850	46.57	0.46	2.67

由表1可以看出,三种货物运输网络都体现出了“小世界”特征,即节点之间的距离较短,且聚集程度很高^[22]。此外,这三种网络节点的中介中心性^[23]也体现出了很大的差异性,有些港口在三种类型的运输网络中排名都比较高,如新加坡港在三种类型货运网络的中介中心性都排名前三;但有些港口只在单一类型货运网络中排名比较靠前,如集装箱运输网络中介中心性排名第5位的舟山港,在散货运输网络中排名第18位,在原油运输网络中仅排在第38位。

3 海洋运输网络健壮性评估

3.1 网络结构分析

网络的无标度特性指网络的节点度服从幂律分布^[24]。一般认为无标度网络同时显现出针对随机故障的健壮性和针对蓄意攻击的脆弱性^[25]。本文中节点度的变化规律用分布函数 $P(k)$ 来表示,即一个节点恰有 k 条边的概率。在双对数坐标系下海洋运输网络的度分布如图3所示,通过对这三种网络进行幂律函数拟合,拟合优度都在0.7以上,可见三种网络均较好地服从幂律分布,即均属于无标度网络。

本文采用一组从节点到网络整体的拓扑特征度量指标描述网络健壮性。海洋运输网络 G 表示为:

$$G=(N, E) \quad (1)$$

式中: N 为港口节点集合; E 为港口间货物运输航线的集合。

3.2 港口重要性度量指标

本文采用节点度、中介中心性两个指标来判断港口在整个海洋运输网络中的重要程度。港口节点度 d_i 表示与港口 i 存在直达航线的港口数目,是衡量一个港口重要性的最基本度量指标。节点度表达了网络中局部区域内港口之间的通达性。节点度计算公式为:

$$d_i = \sum_{j \in N, j \neq i} e_{ij} \quad (2)$$

式中: N 为港口节点集合; i 、 j 分别为集合 N 中的两个不同港口节点; e_{ij} 表示港口节点 i 、 j 的连接情况,若港口节点 i 与 j 之间存在直达运输航线,则 e_{ij} 的值为1,否则为0。港口节点的度值越高,则表示其在网络局部范围内越重要,如海洋运输网络中的枢纽港口。

港口中介中心性表示经过该港口节点的港口间最短航线数量比例,代表了网络全局范围内的海运效率。中介中心性计算公式为:

$$Bc(v) = \sum_{u \neq w \in V} \frac{\sigma_{uw}(v)}{\sigma_{uw}} \quad (3)$$

式中: V 表示港口集合; σ_{uw} 表示任意两个港口之间最短航线数,而 $\sigma_{uw}(v)$ 则表示这些最短航线中,经过港口 v 的数目。在海洋货物运输中,具有较高中介中心性的港口往往是影响货物运输效率的关键节点。如苏伊士港作为欧洲至亚太地区的长距离货物运输中心节点之一,是众多以欧洲大陆为起点或终点货船的必经港口。

3.3 网络复杂性度量指标

从网络的整体出发分析网络结构,最常用的度量指标是平均最短路径距离、聚类系

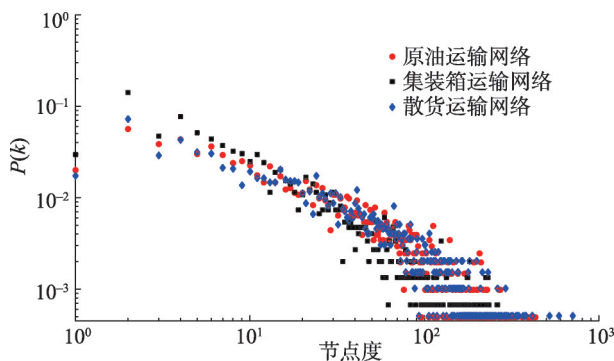


图3 海洋运输网络节点的度分布

Fig. 3 The degree distribution of maritime transportation networks

数和网络的破碎度。

平均最短距离表达的是网络中连接任意两个节点的拓扑路径长度（从一个出发节点到达另一个节点所经历的中间节点个数）的平均值，计算公式为：

$$l = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{v \in V} \sum_{w \neq v \in V} d(v, w) \quad (4)$$

式中： n 表示网络中节点数目； $d(v, w)$ 表示节点 v 和 w 之间最短路径的长度。对于海洋运输网络而言， l 越小意味着货物运输过程中需要经由的港口数量越少，则货运网络的全局传输效率越高。由于不同货物运输类型的网络规模不同，为了减少网络规模对平均最短距离的影响，本研究采用相对平均最短拓扑路径 L ，即平均最短路径 l 与网络直径 D 的比值：

$$L = \frac{l}{D} \quad (5)$$

式中： D 表示网络的直径，即网络中两两节点间最短路径长度的最大值，即：

$$D = \max \left(\sum_{v \in V} \sum_{w \neq v \in V} d(v, w) \right) \quad (6)$$

聚类系数^[26]是网络中节点之间相互连接紧密程度的表征，网络整体的聚类系数 C 表示的是网络中所有节点聚类系数的平均值，即：

$$C = \frac{1}{N} \sum_{v \in V} C_v \quad (7)$$

$$C_v = \frac{|\{e_{uw}: u, w \in N_v, e_{uw} \in E\}|}{k_v(k_v - 1)/2} \quad (8)$$

式中： C_v 表示节点 v 的聚类系数，即节点 v 所有邻居节点之间存在的连接数与可能存在的最大连接数之间的比值； N_v 为节点 v 所有邻居节点组成的集合； k_v 为集合 N_v 中包含的节点数目。比值越大，则节点所处的局部区域内节点两两直接相连的比例越高，货物在该区域运输时经由港口越少，且有较多运输中转港口可供选择，网络的局部运输效率越高。

港口或航线的失效会导致海洋运输网络结构的分裂。分裂越严重意味着网络越破碎，运输效率就越低。网络的破碎程度可以通过网络中最大子图相对规模 S 来度量。最大子图相对规模表达的是网络中最大联通子图与原始网络所包含的节点数目之比：

$$S = \frac{n_s}{n} \quad (9)$$

式中： n_s 表示当前网络中最大联通子图所包含的节点数目； n 为原始网络 G 所包含的节点数目。

4 网络健壮性评估过程

本文采用一组随机和蓄意的模拟攻击来观察海洋运输网络结构的变化状况，并以此来衡量海洋网络的健壮性。其中，随机攻击是从网络中随机移除节点；蓄意攻击则对节点依照其重要程度（不同评价策略会导致不同的重要程度排序结果）进行移除。由于连接度高的节点具有较高的可达性，中介中心性高的节点对连通程度有较大的影响，本文设计了针对节点度和中介中心性的攻击策略来决定每次模拟攻击时被选中的节点（重要程度越低的节点对网络的影响越小）。

针对不同结构的海洋运输网络依据三种攻击策略分别展开实验，对网络进行持续性

模拟攻击：每次删除网络中的一个节点及其所有连接边（蓄意攻击时还需重新计算当前网络中度最大或中介中心性最大的节点^[27]），统计此时网络的 L 、 C 和 S ，循环进行直至网络中所有节点都被删除或成为孤立节点，即网络完全失效为止。

4.1 模拟攻击实验

图4、图5和图6中 X 轴表示攻击程度 f ，即网络中被攻击的节点数与原始网络节点数的比值， Y 轴分别表示当前网络结构特征度量指标：相对平均最短路径距离 L 、聚类系数 C 和网络的破碎度 S 。

图4表示的是海洋运输网络受到持续性随机模拟攻击时的结构变化情况，即随着失效节点的增加，网络的相对平均最短路径 L 、聚类系数 C 和破碎度 S 的变化。从图4中可以看出，不同类型的网络在随机攻击下的结构变化过程并无显著差异， L 和 C 基本保持平稳，而 S 则在整个过程中表现出缓慢持续下降的趋势。

图5展示了基于节点度的蓄意攻击下海洋货物运输网络的结构变化情况。图5与图4对比可以看出，基于节点度的蓄意攻击下网络的结构变化与随机性攻击差别较大，具体表现为 L 先急剧增大，然后再急剧减小；聚类系数 C 则直接迅速下降为0；与聚类系数 C 类似， S 也表现为急剧减小，表示网络会迅速崩溃。 S 的变化表明，在网络整体崩溃时，失效节点的比例远小于随机攻击时失效节点比例，说明基于节点度的蓄意攻击对网络的破坏性比随机攻击大。

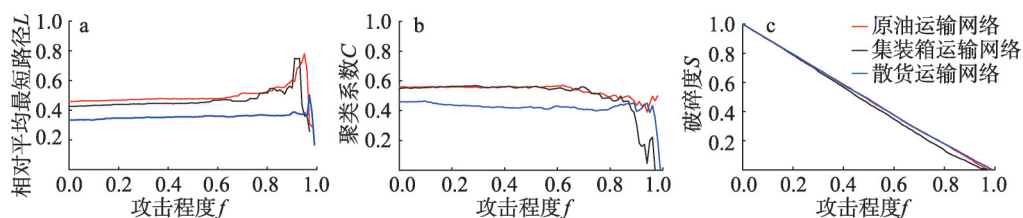


图4 随机攻击下货运网络结构变化

Fig. 4 Cargo ship network structural changes under random attacks

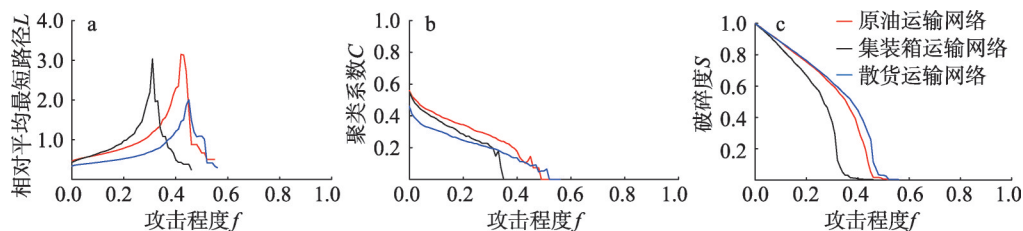


图5 基于节点度攻击下货运网络结构变化

Fig. 5 Cargo ship network structural changes under degree-based attacks

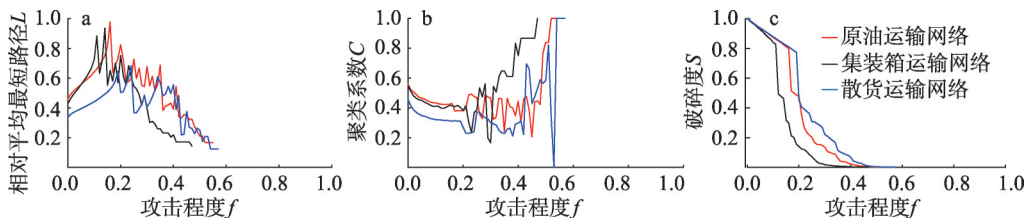


图6 基于节点中介中心性的蓄意攻击下货运网络结构变化

Fig. 6 Cargo ship network structural changes under betweenness-based intentional attacks

对比这三种网络破碎度 S 的变化过程,明显看出,当依次移除相同比例的港口节点时,集装箱运输网络破碎速度最快,其次为原油运输网络,最后为散货运输网络;而从网络局部效率 C 和全局效率 L 的变化过程来看,也呈现出集装箱、原油、散货运输网络依次降低的情形。

图6展示了基于节点中介中心性的蓄意攻击下海洋运输网络的结构变化情况。可以看出,基于节点中介中心性的蓄意攻击对网络的破坏程度最为严重,在被攻击的节点比例明显低于其他两种攻击策略时,即表现出网络分裂和崩溃的状态。 L 表现为先急剧增大,然后再急剧减小。此外,聚类系数 C 表现为先缓慢下降,再持续上升。该上升过程说明基于节点中介中心性的蓄意攻击会使得网络分裂为内部连接紧密但与外界不连通的封闭子网络。 S 表现为急剧减小,且网络比基于节点度的蓄意攻击更加迅速地崩溃。

可以看出,无论是基于港口节点度的蓄意攻击,还是基于港口节点中介中心性的蓄意攻击过程,网络破碎度 S 、局部效率 C 和全局效率 L 均呈现出相同的变化模式。因此,针对蓄意攻击过程,散货运输网络健壮性优于原油运输网络,原油运输网络优于集装箱运输网络,集装箱运输网络最为脆弱。

4.2 网络崩溃阈值

从图4~图6可以看出,海洋运输网络对于不同类型的攻击均具有一定的抵御能力,即在网络分裂开始之前,尽管会出现传输效率下降,但网络仍具有运转能力,然而一旦分裂产生后,网络将受到严重破坏而迅速崩溃。因此识别出不同货运网络出现分裂时的阈值将有助于对海洋运输过程提出预警。

图7展示了实验中不同类型货运网络在受到不同类型攻击时产生分裂的阈值

值:①对于随机攻击,海洋运输网络表现出很好的健壮性,即使是分裂阈值最小的集装箱运输网络,也仅当70.6%的港口失效后,网络才开始全面崩溃;②对于蓄意攻击,海洋运输网络健壮性较差,尤其是基于中介中心性的攻击过程,极易导致整个网络崩溃,例如对于集装箱运输网络,如果中介中心性较高的部分港口失效,即使只占全部港口比例的11.2%,也会迅速导致网络破碎直至崩溃。

4.3 重要港口节点

根据前文所述,对于蓄意攻击,三种类型的网络都表现得很脆弱,且攻击节点中介中心性值较高的节点,对海洋运输网络的破坏性最强。因此,为了保证全球海洋运输的正常运转,需要重点保证中介中心性值排名靠前的港口的稳定,即枢纽港口和某些类型货物运输所必经的港口,如新加坡港、塞得港等。本文对三种海洋运输网络中的港口依据中介中心性值进行了排序。图8展示了三种海洋运输网络中介中心性排名前十的港口。

5 讨论

当部分港口出现故障时,剩余港口之间的连通性将极大地影响货物运输的效率。根据网络破碎度的定义可知,当移除节点 f 的比例与网络的破碎度 S 的变化曲线越接近 $S = 1 - f$ 时,节点的移除对网络完整性的破坏越小,且当变化曲线为 $S = 1 - f$ 时,节点的移除并不

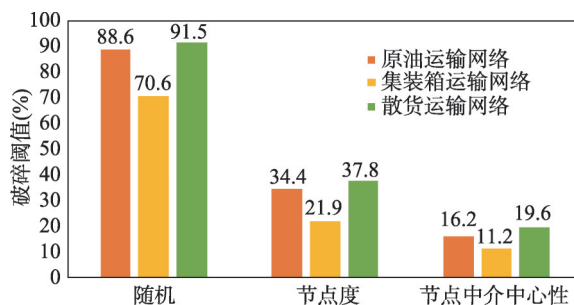


图7 不同类型攻击下货运网络的分裂阈值

Fig. 7 Splitting thresholds of cargo networks under different attacks



图8 中介中心性排名前十的港口

Fig. 8 Top 10 ports based on betweenness centrality in the three networks

会影响网络剩余节点之间的相互连通；而变化曲线越接近 $f = 0$ 时，则节点的移除对网络完整性破坏越大。

在现实中，海洋运输网络不会遭到完全破坏，本文需重点关注网络中小部分港口失效时，其余港口的连通性。由图5中 S 变化可知，在随机攻击时，面对小部分节点的移除，比如10%的节点，网络的破碎过程基本接近 $S = 1 - f$ ，即随机攻击不会对海洋运输网络造成巨大破坏；由图6和图7中 S 变化可知，面对蓄意攻击时，当移除10%的节点时，散货运输网络和原油运输网络的破碎过程变化曲线拟合为 $S = 1 - 1.1f$ ，集装箱运输网络的变化过程曲线拟合为 $S = 1 - 1.6f$ ，由表2进一步可知，当移除10%节点时，集装箱运输网络有90个节点（6%）不与最大连通子图相连，而散货运输网络和原油运输网络仅有20个节点（1%）不与最大连通子图相连；故小部分节点的移除，对于集装箱运输网络港口之间的相互连接有较大影响，而对于散货运输网络和原油运输网络港口之间的相互连接相对影响较小。原因在于，散货和原油运输所涉及的港口和航线较集装箱运输更多，从网络结构上反映，散货运输网络和原油运输网络较集装箱运输网络连接得更加紧密，从而在面对攻击时，表现得更加可靠。

表2 移除10%节点后网络剩余节点数和最大连接子图节点数
Tab. 2 Remaining nodes and the size of the largest component with 10% nodes removed

网络类型	剩余节点数	最大连接子图节点数
原油运输网络	1837	1817
集装箱运输网络	1339	1249
散货运输网络	1772	1752

对比全球航空网络,当移除10%节点时,基于节点度的蓄意攻击时航空网络的变化过程曲线拟合为 $S = 1 - 4f$,即有30% (约1200个节点)的节点不与最大连通子图相连^[14],即对网络连通性破坏很大。相对而言,小部分节点的移除对海洋运输网络完整性的破坏很小。其可能原因有:① 海洋运输网络连接很紧密。具体体现在节点平均度值较大,网络的平均最短路径值较小(表1)。相比之下,航空网络节点平均度值为12.51,平均最短路径值为4.16^[14]。② 重要的港口节点(如枢纽港口)都有与之临近港口节点可替换承担类似的运输功能,即使该港口出现故障,与之相临近的港口也能提供中转功能,比如新加坡港与巴生港,上海港与舟山港,香港港与深圳港等。

6 结论与展望

本文采用2015年全球海洋运输船舶AIS数据构建全球海洋运输网络,并对不同类型的海洋运输网络的结构健壮性进行量化分析,得到以下结论:① 与基于集装箱班轮起止港口信息的运输网络相比,利用货运船舶AIS数据构建的全球海洋运输网络更完整地反映了全球海洋运输网络格局和变化过程;② 不同货运类型运输网络结构健壮性存在巨大差异,散货运输网络最健壮,其次为原油运输网络,集装箱运输网络最脆弱;③ 小规模港口失效对集装箱运输网络连通性影响较大,而几乎不会影响到散货运输网络和原油运输网络的连通性。集装箱运输网络的航线布局尚有很大的优化空间来提高其网络的健壮性。

本文通过细分货运类型来研究海洋运输网络健壮性,实现了对海洋运输网络结构的细粒度刻画,研究成果可为港口发展规划、航线设计与优化等提供决策参考。然而,本文仅考虑了静态的海洋运输网络健壮性,但实际上海洋运输网络健壮性除了受到网络结构的制约外,港口的交通流量、气候等因素也会对其产生很大影响。除此之外,本文在选择持续性模拟攻击时,未考虑港口节点失效时产生的级联效应。未来的研究将对动态环境下海洋运输网络的健壮性进行深入分析。

参考文献(References)

- [1] Li Z, Xu M, Shi Y. Centrality in global shipping network basing on worldwide shipping areas. *Geojournal*, 2015, 80(1): 47-60.
- [2] 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势. *地理学报*, 2008, 63(6): 593-602.]
- [3] Duan Yingying, Lu Feng. The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network. *Journal of Image & Graphics*, 2013, 18(9): 1197-1205. [段滢滢, 陆锋. 不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响. *中国图象图形学报*, 2013, 18(9): 1197-1205.]
- [4] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2000, 406: 378-381.
- [5] Chen Yu, Wang Jiaoe, Jin Fengjun. Robustness and fragility of Chinese air transport network. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(3): 59-64. [陈娱, 王姣娥, 金凤君. 中国国内航空网络的可靠性评价. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(3): 59-64.]
- [6] Tian Jing, Wu Xiaohuan, Lin Liupeng. Degree correlation of urban street networks and its relationship with network robustness. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 672-678. [田晶, 武晓环, 林廖鹏. 城市道路网度相关性及其与网络鲁棒性的关系研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(5): 672-678.]
- [7] Li Daqing, Jiang Yanan. *Complex Networks Structure, Robustness and Function*. Beijing: National Defense Industry

- Press, 2015. [李大庆, 江逸楠. 复杂网络健壮性. 北京: 国防工业出版社, 2015.]
- [8] Shen Huawei, trans. *Linked: How Everything is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Hangzhou: Zhejiang People's Publishing House, 2013. [沈华伟, 译. 链接: 商业、科学与生活的新思维. 杭州: 浙江人民出版社, 2013.]
- [9] Li He, Zhang Pingyu, Cheng Yeqing. Concepts and assessment methods of vulnerability. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 18-25. [李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. *地理科学进展*, 2008, 27(2): 18-25.]
- [10] Duan Y, Lu F. Structural robustness of city road networks based on community. *Computers Environment & Urban Systems*, 2013, 41(9): 75-87.
- [11] Duan Y, Lu F. Robustness of city road networks at different granularities. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 411: 21-34.
- [12] Dang Y, Ding F, Gao F. Empirical analysis on flight flow network survivability of China. *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, 2012, 12(6): 177-185.
- [13] Wang J W, Rong L L. Robustness of the western United States power grid under edge attack strategies due to cascading failures. *Safety Science*, 2011, 49(6): 807-812.
- [14] Woolleymeza O, Thiemann C, Grady D, et al. Complexity in human transportation networks: A comparative analysis of worldwide air transportation and global cargo-ship movements. *Physics of Condensed Matter*, 2011, 84(4): 589-600.
- [15] 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.]
- [16] Wang Nuo, Dong Lingling, Wu Nuan, et al. The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 293-303. [王诺, 董玲玲, 吴暖, 等. 蓄意攻击下全球集装箱海洋运输网络脆弱性变化. *地理学报*, 2016, 71(2): 293-303.]
- [17] Kaluza P, Kölzsch A, Gastner M T, et al. The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface*, 2010, 7(48): 1093-1103.
- [18] Xiao Xiao, Shao Zheping, Pan Jiakai, et al. Ship trajectory clustering model based on AIS data and its application. *Navigation of China*, 2015, 38(2): 82-86. [肖潇, 邵哲平, 潘家财, 等. 基于 AIS 信息的船舶轨迹聚类模型及应用. *中国航海*, 2015, 38(2): 82-86.]
- [19] Ducruet C. Multilayer dynamics of complex spatial networks: The case of global maritime flows (1977-2008). *Journal of Transport Geography*, 2017, 60: 47-58.
- [20] Zong Kang, Hu Zhihua. Maritime association of countries along One Belt and One Road based on the perspective of social network analysis. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, 42(4): 84-90. [宗康, 胡志华. 基于社会网络分析法的一带一路沿线国家海运关联研究. *大连海事大学学报*, 2016, 42(4): 84-90.]
- [21] Liu Chanjuan, Hu Zhihua. Robustness research of global container shipping network based on complex network. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(5): 1441-1448. [刘婵娟, 胡志华. 基于复杂网络的全球海运网络鲁棒性研究. *广西大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(5): 1441-1448.]
- [22] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [23] Barthélemy M. Betweenness centrality in large complex networks. *Physics*, 2004, 38(2): 163-168.
- [24] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [25] Jeong H, Tombor B, Albert R, et al. The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, 2000, 407(6804): 651-654.
- [26] Newman M E J. The structure and function of complex networks. *Siam Review*, 2003, 45(1/2): 40-45.
- [27] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2002, 65(5): 634-634.

The robustness evaluation of global maritime transportation networks

PENG Peng^{1,2}, CHENG Shifen^{1,2}, LIU Xiliang¹, MEI Qiang^{3,4}, LU Feng¹

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Navigation College of Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 4. National-local Joint Engineering Research Center for Marine Navigation Aids Services, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: The structural robustness of maritime transportation network describes the anti-jamming ability of maritime transportation system, which is closely related to the transportation efficiency. Current researches on the robustness of maritime transportation networks mainly focus on the container transportation network, but ignore the type difference of cargo ships or even ports. This paper builds a more complete global maritime transportation network with the AIS data of the global cargo ships in 2015. Then, for the three transportation modes, namely oil tanker, container and bulk carrier, it proves that the three networks are complex networks with topological structures following the power law distribution, and three attack strategies including a random attack and two intentional attacks are conducted to evaluate the survivability of the corresponding transportation networks in different situations. The results show that: (1) in sharp comparison to the transportation network based on OD information of container liners, the networks constructed with the AIS data of the cargo ships fully reflect the global cargo transportation pattern and process; (2) The robustness of different maritime transportation networks differs greatly, with the container transportation network being the weakest and the bulk carrier transportation network the strongest. (3) Small intentional attacks may exert greater impact on the integrity of the container transportation network, but have less impact on bulk carrier transportation network and oil tanker transportation network. It is argued that these conclusions can help to improve decision support capabilities on maritime transportation planning and emergency response, which facilitates the establishment of a more reliable maritime transportation system.

Keywords: complex network; maritime transportation; robustness; automatic identification system