

基于复杂网络的应急物流网络抗毁性研究*

陈春霞

(成都电子机械高等专科学校 机械工程系, 成都 611730)

摘 要: 基于复杂网络理论,引入平均最短路径距离和极大连通子图,研究应急物流网络的抗毁性测度模型,在最大度和介数等不同的攻击策略下分析了单点应急物流网络的抗毁性能。理论分析和实验结果表明,随机攻击的网络易毁性小于选择性攻击;在攻击较多顶点时,度攻击的抗毁性能较弱。

关键词: 应急物流; 复杂网络; 抗毁性; 介数; 平均最短路径

中图分类号: F250

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1260-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.016

Study on invulnerability of emergency logistics network based on complex network

CHEN Chun-xia

(Dept. of Mechanical Engineering, Chengdu Electromechanical College, Chengdu 611730, China)

Abstract: Aiming at the research of the invulnerability of emergency logistics network, this paper measured the network invulnerability quantitatively by the average inverse geodesic length and the size of the largest connected subgraph. It analyzed invulnerabilities of the emergency logistics network including single-point distribution center in deference attack strategies. For each case of attacks on vertices and edges, it used different attacking strategies: removals by the descending order of the degree and the betweenness centrality. It shows that random attacks are often less harmful than select attacks and the invulnerability is weak based on removals by recalculated degrees when more vertices are attacked.

Key words: emergency logistics; complex network; invulnerability; betweenness centrality; average geodesic length

应急物流主要是针对突发性因素而采取的以追求时间效益最大化和事件损失最小化为目的的特种物流活动,它具有突发且不可预知、时间紧迫、随机等区别于一般物流的特点^[1]。如果应急物流网络本身在进行紧急保障活动时,其网络顶点也很有可能遇到突发性的事故,从而造成整个应急物流网络功能受损或瘫痪,这将会造成更为严重的后果^[2]。应急物流在生活中随处可见,如 SARS 疫情的突袭引起的物资供应、战时后勤物资保障、春运、世博会、企业的销售高峰引起的物流流动问题等。这些应急物流在运行过程中突发事件随时可能发生,网络的任何一个地方出现破坏都会带来巨大的损失。因此,应急物流网络要在充满不确定性的环境中保持动态稳定,不能只调整自身结构和流程,还必须科学测度网络中局部互动关系的优劣、互动程度的大小等网络性能。而研究如何度量应急物流网络的抗毁性能便是构建具备鲁棒性和适应性应急物流网络急需解决的重要问题。然而在长期的研究中,许多研究者都只关注多约束条件下应急物流网络模型的建立和网络自身结构、流程的调整^[3-6],而对应应急物流网络中局部互动关系、互动程度对网络运行的可靠程度,也就是面对网络本身的突发情况或有意攻击,网络还能否发挥其功能即网络的抗毁性问题却少有研究。虽然也有研究者在物流系统的柔性^[7]以及供应链系统的可靠性^[8]等方面进行了探讨,但都只是针对一般物流系统进行分析,依据经济指标和经验指标对物流网络性能进行度量,难以有效评价应急物流网络的性能。而文献^[9]仅仅对应应急物流网络的弹性概念和影响因素进行了初步探索,并未就网

络结构进行深层次的分析以及提出合理的网络弹性测度模型。

近年来复杂网络^[10-12]受到国际学术界的广泛重视,已经成为统计物理学、数学、生物学、系统科学等多个学科的研究热点,学者们致力于探索复杂网络的演化规律、结构功能和动力学行为。特别是近期多数研究者非常关注网络抗毁性能的测度研究,建立了连通度、聚集度和最短平均路径距离等网络性能测度模型^[2,10-12]。在多变和动态的商业环境中,物流网络以多核的结构处理顶点间的交换关系并协同完成各种任务,促成网络内顶点日益频繁的互动,使网络呈现复杂的网络结构,并逐渐表现出与大量复杂网络共有的特征和性质^[13]。而应急物流网络是一种特殊的社会物流网络,也具有复杂网络相同或相似的动态非线性特征及行为模式。

1 应急物流网络模型

1.1 问题描述

应急物流系统中收发货的“节点”和它们之间的“连线”所构成的物流抽象网络以及与之相伴的信息流动网络的集合,是动态的、增长的复杂网络。为确保抗灾的持续性和彻底性,在考虑构建应急物流体系时要整合逆向物流。本文不讨论基于多个约束条件下应急物流网络模型的建立,而是重点研究应急物流网络的抗毁性能:a)假设基于最短路径、巡回路线和系统总成本最小等约束条件的网络模型已建立;b)应急配送中心物资能完全满足所有需求点的需要;c)每条线路物流流量都

不超过该通道最大物资流量; d) 运输工具包括海、陆、空等交通工具。

1.2 网络模型

根据问题描述,应急物流系统涉及到物资供应、配送、运输、回收、决策、环境、成本等多种因素及顶点。为简化问题,本文主要考虑应急物资配送中心和物资需求点。为保障物资供应的紧急性,配送中心和需求点彼此之间也有可能存在物资相互调配问题。因此,应急物流网络模型可以用 $G=(V,E,S,U)$ 表示,如图1所示。其中: V 代表网络的顶点集合(包括前一级物流源点 O_1 和逆向物流汇点 O_2 、中间配送中心 A_i 和需求点 B_i); E 表示网络边集合 $\{(i,j)|i,j \in V, i \neq j\}$; S 表示各边的距离 $\{s_{i,j}|(i,j) \in E\}$; U 表示流量集合 $\{u_{i,j}|(i,j) \in E\}$ 。

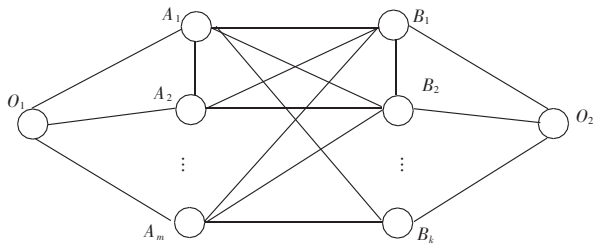


图1 应急物流网络模型

网络模型参数定义:从源点 O_1 到配送中心 A 的各边路径长度为0,流量分别为 $u_{a1}, u_{a2}, \dots, u_{am}$ 。从配送中心顶点 A_i 到需求点 B_i 以及它们彼此相互连接的各边路径长度和流量分别为 s_{ij} 和 u_{ij} 。需求点 B_i 到汇点 O_2 的各边路径长度为0,流量分别为 $u_{b1}, u_{b2}, \dots, u_{bk}$ 。这样应急物流网络转换为一个包含配送中心和需求点的无向连通图。

2 应急物流网络抗毁性测度模型

复杂网络的抗毁性是指网络功能在各种攻击或故障失效模式下持续作用的能力,往往被定义为网络在发生失效后网络整体性能的下降值。当前,在复杂网络研究领域,提出了平均最短路径距离、极大连通子图等测度模型研究网络的抗毁性能^[10,11]。由于应急物流网络的特殊性和复杂性以及网络顶点间的互动和协同,使网络呈现复杂的网络结构,如何认识和度量网络因突发事件或攻击失效后网络的抗毁性能,将对应急物流网络组织设计和运作规律把握起到非常重要的作用。依据文献^[11]网络的平均最短路径距离可表示为

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

其中: $d(v,w)$ 是两顶点 $v, w (v, w \in V)$ 的最短距离, N 为网络顶点(V)的数量。

平均最短路径距离恰好体现了应急物流网络要求时间最小这一原则,应急物流网络的抗毁性能可以由平均最短路径距离的增加值来衡量。平均最短路径距离增加越大,网络性能下降越快,网络抗毁性能越差。应急物流网络由于突发事件受到损害,网络顶点和边可能被移去,网络连通性被破坏,最终会生成多个孤立点和子连通图。孤立点的平均最短路径距离为0时,网络的最短平均路径会先变大后变小^[12],这种性能变化的非单调性给网络抗毁性研究带来了不便。因此,式(1)可变换为

$$l^{-1} = \langle \frac{1}{d(v,w)} \rangle = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{v \in V} \sum_{w \neq v \in V} \frac{1}{d(v,w)} \quad (2)$$

这时非连通子图(孤立点)的平均最短路径距离定义为

$1/d(v,w)=0$ 。这时 l 和 l^{-1} 并非一般意义的互为倒数(因为可能存在 $d(v,w)=0$)。依据式(2),最短平均路径距离逆(l^{-1})越大,应急物流网络的抗毁性能就越强。

极大连通度则说明了网络中各点是否连通的程度,极大连通子图越小,网络被损害的顶点或边越多,意味着网络的抗毁性能越差。但是当网络受到攻击时有可能产生多个连通子图。如果选择不包含物流最短路径(含配送中心)的极大连通子图,则难以有效度量网络的抗毁性。因此,定义包含配送中心的极大连通子图率(C)来度量应急物流网络的抗毁性。

$$C = \frac{n}{N} \quad (3)$$

其中: n 表示包含配送中心的极大连通子图顶点数量, N 表示网络顶点总数量。 C 越大,则应急物流网络的抗毁性越强。

应急物流网络的攻击具有选择性和随机性。为了更好地分析在多种攻击策略下网络的整体抗毁性能,依据文献^[14]可定义度量应急物流网络易毁性的测度模型为

$$YH[S,D] = \frac{\Phi[S] - W[S,D]}{\Phi[S]} \quad (4)$$

其中: $YH[S,D]$ 为区间 $[0,1]$ 上的函数, $\Phi[S]$ 为网络功能度量指标(平均最短路径距离和极大连通子图率)下没有受到攻击时的值, $W[S,D]$ 为在各种可能的攻击情况下该指标的最小值。 YH 越大,网络越易遭到破坏,抗毁性能越差。

3 攻击策略

在复杂网络抗毁性研究中,一般是以顶点度或介数的大小顺序移除或随机移除作为攻击策略(选择性攻击和随机攻击)研究网络性能的变化^[11]。然而对于应急物流网络,度并不一定代表顶点的重要程度,因为它忽视了网络的流量和负载。图论中,网络的介数反映了相应的顶点或者边在整个网络中的作用和影响力,是一个重要的全局几何量。同时介数也能反映网络流量信息和负载信息^[11]。因此,基于介数攻击研究应急物流网络的抗毁性能具有很强的现实意义。在图论和复杂网络分析中,现有介数可用式(5)和(6)定义^[11]:

$$C_B(v) = \sum_{w \neq w' \in V} \frac{\sigma_{ww'}(v)}{\sigma_{ww'}} \quad (5)$$

$$C_B(e) = \sum_{w \neq w' \in V} \frac{\sigma_{ww'}(e)}{\sigma_{ww'}} \quad (6)$$

其中: $C_B(v)$ 表示网络顶点介数, $\sigma_{ww'}(v)$ 为顶点 w 与 w' 间所有最短物流路径中经过 v 顶点的数量, $\sigma_{ww'}$ 为顶点 w 与 w' 间所有最短物流路径数量; $C_B(e)$ 表示网络边介数, $\sigma_{ww'}(e)$ 为顶点 w 与 w' 间所有最短物流路径中经过边 e 的数量。但通常的介数分析是假定网络中各边的最大物流量是一致的。而在实际应急物流网络中,网络中的每条物流路径(边)和物流顶点通过的最大物流量互不相同。也就是针对整个应急物流系统,网络中各物流路径和顶点即使介数相同,流量也并不完全相同。如果攻击网络流量大的边(顶点)和流量小的边(顶点),给网络带来的危害显然不同,用式(5)和(6)去分析应急物流网络的抗毁性能,与实际并不相符。因此,针对应急物流网络的特点,本文对介数进行重新定义:

$$C'_B(v) = \sum_{w \neq w' \in V} \frac{u_{ww'}(v)}{u_{ww'}} \quad (7)$$

$$C'_B(e) = \sum_{w \neq w' \in V} \frac{u_{ww'}(e)}{u_{ww'}} \quad (8)$$

其中: $C'_B(v)$ 表示网络顶点介数, $u_{ww'}(v)$ 表示顶点 w 与 w' 间所有最短物流路径中经过 v 顶点的所有路径的流量和, $u_{ww'}$ 为顶点 w 与 w' 间所有最短物流路径的总流量; $C'_B(e)$ 表示网络边介数, $u_{ww'}(e)$ 为顶点 w 与 w' 间所有最短物流路径中所有经过边 e 的流量和 (去掉边 e 或者两顶点之间没有路径 $u=0$)。

4 案例分析

为了简化问题,本文主要研究单点配送中心的应急物流系统,网络依据图 1 构建。假设该网络系统包含 13 个不同顶点 (每个顶点代表不同的地域), 其中一个顶点为配送中心, 其他顶点为需求点。配送中心是该网络的关键顶点, 假定它一旦受到攻击, 整个网络瘫痪, 抗毁性为 0。根据应急物流网络要求时间最小这一关键原则以及各条物流路径的运输流量可建立如图 2 所示的网络 (实心顶点为配送中心, 粗线表示基于最短路径规划的物流路径)。括号数组 (s_{ij}, u_{ij}) 分别表示网络边的权值 (s_{ij} 和 u_{ij} 分别代表归一化距离和流量)。实验中随机攻击为蒙特卡罗仿真 20 次的统计平均值, 介数攻击中遇到多个相同的介数极值时, 随机选择一个。

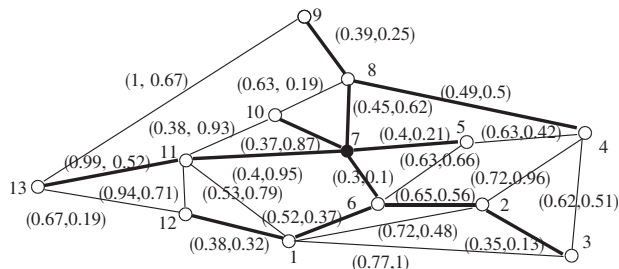


图 2 单点配送中心应急物流网络

根据图 2 网络及应急物流网络特点, 如果攻击非规划物流路径 (细线), 则对当前物流网络不会产生实质影响。因此, 在选择性攻击和随机攻击两种攻击策略下, 本文主要分析规划物流路径 (粗线) 边和顶点受到攻击时网络的抗毁性能。

图 3、4 描述了攻击网络顶点和边时, 最短平均路径距离逆 ($L=L^{-1}$)、极大连通子图率与顶点 (边) 攻击率之间的关系。由图 3、4 可知, 基于改进的介数攻击方式的网络抗毁性能要高于现有的介数攻击方式。这主要是考虑到每条物流路径和网络顶点的最大物流量的缘故; 同一条物流线路或同一个物流网络顶点如果流量不同, 它们在网络中的地位就不同。对于整个网络抗毁性而言, 原有的介数攻击抗毁性是相同的, 改进后的介数攻击抗毁性能不一致, 这样更符合应急物流网络的实际运行情况。由图 3(a) 可知, 在顶点攻击率小于 50% 时, 顶点随机攻击的网络抗毁性能要高于其他三种攻击方式 (L 较大), 这主要是因为随机攻击不一定每次都选择网络的关键 (重要) 顶点; 在 (b) 中因为随机选择了与配送中心相邻的所有边进行攻击, 以致随机攻击的 L 在攻击过程中表现为零值。

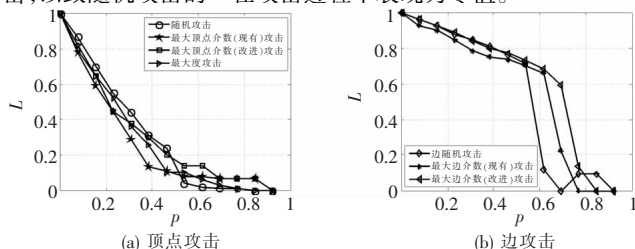


图 3 攻击顶点和边时, 平均最短路径距离逆 L 与顶点 (边) 攻击率 p 的关系

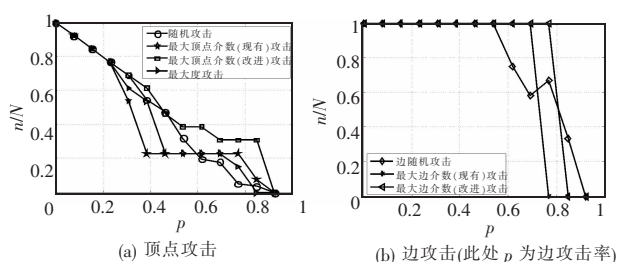


图 4 攻击顶点和边时, 极大连通子图率 (n/N) 与顶点 (边) 攻击率 p 的关系

图 5 描述了顶点、度、边攻击时的抗毁性能和易毁性能。从图 5 中可知最大边介数攻击 (C) 的抗毁性能要远高于顶点和度攻击的抗毁性能。实际上从图 2 可知, 对整个应急物流网络, 若去掉一条边, 其对物资流动的影响并不大; 但是如果去掉其中一个顶点, 则严重妨碍了物资的流动, 会对整个网络的抗毁性能产生较大影响。最大度攻击与最大顶点介数攻击的抗毁性能相差不多, 只是在攻击较多顶点时, 度攻击的抗毁性能较差。另外, 在 50% 以内的顶点 (边) 攻击率情况下, 随机攻击的易毁性要比选择顶点和度攻击的易毁性低, 这与图 3(a) 反映的实验结果是一致的。

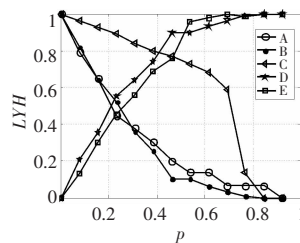


图 5 顶点和边攻击的平均最短路径距离逆 L 、易毁性 (YH) 与顶点 (边) 攻击率 p 的关系

5 结束语

本文从应急物流网络的定义及特点出发, 引入复杂网络理论和图论, 详细分析了应急物流网络的抗毁性能, 并基于应急物流网络的特点对介数模型进行了修正。从理论分析和实验结果可以得知, 网络的最短平均路径距离逆和极大连通子图率能很好地反映应急物流网络的抗毁性能。随机攻击时网络的易毁性小于选择性攻击, 边攻击的抗毁性能高于顶点攻击, 攻击较多顶点时, 度攻击的抗毁性能较差。在进行应急物流网络规划时, 可依据选择或随机攻击概率的大小进行网络布局。当然, 由于应急物流网络的特殊性和复杂性, 在进行网络规划时, 不但要考虑网络的抗毁性, 还需要考虑网络的适应性和稳定性, 这也是需要继续研究的课题。

参考文献:

- [1] TUFEKCI S, WILLIAM A W. The emerging area of emergency management and engineering [J]. IEEE Trans on Engineering Management, 1998, 45(2): 103-105.
- [2] 谭跃进, 吕欣, 吴俊, 等. 复杂网络抗毁性研究的主要科学问题: 中国系统工程学会第十五届年会论文集. 南昌: 中国系统工程学会, 2008: 108-114.
- [3] 曾敏刚, 崔增收, 余高辉. 基于应急物流的减灾系统 LRP 研究 [J]. 中国管理科学, 2010, 18(2): 75-80. (下转第 1325 页)

表 1 不同参数条件下 $G(T)$ 的合作门限

a	b	c	d	$p^*/\%$	T^*
10	50	9	49	5	2/3
10	50	9	49	2	3/4
1	5	0	3	5	20/23
1	5	0	3	3	33/37

注: T^* 列中的两个数据依次为实验值/计算值

在第二组实验中,初始态所有 agent 的策略 $s[i]$ 按照等概率随机分布,并且系统的随机扰动率固定为 $p=5\%$ 。

图 2 中微分方程的向量场显示,融入了随机扰动的复制子动态使 $G(T)$ 稳定于策略单纯形的某个内点,而仿真结果进一步表明, $G(T)$ 的这种演化稳定态并非表现为系统的策略构成比固定不变,而是一种循环的、不确定的、基于时间平均的纳什均衡,其波动幅度与平均合作意愿 avg_i 密切相关。

图 3 显示当 T 在门限值 T^* 附近时,平均合作意愿和策略构成比相当不稳定,演化曲线呈周期性波动。图 4 显示当 T 远大于合作门限值 T^* 时, avg_i 曲线平稳演化,并且其稳定值较图 3 显著增长;而几条主策略的百分比曲线虽然还在波动,但波动频率和幅度都明显偏小。这一结果进一步验证了重复次数 T 是决定合作涌现的关键因素, T 值越大,合作越明显越稳定。

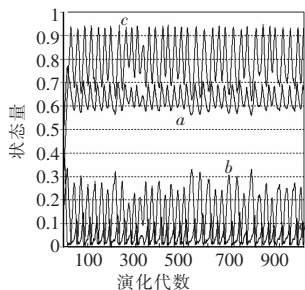


图 3 $G(T)$ 在合作门限附近的演化状态(其中原博弈矩阵 $M[a,b,c,d]=[10,50,9,49]$, $T=3$, $p=5\%$, a 表示 avg_i 曲线, $b/c/d$ 分别表示三种主要策略 $s[1]$, $s[2]$ 和 $s[3]$ 的百分比曲线)

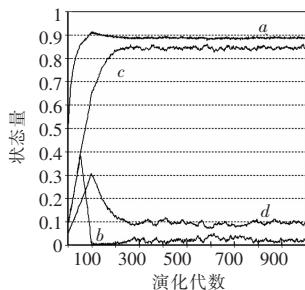


图 4 $G(T)$ 远离合作门限时的演化状态(其中原博弈矩阵 $M[a,b,c,d]=[10,50,9,49]$, $T=10$, $p=5\%$, a 表示 avg_i 曲线, $b/c/d$ 分别表示三种主要策略 $s[8]$, $s[9]$ 和 $s[10]$ 的百分比曲线)

4 结束语

针对 FIPD 博弈中逆向归纳法的结论与实践经验之间存在较大差异的现象,基于 QTS 的策略思想,本文将 FIPD 的多阶段博弈转换为多策略的一次性博弈,建立起扩展的支付矩阵 $M(T)$;然后运用进化博弈理论,在标准的复制子动态中引入随机扰动,从理论上说明了 $G(T)$ 合作涌现的内在原因——合作

涌现是期望效用的复制效应和随机扰动的变异效应两者共同动态演化的结果。最后通过建立多主体系统仿真模型,进一步分析和验证了 $G(T)$ 中合作涌现的门限条件和稳定状态。

相对于精确的定量分析而言,本文式(7)的动态演化方程更侧重于对博弈系统状态量的定性分析,即对合作门限和稳定状态的基本性状进行解释和描述,而具体计算的结果值仅仅作为一种决策参考。因为在现实博弈中,式(7)的扰动率 p 是一个相当不稳定的系统参量,受多种主客观因素的影响。它不仅取决于具体的博弈环境,如博弈主体、支付矩阵和重复次数等,而且即使是在相同环境下的不同博弈阶段, p 值也可能因为参与人主观心态的变化而变化。因此,有关 $G(T)$ 的定量分析还有待于今后实证研究提供更有力的支持。

参考文献:

- [1] SMEAD R. The evolution of cooperation in the centipede game with finite populations [J]. *Philosophy of Science*, 2008, 75 (2): 157-177.
- [2] NORMANN H T, WALLACE B. The impact of the termination rule on cooperation in a prisoner's dilemma experiment [EB/OL]. (2006-12). <http://ssrn.com/abstract=952953>.
- [3] HART S. Evolutionary dynamics and backward induction [J]. *Games and Economic Behavior*, 2002, 41 (2): 227-264.
- [4] LI Jia-wei, KENDALL G. Finite iterated prisoner's dilemma revisited: belief change and end-game effect [C]//Proc of the Behavioral and Quantitative Game Theory: Conference on Future Directions. New York: ACM, 2010: 48.
- [5] FALK A, FISCHBACHER U. A theory of reciprocity [J]. *Games and Economic Behavior*, 2006, 54 (2): 293-315.
- [6] KREPS D M, MILGROM P, ROBERTS J, et al. Rational cooperation in the finite repeated prisoner's dilemma [J]. *Journal of Economic Theory*, 1982, 27 (2): 245-252.
- [7] NEILL D B. An evolutionary resolution to the finitely repeated prisoner's dilemma paradox [EB/OL]. (2003). <http://reports-archive.adm.cs.cmu.edu/anon/2003/CMU-CS-03-155.pdf>.
- [8] CHONG S Y, HUMBLE J, KENDALL G, et al. Iterated prisoner's dilemma and evolutionary game theory: chapter 2 [M]//The Iterated Prisoner's Dilemma: 20 Years On. [S. l.]: World Scientific, 2007.
- [9] ELLISON G. Basins of attraction, long-run stochastic stability, and the speed of step-by-step evolution [J]. *Review of Economic Studies*, 2000, 67 (1): 17-45.
- [10] YOUNG H P, FOSTER D. Cooperation in the short and in the long run [J]. *Games and Economic Behavior*, 1991, 3 (1): 145-156.

(上接第 1262 页)

- [4] IEDRICH F, GEHBAUER F, RICKERS U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disaster [J]. *Safety Science*, 2000, 35 (1/3): 45-57.
- [5] 赵林度. 城市重大危险源应急物流网络研究 [J]. 东南大学学报: 哲学社会科学版, 2007, 9 (1): 27-29.
- [6] 黄运夏, 吴广谋, 李骥. 基于 holon 的应急物流系统控制模型 [J]. 物流科技, 2009 (3): 42-44.
- [7] 许志端. 物流系统柔性的研究 [J]. 管理学报, 2005, 2 (4): 441-445.
- [8] 王建, 张文杰. 供应链系统可靠性分析 [J]. 中国安全科学学报, 2003, 13 (11): 73-75.
- [9] 吴依伟, 赵林度. 应急物流网络弹性初探 [J]. 价值工程, 2008

(4): 1-3.

- [10] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Nature*, 2000, 406 (6794): 378-382.
- [11] HOLME P, KIM B J, YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks [J]. *Physical Review E*, 2002, 65 (5): 1-14.
- [12] 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究 [J]. 系统工程学报, 2005, 20 (2): 128-131.
- [13] 李靖, 张永安. 复杂网络理论在物流网络研究中的应用 [J]. 中国流通经济, 2011 (5): 38-41.
- [14] LATORA V, MARCHIORI M. Vulnerability and protection of infrastructure networks [J]. *Physical Review E*, 2005, 71 (1): 015103-1-015103-4.