

“一带一路”国家数字服务贸易网络结构韧性评估

王晴

江苏大学财经学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2024年6月28日; 录用日期: 2024年7月12日; 发布日期: 2024年8月19日

摘要

数字服务贸易已成为拉动各国贸易增长和经济发展的新引擎, 在“一带一路”倡议下, 沿线国家数字服务贸易开展日益紧密, 贸易环境不确定性也在增加, 研究“一带一路”沿线国家数字服务贸易网络韧性对保障各国数字贸易发展具有深远意义。本文考察六类数字服务贸易产业, 采用中断模拟方法, 通过比较“一带一路”沿线国家和全球数字服务贸易网络情况, 从静态和动态两方面综合分析“一带一路”沿线国家数字服务贸易网络的韧性表现。结果表明: 1) 六类数字服务贸易网络的平均路径长度普遍较短, 平均聚类系数较高, 网络层级性明显; 2) 电子信息和其他商业服务网络呈现异配性特征, 表现出一定的韧性水平; 3) 相较随机攻击, 蓄意攻击下数字服务贸易网络性能下降速率更快且综合韧性水平更低; 4) 综合四种中断情况, 其他商业服务贸易网络韧性水平最高, 电信、计算机和通讯贸易网络知识产权使用贸易网络韧性较高, 保险养老金服务和金融贸易网络韧性水平较低, 个人、娱乐和文化网络总体韧性水平最低。

关键词

数字服务贸易, 网络结构韧性, 中断模拟, 复杂网络

Research on Structural Resilience of Digital Services Trade Network of the Countries along the “Belt and Road”

Qing Wang

School of Finance and Economics of Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Jun. 28th, 2024; accepted: Jul. 12th, 2024; published: Aug. 19th, 2024

文章引用: 王晴. “一带一路”国家数字服务贸易网络结构韧性评估[J]. 电子商务评论, 2024, 13(3): 7721-7734.
DOI: 10.12677/ecl.2024.133949

Abstract

Digital trade has become an emerging and important form of global trade. Under the “Belt and Road” initiative, the digital service trade of countries along the Belt and Road has become increasingly close, and the uncertainty of the trade environment is also increasing. Studying the resilience of digital service trade network of countries along the “Belt and Road” has far-reaching significance for ensuring the development of digital trade of various countries. This paper examines six types of digital service trade industries, adopts the interruption simulation method, and comprehensively analyzes the resilience of the digital service trade networks of the countries along the “Belt and Road” from both static and dynamic aspects by comparing the situation of the countries along the “Belt and Road” and the global digital service trade networks. The results show that: 1) The average path length of the six types of digital service trade networks is generally short, the average clustering coefficient is high, and the network hierarchy is obvious; 2) Electronic information and other commercial service networks have heterogamous characteristics, showing a certain level of resilience; 3) Compared with random attacks, the performance decline rate of digital service trade network under deliberate attacks is faster and the comprehensive resilience level is lower; 4) Combining the four disruption scenarios, other business service trade networks have the highest resilience, telecommunications, computer and communication trade networks have the higher resilience, insurance and pension services and financial trade networks have the lower resilience, and personal, entertainment and cultural networks have the lowest resilience.

Keywords

Digital Services Trade, Network Structural Resilience, Disruption Simulation, Complex Network

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着数字技术升级迭代以及数字信息普及应用，数字贸易在世界范围内迅速发展，成为推动贸易发展的新动力。数字服务贸易作为数字贸易的重要组成部分[1]，已成为各国关注的焦点。2021年10月商务部等24部门印发的《“十四五”服务贸易发展规划》中首次将数字贸易列入其中，由此可见我国对高质量发展数字服务贸易的重视。联合国贸易和发展会议统计数据显示，2021年全球可数字化交付服务贸易出口已占服务贸易出口的62.8%。然而，伴随着贸易摩擦[2]、地缘政治冲突以及新冠疫情冲击，贸易保护主义抬头，不确定性因素增多，严重阻碍数字服务贸易的经济拉动作用[3]，研究数字服务贸易网络的韧性问题尤为重要。

与此同时，在国际环境动荡变革和全球经济衰退背景下，国内外学者开始广泛关注韧性问题的研究。韧性最早来源于工程力学，Holling [4]将韧性概念引入到生态系统研究，其基本含义是指系统遭受外部冲击后，维持自身稳定并恢复原有状态的能力。更为广义的韧性概念中增加了学习力[5]、感知力[6]和协同力[7]，即在受到外界冲击后，系统具有抵抗、适应、恢复及转型升级能力。Martin [8]提出经济韧性的概念，指经济系统抵抗冲击的能力、在冲击过后恢复至原有状态的能力，危机后重新组织要素并调整以适应未来经济发展的能力。贸易网络作为复杂网络的一种，频繁遭受贸易国间经济、政治、文化等因素冲击，因而贸易网络韧性应具备面对持续性冲击的抵抗力和冲击结束后的恢复调整能力。目前，相关学者

对不同领域的网络韧性进行研究，如区域[9]、城市[10]、资源、交通等，通过对复杂系统进行多维指标评估和中断模拟，评估多重网络韧性水平并比较。

本文聚焦数字服务贸易网络，借助复杂网络理论，综合考虑各类数字服务贸易网络韧性表现情况，恰逢“一带一路”倡议提出十年之际，考察一带一路倡议在数字服务贸易领域成效，从静态指标衡量和动态中断模拟两方面考察一带一路国家数字服务贸易网络结构韧性情况，以识别当前数字服务贸易风险产业，更具针对性地提高抗风险能力，为促进数字服务贸易网络韧性发展提供方向参考。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究对象

参考美国国际贸易委员会(USITC)和美国商务部经济局(BEA)的相关研究报告，本文将数字服务贸易定义为“以数字技术为手段，依托互联网交付，贸易主体为数据信息的服务贸易”。借鉴陆菁[11]和吕延方[12]的测度方法对数字服务贸易进行统计，将以下产业归为数字服务贸易范围：一是借助互联网进行的金融、保险和养老金服务；二是运用数据等信息资源进行服务的电信、计算机和信息服务；三是涉及专利咨询和管理服务的知识产权使用服务；四是通过互联网进行交付的其他商业服务；五是以互联网作为传播媒介并提供数字产品的个人、文化和娱乐服务。因此，本文将数字服务贸易网络分为六类，即“保险与养老金服务贸易网络”、“金融服务贸易网络”、“知识产权使用费贸易网络”、“电信、计算机与信息服务贸易网络”、“个人、文化与娱乐服务贸易网络”和“其他商业服务贸易网络”。

2.2. 研究方法

复杂网络研究更多关注网络中个体间相互关联作用的拓扑结构，贸易网络反映了各国间相互贸易的行为关系，其结构属性是衡量网络功能和韧性的重要手段[13]。贸易网络结构韧性反映为，在应对危机、化解危机、突破危机过程，各贸易国家或地区调整自身贸易关联而产生的对整体网络连通、传输效能的影响。目前，贸易网络韧性的研究尚处在初步阶段，多数学者通过构建韧性指标来分析网络的韧性特征，如传输性、集聚性、层级性[14]、连通性、匹配性[15]以及稳定性等。通常网络传输路径越短、集聚程度越高、层级性越扁平以及呈现出异配性特征时，网络整体的韧性水平越高[16]。通过网络指标测度更多展现的是网络的静态韧性特点，难以体现韧性所倡导的“过程性”。因此，本文参考于娱[17]的研究，借助中断模拟[18][19]，通过对网络进行随机或蓄意的中断攻击，观察网络性能的动态变化，进而对贸易网络动态韧性水平进行测度。

综上，本文从静态和动态两方面评估数字服务贸易网络韧性。静态评估采用传输性、集聚性、层级性和匹配性指标衡量，见表1。动态评估则进行中断模拟来分析网络遭受攻击破坏后性能变化情况和抵抗恢复能力。

2.2.1. 贸易网络结构韧性静态评估

1) 传输性

本文采用平均路径长度来衡量贸易网络的传输性。网络平均路径长度是指网络中一个节点与另一个节点建立联系所需经过的最短路径条数，网络平均路径长度越短说明网络传输效率越高、传播和扩散能力越强。通常将贸易网络与相同规模 ER 随机网络的计算数值进行对比，来评估网络传输效率高。计算公式如下：

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in n} d_{ij} \quad (1)$$

Table 1. Static evaluation index of network structure resilience**表 1.** 网络结构韧性静态评估指标

影响因素	研究指标	意义
传输性	平均路径长度	网络的联通和扩散效率
集聚性	平均聚类系数	网络的集聚程度
层级性	度分布斜率	网络中贸易国地位差异程度
匹配性	度关联斜率	网络中贸易国间联系程度

公式中： L 为网络平均路径长度； N 为网络节点数； d_{ij} 是节点*i*到节点*j*所需经过的路径条数的最小值。

2) 集聚性

本文采用平均聚类系数测算贸易网络的集聚性。平均聚类系数是网络中所有节点局部聚类系数的平均值，反映网络节点间的集聚程度。数值越大说明网络间节点联系越紧密；反之则网络集聚程度越低，贸易联系更为分散。通常与相同规模 ER 随机网络对比来评估网络集聚程度。计算公式如下：

$$C_i = \frac{2E_i}{K_i(K_i - 1)} \quad (2)$$

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

公式中： C_i 为节点的局部聚类系数； K_i 为节点的度； E_i 为节点与相邻点间实际产生的边数； C 为网络平均聚类系数。

3) 层级性

本文参照 Crespo [20]的研究，采用度分布的斜率衡量网络层级性。度是指贸易网络中与一个国家具有贸易联系的其他国家的总数，将网络中所有节点的度值与其相应的位序绘制成的曲线即为度分布。度分布较好地反映网络整体的节点分布情况，度分布的斜率越大，网络的层级性越显著，网络成员间的地位差异越大。计算公式如下：

$$K_i = C(K_i^*)^\alpha \quad (4)$$

$$\ln K_i = \ln C + \alpha \ln K_i^* \quad (5)$$

公式中： K_i^* 为节点*i*的度在所有节点度中的排序数(降序排列)； C 为比例常数； α 为度分布曲线的斜率。

4) 匹配性

本文采用度关联的斜率分析贸易网络的匹配性。网络中节点之间的联系并不一定均等，一些节点倾向于与具有某些特征的其他节点进行联系。度关联是指网络中每个节点与其相邻节点平均度的函数关系。Newman [21]提出同配性和异配性来反映节点间倾向连接的相关关系，其中同配性是指自身度值大的节点倾向于与其他度值大的节点建立联系，异配性则相反度值小的点倾向于连接度值大的点。度关联的斜率为正，网络即为同配性，反之则为异配性，斜率的绝对值大小表示网络同配性和异配性程度大小。

$$\overline{K_i} = \frac{\sum_{i \in V} K_i}{V} \quad (6)$$

$$\overline{K_i} = D + bK_i \quad (7)$$

公式中： $\overline{K_i}$ 为节点的相邻节点的平均度； V 是节点相邻节点的集合； D 为常数； b 为度关联系数。若 $b > 0$ ，则该网络具有同配性； $b < 0$ ，则该网络具有异配性。

2.2.2. 贸易网络结构韧性动态评估

借鉴 Nan 和 Sansavini [22]对动态系统韧性研究的方法，借助 python 中 networkx 包编写中断及恢复模拟程序，通过模拟贸易网络在遭受不同形式的破坏后网络性能的变化情况，计算相应指标来测度贸易网络面对风险时抵抗吸收能力、恢复适应能力以及综合韧性水平。

1) 中断规则设置

通常情况下，贸易网络所遭受的冲击包括随机攻击和蓄意攻击。其中，随机攻击是指对贸易网络中随机一个国家或者一个贸易联系进行破坏使其失效，在现实的数字服务贸易中表现为不可预测的自然灾害、设备失效、汇率变动等导致进行数字服务贸易条件破坏的场景；蓄意攻击是指按照一定的规则或策略，对贸易网络中的节点或边进行失效，在现实中表现为经济制裁、贸易战、数据窃取、政府限制和监管等。当网络中的一个节点失效时，伴随其发生的贸易关系也会消失，及该点的连边也失效，因而每次中断后网络都会生成新的结构，进而表现出网络性能变化。本文设置了四种不同的中断攻击方式，随机中断为随机中断-恢复点规则和随机中断-恢复边规则，蓄意中断包括度值大小中断-恢复点和介值大小中断-恢复点规则。具体规则如下：

在随机攻击策略下，每个时间段内失效网络中 5% 的节点或 5% 的连边，直到网络中 50% 的节点或 50% 的连边失效时攻击结束，中断结束后网络开始恢复，每个时间段内恢复 5% 的先前失效节点或连边，其中节点恢复时原连连边关系也随之恢复，直到网络性能恢复到初始状态。在蓄意攻击策略下，将网络中节点按照网络地位计算值进行排序，并依此顺序删除网络中 1% 的节点，重新计算网络中剩余节点的度值和特征向量中心性值并排序，直到删除原网络中 10% 的节点，中断结束开始恢复，每次恢复被删除节点中 1% 的节点，直到恢复到原始状态。恢复方式有随机恢复和顺序恢复，其中随机恢复用于随机中断，顺序恢复用于蓄意中断，即先失效的点先恢复。

2) 贸易网络结构韧性动态评估方法

本文参考 Nan 和王兴隆[23]对网络系统韧性测度阶段的划分以及各阶段网络系统所体现的能力，评估数字服务贸易网络结构的动态韧性。图 1 为系统受干扰后在不同阶段的韧性动态变化示意图。纵轴为随时间变化的网络性能变化函数，本文参考王妍[24]的研究，用网络效率指标衡量。

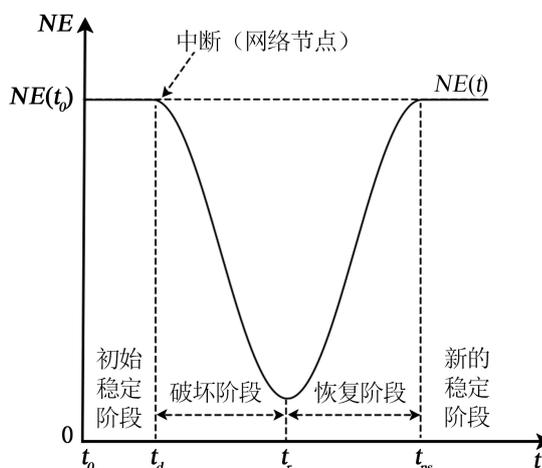


Figure 1. Diagram of network interruption and recovery process simulation
图 1. 网络中断及恢复过程模拟图

$t_0 < t < t_d$ 时段内网络系统初始稳定阶段, 此时网络并未受到外界破坏; $t_d < t < t_r$ 时段为网络受到干扰的破坏阶段(Disruptive Stage, DS), 网络在时刻受到中断干扰, 网络效率开始下降, 并在 t_r 时刻网络性能下降到最低值。为衡量网络系统在破坏阶段的韧性变化, 以下定义鲁棒性 R 、破坏速率 RC_{DS} 、破坏阶段性能损失 EL_{DS} 以及破坏阶段单位时间性能损失 $UTEL_{DS}$ 。

鲁棒性(R)是指当网络在面对外部干扰攻击时, 仍能维持其基本功能和稳定状态的能力, 公式如下:

$$R = \min \{NE(t)\}, t_d < t < t_{ns} \quad (8)$$

公式中: $NE(t)$ 为网络性能随时间变化的离散函数; t_{ns} 为网络效率恢复至最初状态的时刻; R 为在该时间段内网络性能的最低值。

破坏速率(RC_{DS})可以衡量在受到中断干扰后网络性能损失的快慢程度, 定义为在破坏阶段曲线的平均斜率, 公式如下:

$$RC_{DS} = \frac{\left| \sum_{i=1}^{L_{DS}} \frac{NE(t_i) - NE(t_i - \Delta t)}{\Delta t} \right|}{L_{DS}}, t_d < t_i < t_r \quad (9)$$

公式中: L_{DS} 为网络效率函数在破坏阶段检测到的线段条数; i 为检测到的第 i 条线段; $NE(t_i)$ 表示在第 i 条线段上网络效率 E 的值。

性能损失 EL_{DS} 可以衡量在受到中断干扰后网络性能损失的程度, 定义为在干扰发生后 $E(t_0)$ 与 $E(t)$ 间所围成区域的面积。同时, 考虑到破坏事件的时间影响, 本文引入单位时间性能损失 $UTEL_{DS}$, 来表示单位时间网络所产生的性能损失。在破坏阶段, 单位时间内性能损失越小, 网络的抵抗能力越强。两者公式如下:

$$EL_{DS} = \int_{t_d}^{t_r} (NE(t_0) - NE(t)) dt \quad (10)$$

$$UTEL_{DS} = \frac{\int_{t_d}^{t_r} (NE(t_0) - NE(t)) dt}{t_r - t_d} \quad (11)$$

$t_d < t < t_r$ 时段为网络性能的恢复阶段(Recovery Stage, RS), 随着恢复时间的推移, 网络性能开始逐渐恢复直到达到新的稳定状态。此阶段定义网络的恢复速率 RC_{RS} 、性能恢复 EL_{RS} 以及单位时间性能恢复 $UTEL_{RS}$ 。在恢复阶段, 单位时间内性能恢复越大, 网络的调整恢复能力越强。公式如下:

$$EL_{DS} = \int_{t_d}^{t_r} (NE(t_0) - NE(t)) dt \quad (12)$$

$$UTEL_{DS} = \frac{\int_{t_d}^{t_r} (NE(t_0) - NE(t)) dt}{t_r - t_d} \quad (13)$$

$$UTEL_{RS} = \frac{\int_{t_r}^{t_{ns}} (NE(t_0) - NE(t)) dt}{t_{ns} - t_r} \quad (14)$$

公式中, L_{RS} 为恢复阶段检测到的线段条数。

$t \geq t_{ns}$ 时段为网络系统达到新的稳定状态, 此时网络的性能保持在一个新的稳定水平。新的稳定水平可能小于、等于或高于初始稳定水平, 本文重点分析恢复至初始水平的情形。为全面衡量网络系统受到外界干扰后韧性过程的变化情况, 参考于娱的研究, 引入网络综合韧性指标 CRL (Comprehensive Resilience Level), 公式如下:

$$CRL = 100 \times R \times \frac{RC_{RS}}{RC_{DS}} \times \frac{UTEL_{RS}}{UTEL_{DS}} \quad (15)$$

2.2.3. 数据来源

本文以 195 个国家(地区)作为研究对象, 选取 2021 年国家间数字服务贸易出口额作为贸易网络边的权重, 其中贸易数据来自 OECD 贸易平衡数据库, 借鉴数字服务贸易定义并依据其服务贸易产业分类, 筛选出 40 个“一带一路”签约国家, 分别构建全球和一带一路国家六类数字服务贸易有向加权网络。为更具代表性地反映贸易网络特征, 本文借鉴姚星和梅鹤轩的研究, 利用阈值法提炼网络[25], 对出口额小于 1000 万美元的贸易关联进行清除, 最终建立 6 个 196×196 的邻接矩阵和 6 个 40×40 的邻接矩阵, 并将贸易网络数据导入 Ucinet6.64 和 python 中进行计算运行。

3. 数字服务贸易网络韧性评估结果与分析

3.1. 数字服务贸易网络静态韧性分析

3.1.1. 网络传输性和集聚性

表 2 分别展示了全球和一带一路国家数字服务贸易网络的基本参数特征。可以发现, 其他商业服务贸易网络的连边数和平均边权重最大, 表明其他商业服务贸易是数字服务贸易的最大组成部分, 相比之下, 文化娱乐领域的贸易规模较为有限。其中, 一带一路国家数字服务贸易中金融网络、电子信息网络和其他商业服务网络的平均边权重均大于全球范围内对应值, 这说明参与一带一路的国家间进行其他商业服务、电信、计算机与信息服务以及金融服务的贸易额更为庞大。网络密度反映了网络中国家之间贸易联系的紧密程度, 网络密度越大, 贸易国之间的交易越为频繁。观察表 2 可得, 其他商业服务产业的贸易联系最为紧密, 其次是电子信息网络。值得注意的是, 一带一路国家间各类数字服务贸易网络密度均高于全国范围, 这表明在一带一路倡导下, 签署参与一带一路协议的国家更为频繁地进行数字服务贸易。

Table 2. Basic characteristics parameters of the Belt and Road countries digital services trade network

表 2. 全球与一带一路国家数字服务贸易网络基本特征参数

范围	贸易网络	节点数	边数	平均边权重	网络密度	平均路径长度	平均聚类系数
全球	保险养老	195	1533	5.261	0.041	2.014	0.371
	金融	195	1882	12.182	0.05	1.887	0.354
	知识产权	195	1554	12.644	0.041	1.893	0.366
	电子信息	195	3218	17.333	0.085	1.87	0.463
	其他商业	195	4545	41.802	0.12	1.832	0.457
	文化娱乐	195	952	2.753	0.025	2.026	0.324
一带一路 国家	保险养老	40	150	4.294	0.096	2.045	0.358
	金融	40	211	20.431	0.135	1.933	0.395
	知识产权	40	160	8.895	0.103	2.251	0.409
	电子信息	40	419	20.797	0.269	1.742	0.521
	其他商业	40	566	52.427	0.363	1.62	0.621
	文化娱乐	40	87	1.907	0.056	3.205	0.224

参考王妍的研究[24],对一带一路国家数字服务贸易网络的传输性和集聚性进行测度,分别构建与对应网络规模相同的ER随机网络,并计算其平均路径长度和平均聚类系数,结果见表3。在网络传输性方面,各类网络的平均路径长度在1.623.205之间,低于对应随机网络的范围(1.6443.574),说明参与一带一路的国家间数字服务贸易网络整体具有良好的连通性和高效的传输效率。特别是保险和养老金网络的平均路径长度与随机网络相比差距最大,表明在一带一路倡议下参与国更容易对保险、养老金服务建立贸易联系,潜在的知识创新和成熟的经验传播更容易发生,网络面对危机时抵抗调节能力强。相反,其他商业服务网络的平均路径长度接近随机网络,表明网络传输效率和扩散能力较弱,对外界风险做出调整响应较迟钝,导致网络弹性不足。

在网络集聚性方面,一带一路参与国贸易网络的平均聚类系数在0.2240.621之间,远高于随机网络(0.0380.352),这表明数字服务贸易网络整体呈现明显的集聚效应,贸易国之间联系紧密、彼此信任。具体来看,其他商业服务和电子信息网络的平均聚类系数较高,这两类网络的结构更为紧密,但过高的集团化结构须注意区域锁定、网络僵化和弹性降低等问题。网络的集聚程度对其韧性具有双重影响。一方面,贸易网络集聚程度高时,贸易国受到贸易干扰后能够更迅速地寻找新贸易伙伴,然而若集聚中心国家受到破坏则网络更容易崩溃;另一方面,当贸易网络集聚程度较低时,贸易国之间加入其他国家的机会更多,破坏事件的影响力也较小,对整体网络的影响有限。

Table 3. Average path length and average clustering system of digital service trade network in Belt and Road countries
表 3. 一带一路国家数字服务贸易网络平均路径长度和平均聚类系数

	贸易网络		ER 随机网络	
	平均路径长度	平均聚类系数	平均路径长度	平均聚类系数
保险养老	2.045	0.358	2.813	0.091
金融	1.933	0.395	2.279	0.157
知识产权	2.251	0.409	2.661	0.113
电子信息	1.742	0.521	1.826	
其他商业	1.620	0.621	1.644	0.352
文化娱乐	3.205	0.224	3.574	0.038

3.1.2. 网络层级性

度分布反映网络中贸易国际地位差异情况,一带一路参与国数字服务贸易网络的度分布情况如图2所示。通过对比度分布斜率计算结果,发现无论是全球范围还是一带一路参与国范围,构成的数字服务贸易网络均表现出明显的层级性特征,且由一带一路倡议下的网络度分布斜率更大,说明参与一带一路倡议的国家间非均质化现象突出,贸易网络的功能由处于核心位置的贸易国决定。观察图2可以发现,一带一路参与国家数字服务网络的度分布拟合曲线的斜率均较大,在0.7491.001之间,贸易网络中国家地位差距比较大。具体来看,金融养老网络层级性最为显著,度分布斜率达1.001,该网络中核心贸易国地位更为突出,核心国家贸易也更为频繁,有利于提高网络凝聚力,同时也可能促使边缘贸易国产生贸易依赖,使得网络的脆弱性提升。其他商业服务贸易网络的层级性较其他低,度分布斜率为0.749,表明该网络较其他网络的极化现象有所减缓。

3.1.3. 网络匹配性

为反映各类数字服务贸易国家建立贸易联系的偏好倾向,图3列出了度关联情况。全球数字服务

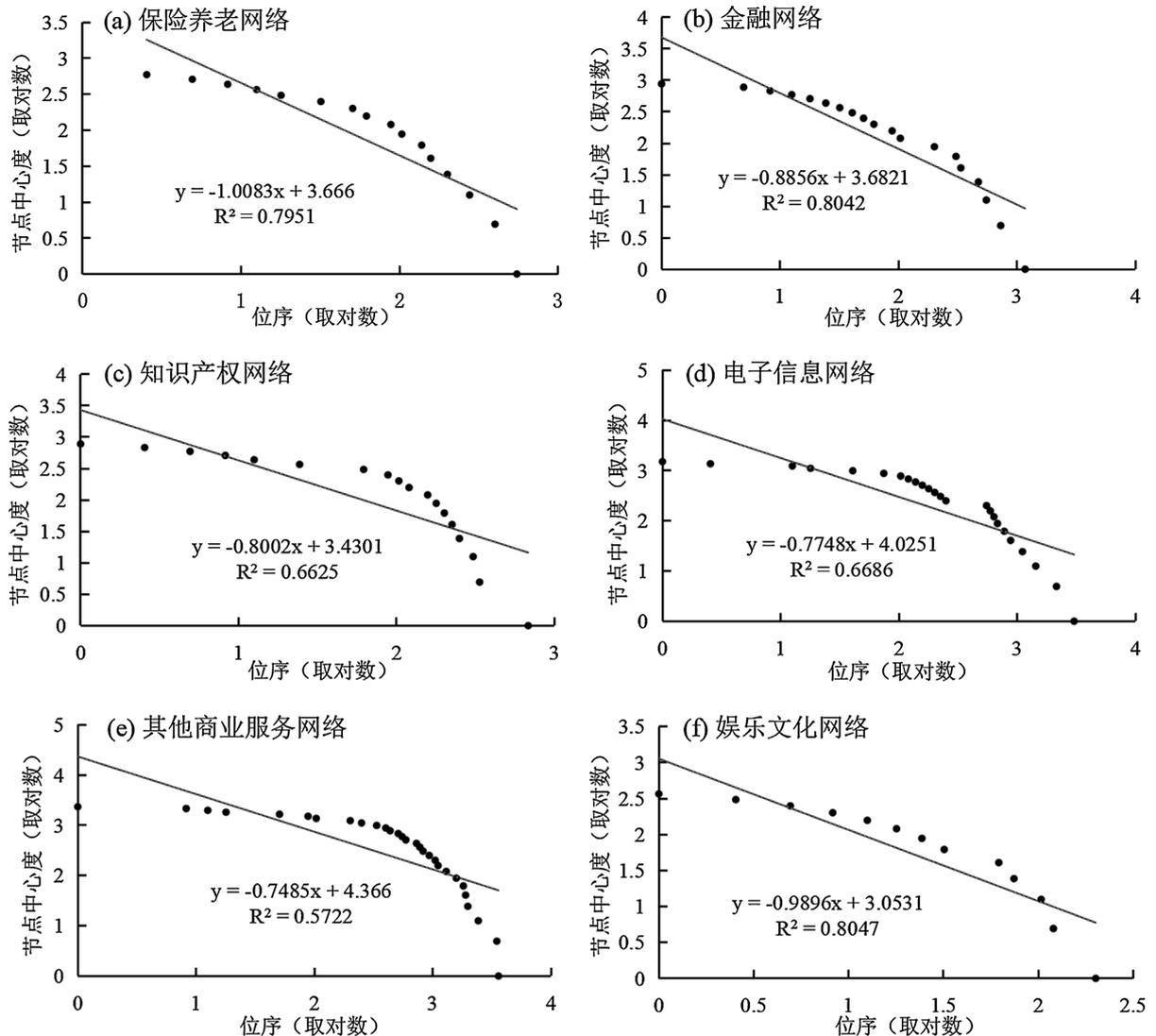


Figure 2. The hierarchy of the digital service trade network of the Belt and Road countries

图 2. 一带一路参与国数字服务贸易网络层级性

贸易中，只有金融网络和其他商业服务贸易网络的度分布斜率是负值，分别为 -0.026 和 -0.324 ，呈现出异配性特征；一带一路参与国数字服务贸易中，则是电信网络和其他商业服务网络表现出异配性，度分布斜率分别为 -0.396 和 -0.288 。数字服务贸易网络的异配性的特征，指节点度数较低的国家更倾向于与节点度数较高的国家进行数字服务贸易，贸易国之间的联系路径呈现出多样化和异质化的趋势。这种贸易偏好有利于削弱因联系路径固化而带来的高层级问题，并加强核心贸易群与边缘节点以及其他贸易群之间的高效连接，从而提高网络的韧性水平。其中，电子信息网络的异配性最强，这意味着该网络有助于实现异质化和开放化，从而推动网络创新和功能恢复。观察图 3 发现，一带一路参与国构成的保险养老网络、金融网络、知识产权网络和娱乐文化网络表现为同配性特征，同配性网络可能由于固定的联系路径而难以应对变化，从而增加了贸易风险。

3.2. 数字服务贸易网络动态韧性分析

依据上文说明的中断规则，借助 python 运行贸易网络中断和恢复代码程序，模拟数字服务贸易网络

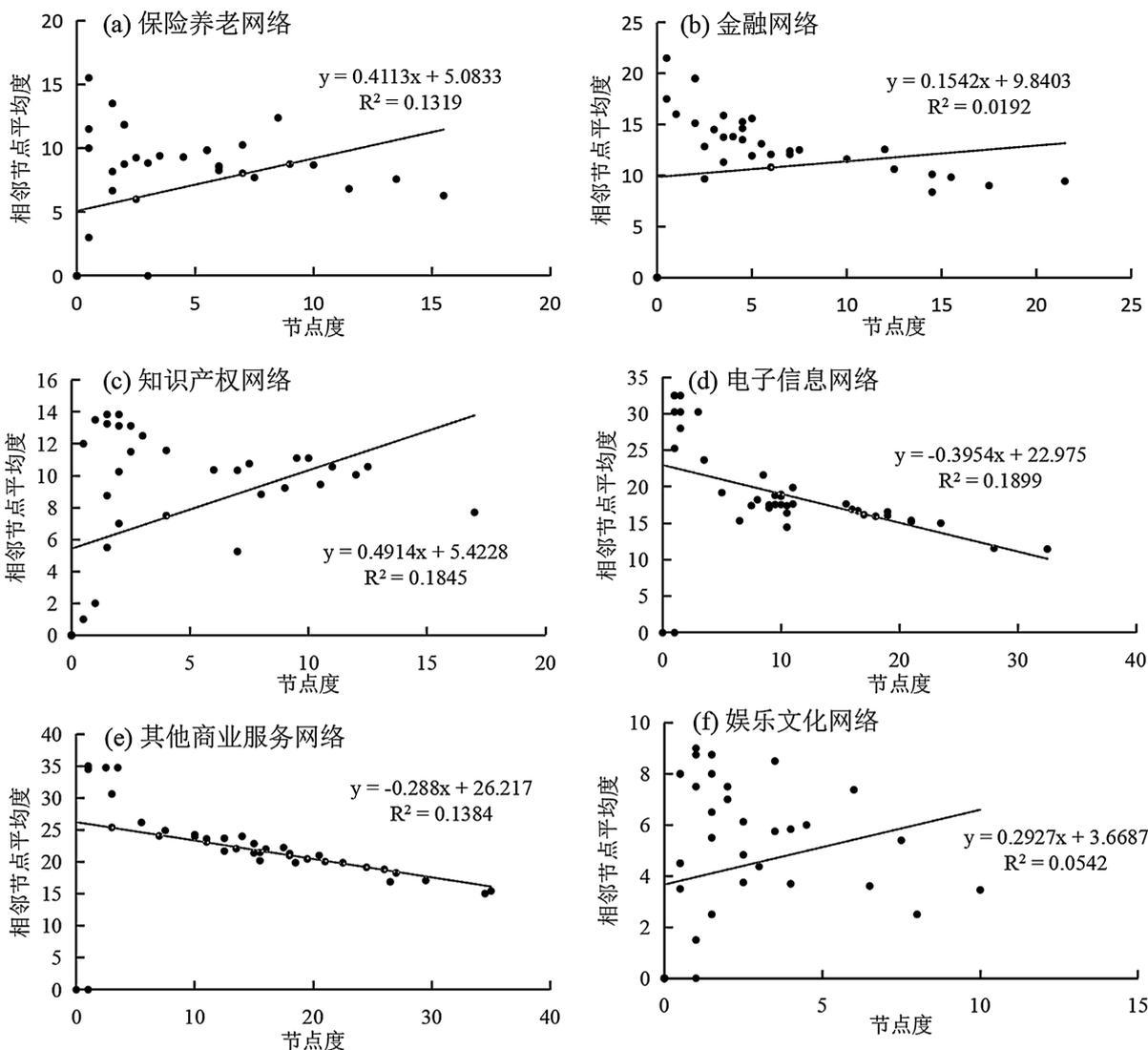


Figure 3. The matching of the digital service trade network of the Belt and Road countries

图 3. 一带一路国家数字服务贸易网络匹配性

受到外界干扰攻击后网络性能的变化过程。不同中断规则下，一带一路国家六类数字服务贸易网络韧性变化过程如图 4 所示。

3.2.1. 中断模拟下贸易网络性能的动态变化

在 $t = 0$ 时，贸易网络开始受到中断攻击，网络性能开始下降。观察图 4 可知，在针对贸易网络中国家进行攻击时，随机中断下网络效率变化幅度较小，而蓄意中断下网络效率下降幅度大，尤其是其他商业服务和电子信息网络。

观察图 4，可以发现相较于蓄意中断，随机中断下贸易网络效率的变化较为平稳，这表明蓄意的贸易干扰对一带一路参与国家间开展数字服务贸易的破坏力更大，使其建立贸易联系的不确定性增强。

在随机中断下，贸易网络效率在针对边的攻击中下降幅度更大，而针对点的攻击中下降幅度较小，说明一带一路参与国中，随机性的破坏使得一国贸易中断后，其他国家可以较容易地寻找其他替代国家，而随机性风险干扰到国家间贸易联系时，由于网络间联系紧密，一条联系路径失效，整体的网络通达性

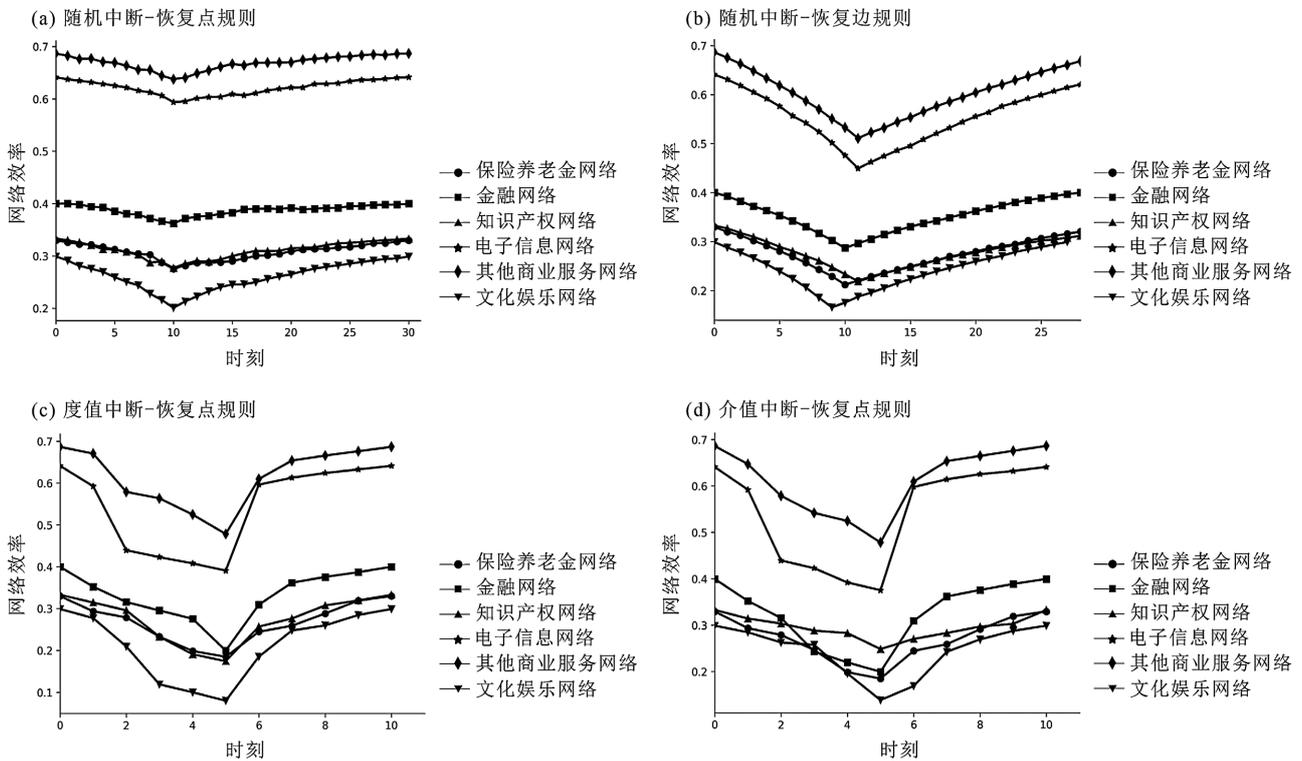


Figure 4. The performance change process of digital service trade network in Belt and Road countries

图 4. 一带一路国家数字服务贸易网络性能变化过程

会下降很多。在蓄意攻击下，依据度值和介值大小攻击，六类网络性能变化类似，即初始破坏阶段，网络效率下降较慢，在某一时刻突然下降，随后趋于线性下降；恢复阶段初期，网络初期恢复最快，之后逐渐趋于平稳恢复。从变化幅度来看，电子信息网络在中断模拟下网络效率波动幅度最大，而保险养老和知识产权网络波动幅度最小，这表明电子信息网络受针对性破坏事件的影响最为显著，而保险、养老金和知识产权使用服务贸易影响较小。比较两种中断规则，可以发现金融网络在针对介值攻击下，初始网络效率下降速度更快，而文化娱乐网络在针对度值攻击下，初始下降速率更快，这表明扮演贸易中转站角色的一带一路参与国对金融贸易影响更大，贸易联系丰富的参与国对文化娱乐贸易顺畅程度影响更多。其中，知识产权使用网络在依据介值攻击时平均下降速率和恢复速率较度值攻击小，而其他商业服务网络和电子信息网络和均较大，这说明其他商业服务网络和电子信息网络在对度值和介值的中断破坏下更敏感脆弱，知识产权网络在针对介值的攻击中更具有抵抗力。

3.2.2. 数字服务贸易网络韧性能力表现

依据上述贸易网络遭受中断攻击的网络性能变化，计算一带一路国家和全球贸易网络各阶段指标，测度结果见表 4。

在网络鲁棒性(R)方面，一带一路参与国贸易网络在四种攻击下的 R 值均高于全球贸易网络，说明一带一路倡议下国家间进行数字服务贸易的抗干扰性更强，贸易风险分散能力更强。一带一路国家贸易网络中，蓄意中断后网络鲁棒性显著低于随机中断情况，这意味着确定性的贸易攻击，如经济制裁、贸易战和政府贸易监管等措施，对数字服务贸易稳定带来的负面影响更严重。在四种中断规则下，其他商业服务贸易和电子信息贸易的 R 值均处于较高水平，说明从事该类贸易能够通过重新分配资源等手段相对迅速地适应环境变化，具有较强的抗干扰力和自适应力。在随机干扰下，针对边攻击时网络鲁棒性普遍

更低，即贸易联系的随机破坏更容易降低贸易顺畅程度；在蓄意干扰下，知识产权网络和娱乐文化网络在介值攻击时 R 值分别为 0.248 和 0.138，均高于度值攻击 R 值，说明该网络中贸易联系丰富的国家多，对网络破坏更大。

Table 4. Network dynamic resilience indicators of digital services trade

表 4. 数字服务贸易网络动态韧性指标

规则	贸易网络	一带一路国家					全球				
		R	RC_{DS}	$UTEL_{DS}$	RC_{RS}	$UTEL_{RS}$	R	RC_{DS}	$UTEL_{DS}$	RC_{RS}	$UTEL_{RS}$
随机攻击 - 恢复点	保险养老	0.275	0.005	0.019	0.003	0.024	0.172	0.004	0.019	0.002	0.017
	金融	0.362	0.004	0.015	0.002	0.012	0.221	0.003	0.014	0.002	0.016
	知识产权	0.277	0.006	0.024	0.003	0.021	0.181	0.003	0.012	0.001	0.011
	电子信息	0.594	0.005	0.018	0.002	0.021	0.291	0.003	0.013	0.001	0.013
	其他商业	0.638	0.005	0.021	0.002	0.016	0.414	0.004	0.014	0.002	0.016
	娱乐文化	0.201	0.010	0.042	0.005	0.037	0.131	0.003	0.012	0.001	0.013
随机攻击 - 恢复边	保险养老	0.212	0.012	0.052	0.006	0.053	0.145	0.006	0.031	0.003	0.030
	金融	0.287	0.011	0.050	0.006	0.048	0.183	0.006	0.030	0.004	0.028
	知识产权	0.219	0.010	0.050	0.005	0.049	0.151	0.006	0.025	0.003	0.025
	电子信息	0.449	0.017	0.081	0.009	0.080	0.242	0.007	0.034	0.004	0.033
	其他商业	0.511	0.016	0.079	0.009	0.078	0.364	0.009	0.038	0.004	0.037
	娱乐文化	0.166	0.015	0.057	0.007	0.058	0.104	0.005	0.024	0.003	0.024
度值攻击 - 恢复点	保险养老	0.185	0.029	0.079	0.029	0.056	0.048	0.008	0.109	0.009	0.034
	金融	0.199	0.040	0.093	0.040	0.053	0.036	0.011	0.146	0.011	0.027
	知识产权	0.174	0.031	0.077	0.032	0.050	0.028	0.009	0.125	0.009	0.026
	电子信息	0.391	0.049	0.165	0.050	0.043	0.104	0.011	0.127	0.011	0.036
	其他商业	0.478	0.041	0.102	0.042	0.048	0.170	0.014	0.165	0.015	0.034
	娱乐文化	0.080	0.043	0.121	0.044	0.065	0.021	0.007	0.099	0.007	0.025
介值攻击 - 恢复点	保险养老	0.185	0.029	0.076	0.029	0.055	0.049	0.008	0.112	0.008	0.035
	金融	0.199	0.040	0.116	0.040	0.052	0.037	0.010	0.144	0.011	0.027
	知识产权	0.248	0.017	0.037	0.017	0.045	0.032	0.009	0.121	0.009	0.026
	电子信息	0.375	0.051	0.170	0.053	0.044	0.093	0.011	0.133	0.012	0.035
	其他商业	0.478	0.041	0.112	0.042	0.048	0.171	0.013	0.169	0.015	0.034
	娱乐文化	0.138	0.032	0.055	0.032	0.062	0.019	0.007	0.101	0.007	0.025

在破坏阶段，单位时间性能损耗越小，网络的风险吸收能力越好。对比表 4 发现，相较于全球范围，一带一路数字服务贸易网络在随机攻击贸易联系时抵抗能力表现较差，而在针对贸易中转国攻击时保险和知识使用权网络的风险吸收能力更好。在一带一路数字服务贸易网络中，蓄意攻击的值普遍更高，说明在面对针对性贸易破坏时，参与国的风险抵抗能力较弱。其中，金融网络在随机攻击下的值为 0.015

和 0.050, 风险吸收和抵抗能力表现最好; 在蓄意攻击下, 文化娱乐网络在针对度值时值更高为 0.121, 其他商业服务贸易网络在针对介值时值更高为 0.112, 这表明贸易中转国家遭受贸易干扰时, 其他商业服务将受到严重阻碍, 整体的风险抵抗能力差。

在恢复阶段, 单位时间性能恢复越大, 网络的恢复调整能力越好。一带一路数字服务贸易网络的值相比于全球网络均更高, 说明在一带一路倡议下各国重建以及调整数字服务贸易的效率更高。在随机中断下, 电子信息服务在针对边的攻击中单位时间性能恢复最多, 值为 0.080, 其贸易联系可以更为灵活地恢复和调整, 而金融网络在针对点的攻击中值最低, 说明针对贸易国的恢复较为困难; 在蓄意攻击下, 知识产权使用网络值为 0.050 和 0.045, 单位时间性能恢复均低于其他产业, 说明参与国知识产权使用服务遭到封锁后恢复较困难, 而保险、养老和金融服务同此情况下恢复调整以及适应能力较高。

3.2.3. 数字服务贸易网络综合韧性情况

综合以上动态韧性评估指标并结合公式(15), 得出六类数字服务贸易网络在不同中断模拟下的综合韧性值(CRL), 结果见表 5。由于现实中, 对数字服务贸易的干扰多为贸易国之间针对性的攻击, 本文计算总体韧性值时, 对不同攻击下网络综合韧性赋予不同比例, 其中每种随机攻击下 CRL 值占比 20%, 每种蓄意攻击下 CRL 值占比 30%, 进而得出六类数字服务贸易网络的总体韧性值。

在全球数字服务贸易网络中, 其他商业服务贸易网络总体韧性值最高为 10.46; 其次是电信、计算机和通讯贸易网络, 总体韧性值为 7.14; 金融贸易网络、保险养老金贸易网络和知识产权使用贸易网络总体韧性水平较低; 娱乐文化网络总体韧性水平最低, 数值仅为 2.75。

一带一路数字服务贸易网络所表现出的综合韧性值均较全球范围高, 这表明在一带一路倡议下, 参与国数字服务贸易无论是遭受随机性还是针对性的贸易干扰, 都能够更为灵活地采取抵抗措施、调整以及重建贸易关系。细分一带一路参与国数字服务贸易领域来看, 其他商业服务贸易网络总体韧性值最高为 23.73; 其次是电信、计算机和通讯贸易网络和知识产权使用贸易网络, 总体韧性值在 17.41 左右; 保险养老金和金融贸易网络总体韧性水平适中, 总体韧性值分别为 13.41 和 12.02; 娱乐文化网络总体韧性水平最低。对比不同贸易干扰情况, 可以发现电子信息和保险养老金网络在贸易国受到随机攻击时综合韧性表现更好, 知识产权使用和个人娱乐文化网络在针对贸易中转强国攻击时综合韧性水平高。

4. 结论

本文借助复杂网络理论, 运行中断模拟程序, 从动态和静态视角分析全球和一带一路国家数字服务贸易网络的韧性表现, 得出以下主要结论: 一带一路数字服务贸易网络静态韧性指标方面, (1) 传输性: 六类贸易网络的平均路径长度普遍较短, 国家间建立贸易联系更为容易, 贸易的扩散效率良好。(2) 集聚性: 数字服务贸易网络整体集聚程度较高, 其他商业服务和电子信息网络的平均聚类系数较高, 网络集聚效应更为明显, 其余 4 类贸易网络集聚程度接近且适中。(3) 层级性: 保险和养老金贸易网络的层级性最为明显, 容易形成贸易关系锁定。(4) 匹配性: 只有电子信息和其他商业服务网络表现出异配性, 网络联系倾向于异质和多元, 利于提升贸易网络结构韧性能力。

一带一路数字服务贸易网络动态韧性方面, (1) 蓄意攻击使得数字服务贸易的网络性能下降更快并且综合韧性水平更低。(2) 在鲁棒性方面, 其他商业服务网络鲁棒性最强, 保险养老金、知识产权和文化娱乐贸易网络鲁棒性表现差。(3) 在随机性中断下, 金融具有较强的抵抗能力和较差的恢复能力, 保险养老网络抵抗能力较高, 电子信息和个人文化娱乐网络的恢复调整能力强。在蓄意中断下, 知识产权使用网络抵抗能力强, 个人文化娱乐网络调整恢复能力强, 而电子信息网络两种能力均较弱。(4) 综合四种中断情况可得, 其他商业服务贸易网络韧性水平最高, 电信、计算机和通讯贸易网络知识产权使用贸易网络韧性较高, 保险养老金服务和金融贸易网络和韧性水平较低, 个人、娱乐和文化网络总体韧性水平最低。

参考文献

- [1] 赵文霞. 全球数字贸易网络结构及其与数字贸易限制的关系[J]. 中国流通经济, 2022, 36(10): 14-25.
- [2] 朱福林, 赵绍全. 中美贸易摩擦与我国贸易强国建设[J]. 中国流通经济, 2019, 33(3): 82-90.
- [3] 贺灿飞, 陈韬. 外部需求冲击、相关多样化与出口韧性[J]. 中国工业经济, 2019(7): 61-80.
- [4] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [5] Xu, Y., et al. (2020) Concept and Key Features of Resilient Grids. *Proceedings of the CSEE*, **40**, 6773-6784.
- [6] Martin, R. (2011) Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessary Shocks. *Journal of Economic Geography*, **12**, 1-32. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbr019>
- [7] 阮前途, 谢伟, 许寅, 华斌, 宋平, 和敬涵, 张琪祁. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [8] Martin, R. and Sunley, P. (2014) On the Notion of Regional Economic Resilience: Conceptualization and Explanation. *Journal of Economic Geography*, **15**, 1-42. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbu015>
- [9] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 关皓明. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1-7+151.
- [10] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 488-502.
- [11] 陆菁, 傅诺. 全球数字贸易崛起: 发展格局与影响因素分析[J]. 社会科学战线, 2018(11): 57-66.
- [12] 吕延方, 方若楠, 王冬. 全球数字服务贸易网络的拓扑结构特征及影响机制[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(10): 128-147.
- [13] 温湖炜, 舒淑哲, 郑淑芳. 全球数字服务贸易格局及中国的贸易地位分析[J]. 产业经济评论, 2021(1): 50-64.
- [14] 冯怡, 彭迪云, 周美楠. 长江经济带城市群网络结构韧性之演化——基于“流空间”视角的分析[J]. 江西社会科学, 2022, 42(8): 53-62.
- [15] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市群网络结构韧性评估及其优化策略[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1193-1207.
- [16] 王章郡, 周小曼, 方忠权. 基于新冠疫情冲击的城市旅游流网络结构韧性评估——以重庆市中心城区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(11): 148-157.
- [17] 于娱, 马代鹏, 王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2006-2021.
- [18] 何瑶, 杨永春, 郭建科. 中断模拟下的中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 414-424.
- [19] 彭翀, 陈思宇, 王宝强. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究——以长江中游城市群客运网络为例[J]. 经济地理, 2019, 39(8): 68-76.
- [20] Crespo, J., Suire, R. and Vicente, J. (2013) Lock-in or Lock-Out? How Structural Properties of Knowledge Networks Affect Regional Resilience. *Journal of Economic Geography*, **14**, 199-219. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbt006>
- [21] Newman, M.E.J. (2003) Mixing Patterns in Networks. *Physical Review E*, **67**, 241-251.
- [22] Nan, C. and Sansavini, G. (2017) A Quantitative Method for Assessing Resilience of Interdependent Infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, **157**, 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.013>
- [23] 王兴隆, 苗尚飞. 空域扇区网络结构特性分析及韧性评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(5): 904-911.
- [24] 王妍, 路兰. “一带一路”国家贸易网络结构特征及韧性研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2021, 37(4): 40-47.
- [25] 姚星, 梅鹤轩, 蒲岳. 国际服务贸易网络的结构特征及演化研究——基于全球价值链视角[J]. 国际贸易问题, 2019(4): 109-124.