

文章编号: 1004-4051(2025)08-0026-12

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20250151

天然气国际贸易网络韧性评估及 对中国的启示

崔明民, 吴晓明

(西南石油大学经济管理学院, 四川 成都 610500)

摘 要: 天然气将是确保全球能源转型能够以限制全球变暖所需的规模和速度进行的关键资源。当前, 国际天然气贸易市场面临高度不确定性, 研究天然气国际贸易网络韧性对保障天然气国际贸易安全、稳定和可持续发展具有重要意义, 对我国开展国际能源合作亦有启示作用。本文基于 2023 年国际天然气贸易数据, 按照天然气不同相态和不同贸易合同形式进行划分, 构建五个天然气国际贸易网络。首先分析各网络静态韧性特征, 然后通过模拟进行动态网络韧性测度, 最后对网络节点的抗干扰能力进行评价。研究发现: 在四种模拟情景下, 液化天然气网络韧性表现均优于气态天然气网络, 短期合同液化天然气网络韧性表现均优于中长期合同液化天然气网络; 短期合同液化天然气网络的综合韧性水平最高, 其贸易多元性和灵活性使得网络在扰动与恢复阶段均能保持较高功能总量。气态天然气网络的综合韧性水平最低, 对扰动更加敏感, 吸收破坏与功能恢复能力较弱。综合气态天然气和液化天然气贸易网络来看, 欧洲市场具有强大的中转能力和扩散能力。中国作为国际天然气贸易的主要参与者表现出较强抗干扰性。根据研究结论, 针对我国如何科学地开展天然气国际能源合作, 增强天然气国际贸易风险抗干扰能力提出相应的政策建议。

关键词: 清洁能源; 能源安全; 天然气贸易; 复杂网络; 中断模拟; 韧性; 鲁棒性; 节点抗干扰性

中图分类号: TD-9; F742 文献标识码: A

Resilience evaluation of natural gas international trade network and its implications for China

CUI Mingmin, WU Xiaoming

(School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Natural gas will be a critical resource to ensure that global energy transitions are able to move at the scale and speed necessary to limit global warming. At present, the international natural gas trade market is facing a high uncertainty, and studying the resilience of the international natural gas trade network is of great significance to ensure the security, stability and sustainable development of the international natural gas trade, and it also has enlightenment for China's international energy cooperation. In this paper, five natural gas international trade networks are constructed according to

收稿日期: 2025-01-21 责任编辑: 刘硕

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“能源革命驱动下的天然气产业高质量发展路径研究”资助(编号: 22&ZD105)

第一作者简介: 崔明民(1996—), 男, 汉族, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事能源经济管理等方面的研究工作, E-mail: cuimm0221@163.com。

通讯作者简介: 吴晓明(1975—), 女, 汉族, 四川成都人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事能源经济管理等方面的研究工作, E-mail: wuxiaoming028@163.com。

引用格式: 崔明民, 吴晓明. 天然气国际贸易网络韧性评估及对中国的启示[J]. 中国矿业, 2025, 34(8): 26-37.

CUI Mingmin, WU Xiaoming. Resilience evaluation of natural gas international trade network and its implications for China[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(8): 26-37.

different phase states of natural gas and different forms of trade contracts. Firstly, the static resilience characteristics of each network are analyzed, and then the dynamic resilience of the network is measured by simulation. Finally, the anti-interference ability of the network nodes is evaluated. The results show that under the four simulation scenarios, the resilience performance of liquefied natural gas network is better than that of gaseous natural gas network, and the resilience performance of short-term contract liquefied natural gas network is better than that of medium and long-term contract liquefied natural gas network. The short-term contract liquefied natural gas network has the highest level of comprehensive resilience, and its trade diversity and flexibility enable the network to maintain a high functional total in both the disturbance and recovery phases. The comprehensive resilience level of gaseous natural gas network is the lowest, and it is more sensitive to disturbance, and the ability of damage absorption and function recovery is weak. From the perspective of gaseous and liquefied natural gas trade networks, the European market has strong transit capacity and diffusion capacity. As a major participant in the international natural gas trade, China has shown strong anti-interference. According to the research conclusion, the corresponding policy suggestions are put forward for how to carry out international energy cooperation of natural gas scientifically and enhance anti-interference ability of natural gas international trade risk.

Keywords: clean energy; energy security; natural gas trade; complex network; interrupt simulation; resilience; robustness; node anti-interference

0 引言

当前,国际能源格局不确定性凸显,世界各地关于能源结构调整的决策经历复杂化,同时也影响到全球减排目标的推进。在改变能源系统演化模式的尝试中,灵活性可能成为决定成败的最重要因素。为了降低能源系统危机和波动风险,天然气发挥至关重要的作用,其提供了必要的灵活性以适应不断增长的能源需求,同时支撑了向低碳未来的过渡^[1]。

在经历了新冠疫情周期的能源需求动荡之后,全球供应危机逐渐稳定,但天然气市场依然脆弱,继续呈现机遇和挑战^[2]。地缘政治冲突和产业链、供应链中断风险增加^[3];极端气候事件频发,能源应急呈现常态化^[4];新能源供应不稳定,化石能源投资不足,加剧市场波动^[5]。作为应对风险的新型思维方式,韧性理论为能源安全研究赋予新逻辑^[6]。因此,研究国际市场天然气贸易流动及其结构韧性对保障天然气国际贸易安全、稳定和可持续发展具有重要意义。

复杂网络理论分析框架是国际能源、资源贸易研究的主要手段之一。许多学者将天然气贸易市场参与国家或地区抽象为节点,贸易流抽象为节点对的连边,构建了天然气国际贸易网络,研究重点主要聚焦在天然气网络拓扑特征和演化特征分析^[7-10],进而对能源竞合关系^[11]、贸易格局和进出口路径^[12-13]等问题进行讨论,也有学者重点对贸易网络节点的主要特征进行了评价^[14-15]。从研究对象来看,有的学者考虑到天然气在进出口贸易时相态的区别,特别构建了气态天然气(管道天然气)和液化天然气网络开展研究^[16-17]。

韧性理论强调的是复杂系统在面临破坏性冲击时持续发挥其功能的能力,其中重点包括了吸收破坏(脆弱性、抗毁性)和从破坏中恢复的能力^[18]。许多学者将韧性理论与复杂网络理论相结合,提出了网络韧性的概念。有许多研究聚焦在网络脆弱性^[19-21],通过模拟网络中节点或连边失效,对网络进行压力性测试,对比网络在扰动发生前后的特征值变化程度对网络脆弱性进行分析。此类研究在动态模拟过程中仅观察了扰动阶段网络性能的变化,并没有考虑到网络的恢复性,技术路线不足以解释网络韧性的内涵,但对完善网络韧性分析框架予以启发。

目前,网络韧性研究分析框架中主要包含静态评估和动态评估两类。部分研究根据网络静态韧性特征,如传输性、集聚性、层级性、匹配性、冗余性等来评估网络的稳定、抗干扰能力^[22],也有学者在时间维度上研究了此类特征值的演化情况^[23-24]。动态评估方面,在网络脆弱性研究的基础上,有的学者设计了不同的网络扰动和恢复策略,通过模拟观察网络在受到扰动和恢复时的功能变化,为网络韧性进行动态定量测度开辟了道路^[25-26]。

综上,目前关于天然气国际贸易网络韧性研究的技术路线不够完善,网络韧性内涵体现不够全面,并且天然气贸易网络划分不够细致。因此,本文按照天然气不同相态和不同贸易合同形式进行划分,构建五个天然气国际贸易网络。首先分析各网络静态韧性特征,然后通过模拟进行动态网络韧性测度,最后对网络节点的抗干扰能力进行评价,为国际天然气贸易市场应对风险能力的科学评估提供了具有

理论延展性的分析框架。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

所用数据来源于联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade Database) 和《GIIGNL 液化天然气行业年报》, 涉及到 2023 年全球 141 个国家(地区)的天然 气进出口贸易量。根据 HS 商品编码 271111 液化天然 气和 HS 商品编码 271121 气态天然气检索所得的 全球各国贸易数据分别构建液化天然气(LNG)和气 态天然气(GNG)国际贸易网络, 其中, GNG 的贸易 运输方式包括但不限于管道运输。进一步按照 LNG 贸易主要合同形式, 中长期合同(合同期限超过 4 年)和短期合同(合同期限 4 年以内, 包括现货)拆 解 LNG 贸易流, 分别构建全球主要 LNG 市场的中 长期合同液化天然气(MLLNG)国际贸易网络和短期合 同液化天然气(SSLNG)国际贸易网络, 全球主要 LNG 市场涉及的 59 个国家(地区), LNG 贸易量占总 量的 96% 以上。最后合并 LNG 贸易流和 GNG 贸易 流, 构建综合天然气(NG)国际贸易网络。根据对全 球各个国家(地区)的天然 气进出口贸易流加以合并 或拆解, 共构建以国家(地区)为节点、以贸易关系为 边、以贸易量为边权的五个加权有向网络, 见表 1,

构建过程中剔除了贸易量低于 1 t 的数据。

1.2 研究方法

复杂网络分析是将特殊研究对象联系抽象网络 化, 研究网络中个体之间关联形成的拓扑结构和个 体在网络中属性和特征的方法。基于复杂网络分析 框架, 通过网络结构特征体现网络功能状态, 并能进 一步反映网络韧性。参考已有的相关研究, 从静态 角度来看, 网络传输性、集聚性、层级性、匹配性等 所对应的拓扑结构指标可以评估网络的稳定、抗干 扰能力。从动态角度来看, 首先确定网络功能特征 值, 在中断模拟的基础上设计不同的恢复策略, 能够 全面观察网络在受到扰动和恢复时的功能变化, 进 而动态测度网络吸收破坏和恢复能力。天然气国际 贸易网络是全球各国(地区)天然 气进出口贸易关系 的本质抽象, 本文从网络结构的静态和动态两方面 对天然气国际贸易网络韧性进行研究, 进一步的, 通 过网络节点属性和特征评价节点的抗干扰性。

1.2.1 静态网络韧性评估指标

静态网络韧性特征主要包括传输性、集聚性、 层级性、匹配性, 其指标与含义见表 2。

1.2.2 动态网络韧性评估指标

通过模拟实现网络受到扰动, 以及扰动结束后

表 1 天然气国际贸易网络划分

Table 1 Classification of natural gas international trade networks

贸易网络类型	英文解释	缩写简称	备注
天然气国际贸易网络	natural gas	NG	合并气态和液化天然气贸易流
气态天然气国际贸易网络	in gaseous state, natural gas	GNG	HS 编码: 271121 检索所得贸易流
液化天然气国际贸易网络	liquefied, natural gas	LNG	HS 编码: 271111 检索所得贸易流
中长期合同液化天然气国际贸易网络	medium-term and long-term contracts, LNG	MLLNG	合同期限超过 4 年的液化天然气贸易流
短期合同液化天然气国际贸易网络	spot and short-term contracts, LNG	SSLNG	合同期限 4 年以内的液化天然气贸易流, 包括现货

表 2 静态网络韧性评估指标及含义

Table 2 Analysis indexes and implication of static network resilience characteristic

特征	指标	公式	含义
传输性	平均路径长度	$L = \frac{\sum_{i \neq j} d_{ij}}{P}$	网络中任意两个连通节点之间的平均最短距离, 通过该指标来衡量网络的传输性能 ^[27] 。网络平均路径长度 (L) 越小, 说明网络分离程度较低, 网络中的资源与信息能够高效传输。式中: d_{ij} 为连通节点对节点 i 和节点 j 之间的最短路径距离; P 为所有连通节点对的数量
集聚性	平均聚集系数	$AC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{q_i(q_i - 1)}$	聚集系数反映局部某节点的邻居节点之间的连接程度, 平均聚集系数 (AC) 反映了全局网络的聚集情况。平均聚集系数越大表明节点间的联系越紧密 ^[28] 。式中: q_i 为节点 i 的邻居节点个数; m_i 为节点 i 与邻居节点之间存在的边数; N 为网络节点数
层级性	度分布拟合曲线斜率	$\ln K_i = \ln C + \alpha \ln K_i^*$	网络度分布反映了网络节点度数的概率分布情况 ^[29] 。式中: K_i 为节点 i 的度; K_i^* 为节点 i 的度在所有节点度中的排序; C 为常数项; α 为通过拟合得到的网络中节点度概率分布的曲线斜率, 其绝对值越大代表网络层级性越高
匹配性	度关联系数	$\bar{K}_i = \frac{\sum_{j \in V_i} K_j}{V_i} = D + \beta K_i$	网络中节点之间的联系可能存在某种偏好。式中: $\bar{K}_i$ 为节点 i 与其所有相连节点度的平均值; V_i 为与节点 i 的邻居节点集合; K_j 为邻居节点的度; D 为常数项; β 为度关联系数。当 $\beta > 0$ 时, 网络中度值相近的节点间连接紧密, 网络呈现同配性; 当 $\beta < 0$ 时, 网络中度值不相近的节点间连接紧密, 网络呈现异配性; 理论上 $\beta=0$ 时表示网络无度相关性

网络恢复到初始状态的动态过程, 观察各阶段的网络功能保持程度, 进而对网络韧性进行动态评估。天然气国际贸易可能会受到大国政治博弈、自然灾害等因素的影响, 进而损失贸易网络的运行效率。这些扰动因素具有随机性或确定性特点, 可以根据不同的模拟策略, 设置节点扰动和恢复规则。在扰动阶段, 逐步对网络中的节点进行移除, 观察网络对破坏的吸收能力。在恢复阶段, 逐步对失效节点进行恢复, 观察网络的恢复能力。本文选取网络效率代表网络功能, 通过鲁棒性、网络功能维持总量、网络功能总量保持率、网络韧性、网络韧性综合评价指标进行动态网络韧性分析。

图1展示了一般性网络韧性动态变化阶段, 坐标横轴为时间, 分为初始阶段($t_0 \leq t < t_1$)、扰动阶段($t_1 \leq t < t_2$)、恢复阶段($t_2 \leq t < t_3$)、新稳态阶段($t \geq t_3$)四个典型阶段, 纵轴为网络功能水平。参考网络动态韧性评估相关研究, 选取网络效率代表网络功能^[30]。

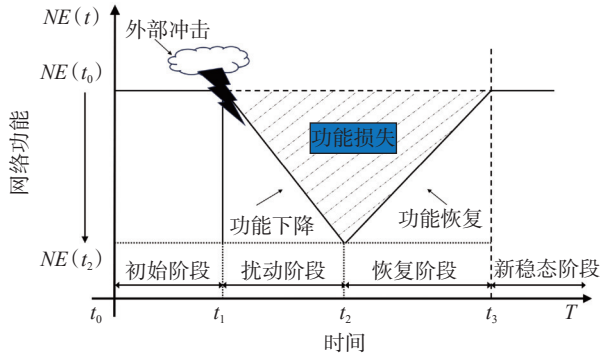


图1 一般性网络韧性动态变化阶段

Fig. 1 Dynamic change stages of general network resilience

网络效率(NE)能够反映网络资源或信息传播的速度和深度, 体现了网络效能和连通性, 通过计算网络任意两个节点对之间最短路径长度倒数的平均值求出^[31], 计算见式(1)。

$$NE = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j}^N \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

鲁棒性(R)是网络面对一定程度扰动情况下仍然能够保持运行的部分功能, 它是网络韧性模拟动态过程中的功能最小值, 计算见式(2)。由于本研究设定的新稳态阶段与初始阶段网络功能相等, 网络功能在扰动阶段和恢复阶段产生变化, 因此重点围绕这两个阶段进行分析。

$$R = \min \{NE(t)\}, t_1 \leq t \leq t_3 \quad (2)$$

式中: $NE(t)$ 为随时间变化的网络效率离散函数; t_1 为网络开始受到扰动, 功能开始下降的时刻; t_3 为网络

所有失效节点恢复, 功能达到初始稳定状态的时刻。结合图1可以看出, $t_1 \leq t \leq t_3$ 为网络扰动阶段与恢复阶段全过程, 其中也包含了 t_2 时刻, 即网络扰动结束的时刻, 也是网络开始恢复的时刻。

扰动阶段网络功能维持总量(PM_{DP})是网络韧性动态模拟过程扰动阶段($t_1 \sim t_2$)每个时刻的网络功能总和, 可以通过 $NE(t)$ 功能曲线, 阶段起止时刻对应直线 $x = t_1$ 、 $x = t_2$, 以及横坐标轴围成的面积进行量化, 计算见式(3)。

$$PM_{DP} = \int_{t_1}^{t_2} NE(t) dt \quad (3)$$

扰动阶段网络功能总量保持率(PMR_{DP})是扰动阶段网络功能维持量与该阶段在未受扰动状态下应有功能总量的比值, 体现了网络在扰动阶段的吸收破坏的能力, 能够横向比较不同网络在网络扰动阶段的网络功能保持水平, 计算见式(4)。

$$PMR_{DP} = \frac{PM_{DP}}{NE(t_0) * (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

式中, t_0 为网络初始稳定时刻, 而 $NE(t_0)$ 为网络初始阶段功能水平。

与扰动阶段相对应, 在扰动结束后的恢复阶段($t_2 \sim t_3$)引入网络功能维持总量(PM_{RP})和网络功能总量保持率(PMR_{RP})评估网络的恢复调整能力, 计算见式(5)和式(6)。

$$PM_{RP} = \int_{t_2}^{t_3} NE(t) dt \quad (5)$$

$$PMR_{RP} = \frac{PM_{RP}}{NE(t_0) * (t_3 - t_2)} \quad (6)$$

全过程网络功能维持总量(PM_{OP})是网络韧性动态模拟全过程($t_1 \sim t_3$)中每个时刻网络功能的总合, 包括扰动阶段和恢复阶段, 计算见式(7)。进一步引入网络韧性(NR)衡量网络在受到扰动时吸收破坏、维持系统运行的能力以及恢复调整能力, 见式(8)。

$$PM_{OP} = \int_{t_1}^{t_3} NE(t) dt \quad (7)$$

$$NR = \frac{PM_{OP}}{NE(t_0) * (t_3 - t_1)} \quad (8)$$

网络韧性综合评价指标(CRI)考虑到网络可能受到破坏的随机性和确定性(蓄意扰动), 对不同扰动-恢复组合策略下模拟形成的网络韧性取均值进行测度^[32], 具体表达式见式(9)。

$$CRI = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M NR_i \quad (9)$$

式中, M 为不同攻击-恢复策略模拟情景的次数。

1.2.3 节点抗干扰性测度

在天然气国际贸易网络节点中断模拟过程中, 某个节点的失效意味着与其联系的贸易流中断, 造

成相关国家(地区)天然气贸易量的损失。当一个国家(地区)更加介于其他节点贸易联系的路径上或者与其他关键节点存在更紧密的联系,则意味着该国家(地区)对网络资源具有更强的控制和调节能力,面对网络中某些节点失效时,能够从多路径及时完成资源调配补充,自身受到的影响越小,抗干扰性越强。本文从中转能力和扩散能力评价节点抗干扰性。

1) 中转能力——介数中心度。介数中心度(BC)表示一个节点在多大程度上介于其他节点之间的最短路径上,强调了节点在网络中对资源和信息的控制和调配能力,可以用来表示该节点的中转能力^[33],计算见式(10)。

$$BC_i = \frac{2}{N^2 - 3N + 2} \sum_{i \neq j \neq k} \frac{n_{jk(i)}}{g_{jk}} \quad (10)$$

式中: g_{jk} 为节点 j 到节点 k 之间最短路径的数量; $n_{jk(i)}$ 为 g_{jk} 条路径中经过节点 i 的路径数量。

2) 扩散能力——特征向量中心度。特征向量中

心度关注节点与其连接的其他重要节点的关系,该节点的重要性取决于邻居节点的重要性,能够体现出该节点的扩散能力和调节能力^[25],见式(11)。

$$x_k = \frac{1}{\lambda} \sum_{N \times N} A x_{k-1} \quad (11)$$

式中: x_k 为 N 维中心向量,经过多次迭代达到收敛; A 为网络邻接矩阵; λ 为邻接矩阵对应的特征值。

2 结果分析

2.1 天然气国际贸易网络静态韧性分析

2.1.1 网络传输性与集聚性

表 3 给出了五个天然气国际贸易网络规模情况。由表 3 可知, NG 网络节点最多, 涵盖 141 个国家(地区), 787 条贸易流, LNG 网络规模次之。MLLNG 网络与 SSLNG 网络尽管节点相对较少, 但其涵盖全球主要 LNG 市场, 其 LNG 贸易量占总量的 96% 以上。MLLNG 网络与 SSLNG 网络节点数量相近, 但 SSLNG 网络边数显著多于 MLLNG。

表 3 天然气贸易网络基本特征及传输性、集聚性、匹配性结果

网络	节点数	边数	网络密度	平均路径长度	平均加权度	平均聚集系数	度关联系数
NG	141	787	0.040	3.107	11 042 063.934	0.222	-0.075
GNG	93	251	0.029	3.952	7 737 366.171	0.178	0.053
LNG	122	621	0.042	2.857	6 863 573.449	0.206	-0.100
MLLNG	56	190	0.062	2.250	8 816 428.571	0.064	-0.334
SSLNG	59	293	0.086	2.094	5 350 164.614	0.099	-0.208

在网络密度方面, NG 网络的网络密度达到 0.040, 五个天然气国际贸易网络中, SSLNG 网络的网络密度最大, 其次是 MLLNG 网络。LNG 网络的网络密度再次, 其贸易的灵活性不光体现在交易合同形式多样, 也体现在相关基础设施, 如浮式储存及再气化装置(FSRU)具有可移动、可改造特点和快速部署能力, 帮助天然气需求国家和地区快速提高接收和消纳进口 LNG 的功能, 进而提高 LNG 贸易流密度。俄乌冲突爆发后, 俄罗斯输往欧盟的天然气管道流量急剧下降, 欧洲致力于通过浮式储存及再气化装置(FSRU)等新设施来提高产能以快速填补需求缺口。GNG 网络的网络密度最小, GNG 贸易参与国家(地区)之间的贸易流联系较少, 其原因在于, GNG 主要贸易运输方式为管道运输, 贸易流向受地缘因素影响大, 贸易流向较为单一, 灵活性、可拓展性较差, 其主要进出口国家(地区)相对于 LNG 更加固定。

在平均路径长度方面, 天然气贸易网络平均路径长度在 2.094~3.952 之间, 表明天然气贸易流连接两个国家(地区)之间的最短平均路径经过 2.094~

3.952 个国家。GNG 网络受运输方式的限制, 其平均路径最长(3.952), 节点之间的传输效率相对较弱。SSLNG 网络平均路径最短(2.094), 其时效性和传播性最强。

在平均加权度方面, NG 网络的平均加权度达到 11 042 063.934。GNG 网络平均加权度大于 LNG 网络, 由于 GNG 以管道运输为主, 其定向贸易流量相较于 LNG 贸易流量更大。MLLNG 网络平均加权度大于 SSLNG 网络平均加权度, 说明尽管短期合同 LNG 贸易流向更多元, 但定向中长期合同 LNG 贸易流量占比更高, 贸易量更大。

在平均聚集系数方面, NG 网络的平均聚集系数最高。LNG 网络集聚程度高于 GNG 网络, 网络集聚效应更明显。SSLNG 网络平均聚集系数大于 MLLNG 网络, 参与短期合同 LNG 贸易的国家(地区)相邻节点之间的联系更加稠密。

2.1.2 网络层级性与匹配性

五个天然气国际贸易网络节点度概率分布情况如图 2 所示。由图 2 可知, NG 网络和 LNG 网络的曲

线基本满足幂律分布, 具有无标度网络特征。此类网络中度值大的节点所占比例较小, 而度值小的节点所占比例较大, 说明 NG 网络和 LNG 网络的功能由少数核心节点决定, 核心国家(地区)对天然气资

源的控制能力较强。NG 网络和 LNG 网络的度分布拟合曲线斜率 α 分别为 3.528 和 3.726, LNG 网络的层级性更加明显, 核心国家(地区)贸易网络地位更加突出。其他三个天然气贸易网络层级性则不明显。

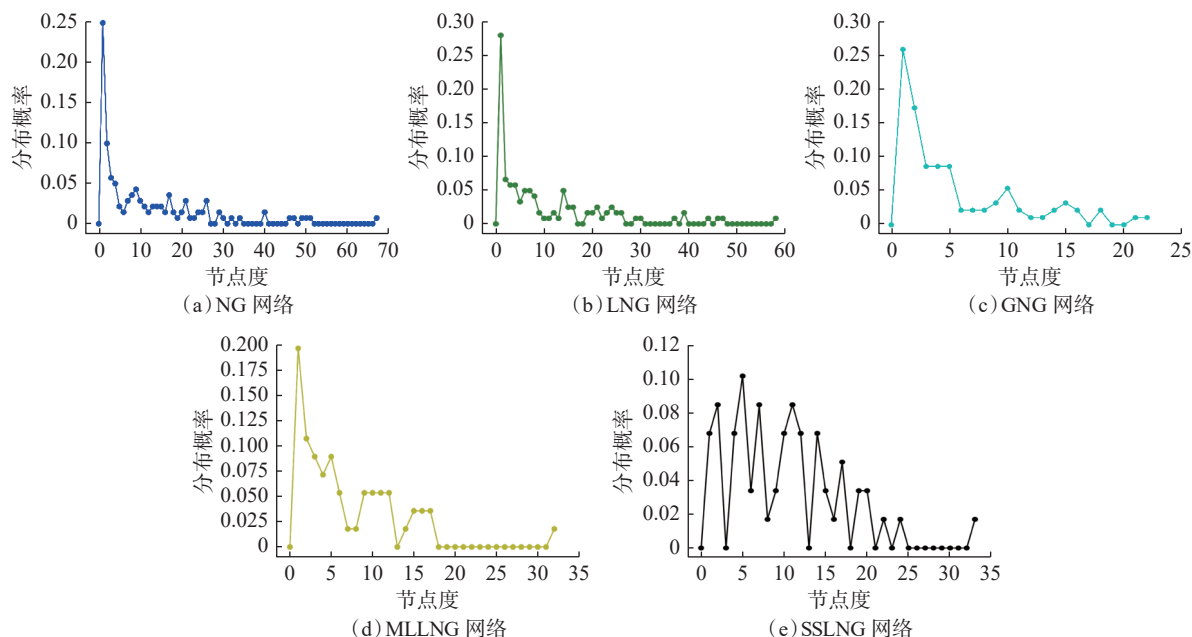


图2 五个天然气国际贸易网络节点度概率分布

Fig. 2 Node degree probability distribution of five natural gas international trade networks

结合表3度关联系数可知, 五个天然气贸易网络中, 仅有 GNG 网络度关联系数值为正, 呈现出网络同配性, 说明 GNG 贸易中, 节点度属性相近的国家(地区)之间贸易联系较多。其他四个贸易网络均呈现出网络异配性, 异配性强弱程度(系数取绝对值)体现为: MLLNG>SSLNG>LNG>NG。从整体来看, 在天然气国际贸易中, 节点度大的国家(地区)倾向于连接节点度小的国家(地区), 天然气贸易联系具有多样性发展趋势。

2.2 天然气国际贸易网络动态韧性分析

2.2.1 扰动与恢复规则设置

通过蓄意扰动和随机扰动两种策略来模拟天然气贸易网络中的节点失效, 进而观察评估网络功能的损失状态。蓄意扰动策略是指对网络中的关键节点进行针对性破坏, 主要模拟天然气国际贸易中由国家政治博弈、经济制裁、恐怖袭击等因素导致的贸易中断、封锁、停运^[34]。随机扰动策略是指按照一定比例随机破坏网络中的任意节点, 主要模拟自然灾害、疫情等因素对贸易网络节点的扰动^[35]。具体的, 蓄意扰动策略根据网络节点度从大到小的顺序进行逐步移除, 随机扰动策略将网络中的节点进行随机逐步移除^[36]。按照每个时间段内网络损失 1.8%

的节点进行扰动, 直到网络失效节点达到 30% 停止扰动。

恢复策略按照随机恢复和序列恢复进行, 进而观察网络功能的恢复状态。随机恢复是指随机选取已失效的节点并进行恢复。序列恢复是指对先失效的节点先恢复。单位时间内恢复节点的比例与破坏节点的比例相同。

2.2.2 扰动阶段分析

根据规则设置, 利用 Python 编程实现网络扰动和恢复策略。图3和图4刻画了不同扰动策略和恢复策略组合情况下(蓄意扰动-序列恢复、蓄意扰动-随机恢复、随机扰动-序列恢复、随机扰动-随机恢复)五个天然气贸易网络在扰动和恢复过程中的功能状态。表4显示了不同扰动中, 五个天然气贸易网络初始状态的网络效率和鲁棒性 R 值。

由图3和表4可知, 在蓄意扰动策略下, 30% 的节点损失造成网络性能显著下降, 五个天然气贸易网络均在 $t=17$ 时刻达到网络效率最小值, 鲁棒性 R 值范围在 0.006~0.031 之间。对比鲁棒性 R 值与初始网络效率可以发现, NG 网络、LNG 网络、GNG 网络、MLLNG 网络在扰动结束时刻的性能均低于其初始时刻性能的 10%, LNG 网络和 NG 网络性能降级最大,

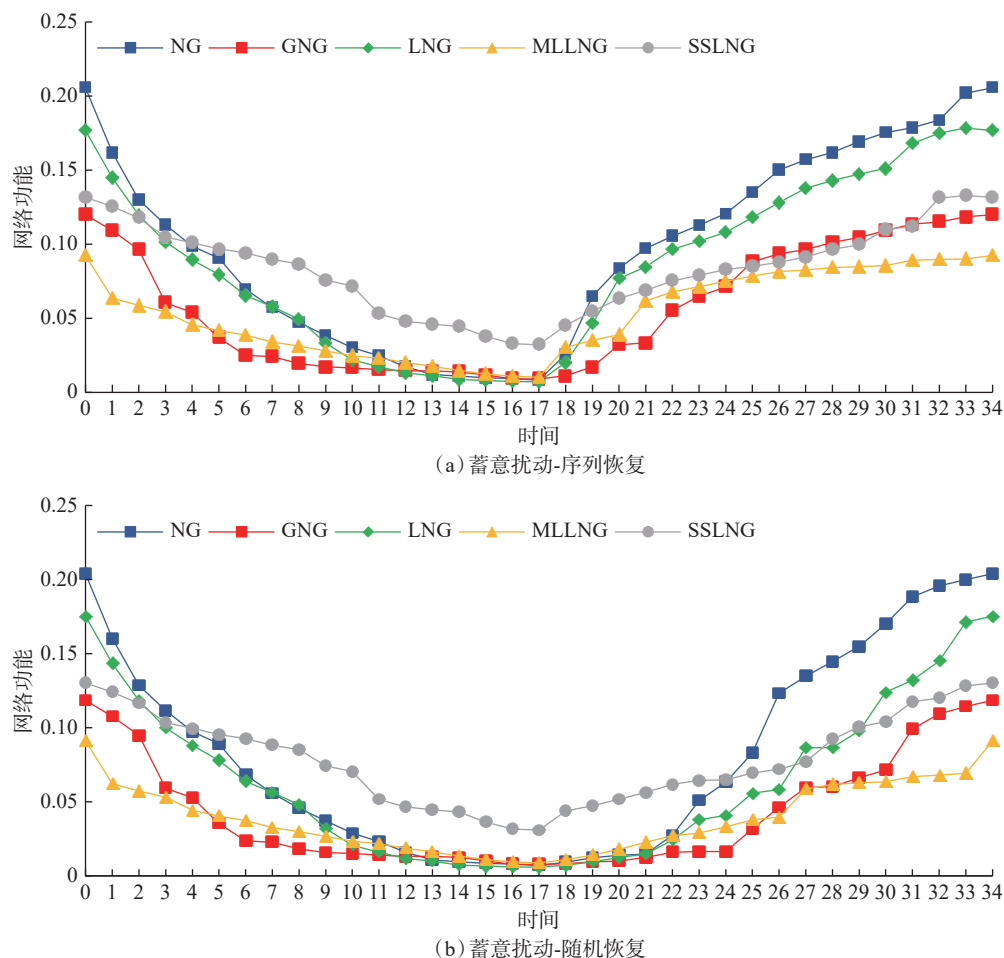


图3 动态模拟蓄意扰动与恢复组合策略下的网络功能变化

Fig. 3 Changes in network performance of deliberate attack-recovery strategy

低于其初始时刻性能的4%,进一步凸显其网络层级性,核心国家网络影响力强。SSLNG网络表现出相对较高的鲁棒性,其扰动结束时刻的性能仍能保持初始时刻性能的23.6%,显著高于MLLNG网络的9.6%,短期现货合同LNG贸易相较于中长期合同LNG贸易的灵活性、多元性一定程度上为贸易网络功能的稳定性赋能。

由图4和表4可知,在随机扰动策略下,网络功能的下降和恢复过程具有局部震荡的情况但整体变化相对平缓。五个网络的鲁棒性 R 值范围在0.064~0.142之间,网络效率下降到最低点时,五个网络均能保持其初始时刻功能的70%左右。随机扰动情况下的网络鲁棒性 R 值显著大于蓄意扰动策略。

由表4可知,在蓄意扰动情况下,五个天然气贸易网络在扰动阶段 PM_{DP} 在0.589~1.334之间,其中,GNG网络 PM_{DP} 最低,为31.50%,LNG网络性能表现略优于GNG网络,达到32.95%。SSLNG网络吸收破坏能力最强, PM_{DP} 最高达到60.16%,显著优于MLLNG网络。在随机扰动情况下,五个网络在扰动阶段

PM_{DP} 在1.321~3.067之间,五个网络 PM_{DP} 均在80%以上,其中,LNG网络最高达到94.47%。由此可以看出,在随机扰动情况下,网络性能整体上损失较小,仍然可以保持功能较大的情况下稳定运行,网络抵抗随机性外部冲击的能力更强。

2.2.3 恢复阶段分析

恢复阶段网络性能的量化结果见表5。由表5可知,在蓄意扰动-序列恢复情况下,五个网络的 PM_{RP} 在1.133~2.107之间,其中,LNG网络 PM_{RP} 达到62.59%,恢复能力略强于GNG网络。MLLNG网络 PM_{RP} 达到73.10%,恢复能力显著高于SSLNG网络。在蓄意扰动-随机恢复情况下,五个网络的 PM_{RP} 在0.692~1.594之间,其中,GNG网络和LNG网络 PM_{RP} 均在37%左右,SSLNG网络 PM_{RP} 最高,达到58.76%,显著高于MLLNG网络。对比蓄意扰动情况下序列恢复和随机恢复两种恢复策略,序列恢复五个网络的平均 PM_{RP} 为64.16%,随机恢复为44.81%,可以看出,序列恢复策略相较于随机恢复策略可以更快让网络恢复较高性能水平的运作。

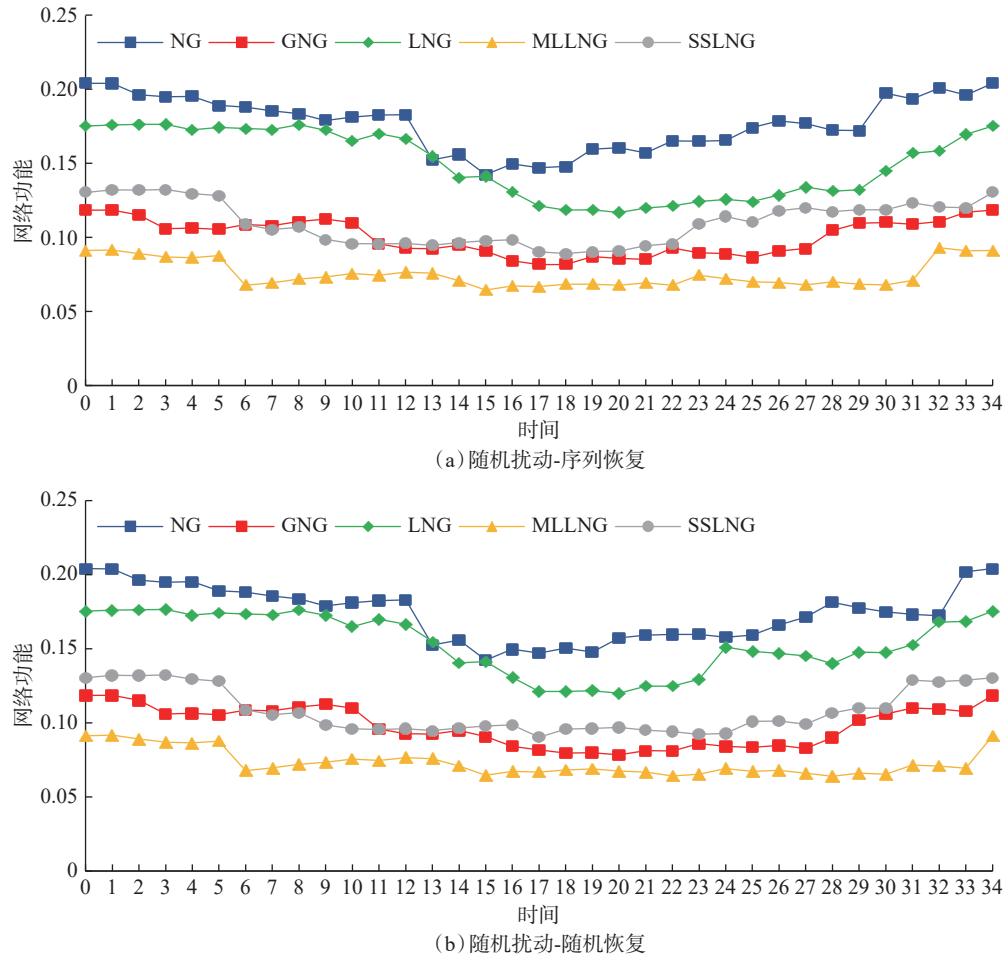


图 4 动态模拟随机扰动与恢复组合策略下的网络功能变化

Fig. 4 Changes in network performance of random attack-recovery strategy

表 4 扰动阶段网络性能的量化结果

网络	初始 网络效率	蓄意扰动			随机扰动		
		R	PM_{DP}	$PMR_{DP}/\%$	R	PM_{DP}	$PMR_{DP}/\%$
NG	0.204	0.007	1.103	31.79	0.142	3.067	88.40
GNG	0.119	0.008	0.635	31.50	0.078	1.770	87.88
LNG	0.175	0.006	0.982	32.95	0.117	2.815	94.47
MLLNG	0.091	0.009	0.589	38.00	0.064	1.321	85.19
SSLNG	0.130	0.031	1.334	60.16	0.089	1.879	84.78

在随机扰动-序列恢复情况下,五个网络的 PM_{RP} 在1.225~2.930之间,其中,GNG网络 PMR_{RP} 达到80.65%,高于LNG网络。SSLNG网络 PMR_{RP} 达到83.09%,高于MLLNG网络。在随机扰动-随机恢复情况下,五个网络的 PM_{RP} 在1.145~2.817之间,其中,LNG网络 PMR_{RP} 达到79.84%,高于GNG网络。SSLNG网络 PMR_{RP} 高于MLLNG网络,与序列恢复情况相同。对比随机扰动情况下序列恢复和随机恢复两种恢复策略,仅有LNG网络序列恢复 PM_{RP} 小于随机恢复情况。

表 5 恢复阶段网络性能的量化结果

网络	蓄意扰动				随机扰动			
	序列恢复		随机恢复		序列恢复		随机恢复	
	PM_{RP}	$PMR_{RP}/\%$	PM_{RP}	$PMR_{RP}/\%$	PM_{RP}	$PMR_{RP}/\%$	PM_{RP}	$PMR_{RP}/\%$
NG	2.107	60.74	1.594	45.94	2.930	84.46	2.817	81.19
GNG	1.211	60.10	0.755	37.48	1.625	80.65	1.528	75.84
LNG	1.865	62.59	1.111	37.26	2.247	75.40	2.379	79.84
MLLNG	1.133	73.10	0.692	44.63	1.225	79.02	1.145	73.85
SSLNG	1.425	64.26	1.303	58.76	1.842	83.09	1.767	79.69
均值	1.548	64.16	1.091	44.81	1.974	80.52	1.927	78.08

序列恢复五个网络的平均 PMR_{RP} 为80.52%,略高于随机恢复的78.08%,由于存在扰动策略随机性的影响,相较于蓄意扰动策略,序列恢复和随机恢复的功能恢复能力差别并不明显。

2.2.4 全过程分析

五个网络在不同扰动-恢复策略情况下的网络韧性见表6。由表6可知,整体来看,随机扰动情况下五

个网络的 *NR* 表现显著优于蓄意扰动情况。在四种情景下, SSLNG 网络 *NR* 表现均优于 MLLNG 网络, LNG 网络 *NR* 表现均优于 GNG 网络。为了能够进一步横向比较五个网络的韧性能力, 同时考虑了网络冲击中的确定性和随机性, 引入 *CRI*。SSLNG 网络的 *CRI* 值最高, 达到 0.720, 显著高于另外四个网络。短期和现货 LNG 贸易的多元性和灵活性使得 SSLNG 网络无论在扰动阶段还是恢复阶段均能保持较高功能总量。GNG 网络的 *CRI* 值最低为 0.616, GNG 的交易及运输模式具有一定局限性, 使得 GNG 网络对网络扰动更加敏感, 吸收破坏能力较弱, 功能恢复能力较弱。

表 6 网络韧性综合评价量化结果
Table 6 Quantitative results of network resilience comprehensive evaluation

网络	蓄意扰动				随机扰动				<i>CRI</i>
	序列恢复		随机恢复		序列恢复		随机恢复		
	PM_{OP}	$NR/\%$	PM_{OP}	$NR/\%$	PM_{OP}	$NR/\%$	PM_{OP}	$NR/\%$	
NG	3.210	46.26	2.697	38.86	5.998	86.43	5.884	84.80	0.641
GNG	1.845	45.80	1.390	34.49	3.395	84.26	3.298	81.86	0.616
LNG	2.847	47.77	2.093	35.11	5.062	84.93	5.195	87.15	0.637
MLLNG	1.723	55.55	1.281	41.31	2.546	82.11	2.466	79.52	0.646
SSLNG	2.758	62.21	2.636	59.46	3.721	83.94	3.646	82.23	0.720

2.3 节点抗干扰性分析

结合前文的天然气贸易网络韧性模拟研究可以发现, 在各类策略情景下, 网络性能在扰动阶段下降以及恢复阶段回升的幅度有快有慢, 体现出网络中不同的节点损失对网络性能和其他节点影响的差异性。分别从中转能力和扩散能力两个方面评测五个网络所有节点的抗干扰性水平。表 7 列出了 NG 网络加权重度、中转能力、扩散能力排名前 20 位的国家; 表 8 列出了 GNG 网络、LNG 网络中转能力、扩散能力排名前 20 位的国家。

由表 7 和表 8 可知, 在 GNG 网络和 LNG 网络中, 美国、法国、中国、西班牙、意大利、德国、比利时的介数中心度排位均较高, 这些国家具有较强的中转能力, 此类节点在网络中具有较强的控制能力和调配能力。美国是国际天然气贸易主要出口国, 加权重度最高, 是天然气贸易网络核心节点, 在 GNG 网络和 LNG 网络中的介数中心度均为最高值。中国是国际天然气贸易中的主要进口国, 加权重度仅次于美国, 随着天然气可负担性的提高, 以及减排目标的约束, 中国一定程度上代表了亚洲市场增长的天然气需求。为了保障国内用气需求, 中国加强拓展国际天然进口贸易通道, 并且积极参与天然气再出口贸易。欧

表 7 NG 网络加权重度、中转能力、扩散能力
排名前 20 位的国家

Table 7 Top 20 countries in the NG network in terms of weighting degree, transit capacity and diffusion capacity

国家	加权重度	国家	中转能力	国家	扩散能力
美国	118 110 419.790	美国	0.119	意大利	0.360
中国	106 081 452.786	法国	0.110	捷克	0.250
挪威	104 179 060.194	中国	0.092	德国	0.241
法国	90 062 080.833	西班牙	0.072	法国	0.220
比利时	87 921 943.774	意大利	0.068	荷兰	0.202
澳大利亚	79 570 478.862	德国	0.051	卢森堡	0.201
卡塔尔	78 446 684.909	莫桑比克	0.047	乌克兰	0.200
日本	66 124 937.908	荷兰	0.038	芬兰	0.199
德国	63 073 578.080	南非	0.037	瑞典	0.196
俄罗斯	59 427 612.589	印度	0.037	爱尔兰	0.188
意大利	59 144 209.923	比利时	0.032	波兰	0.177
英国	53 049 379.101	阿塞拜疆	0.028	瑞士	0.177
韩国	45 140 689.424	立陶宛	0.020	西班牙	0.177
荷兰	34 956 968.051	巴西	0.019	英国	0.176
阿尔及利亚	34 395 702.916	安哥拉	0.018	希腊	0.170
西班牙	31 549 696.505	希腊	0.018	爱沙尼亚	0.164
马来西亚	31 527 731.037	尼日利亚	0.018	比利时	0.162
印度尼西亚	24 341 250.994	韩国	0.018	摩尔多瓦	0.146
加拿大	22 245 788.723	爱尔兰	0.017	斯洛文尼亚	0.145
印度	22 104 157.145	俄罗斯	0.017	挪威	0.145

洲天然气贸易市场中转能力突出, 法国、西班牙、意大利、德国、比利时 NG 网络加权重度排序位次分布于第 4 位到第 16 位之间, 均为网络核心节点和天然气再出口贸易的参与者。在 2022 年俄罗斯管道天然气供应中断后, 法国和西班牙在较小程度上凭借现有的 LNG 基础设施和管道连接, 使 LNG 流入欧洲其他地区。供应安全问题也加快了德国 LNG 接收终端的开发。

在 GNG 网络和 LNG 网络中, 希腊、意大利、卢森堡、捷克、瑞士、德国、比利时、法国、荷兰的特征向量中心度排位均较高, 这些国家与网络中其他重要节点具有紧密的贸易联系, 体现出欧洲天然气市场强大的扩散能力。当网络中某个关键节点损失并与其他关键节点的联系进行调节, 维持系统性能。结合中转能力和扩散能力来看, 法国、意大利、德国、比利时在天然气贸易中表现出较强抗干扰性。

3 结论与建议

3.1 结论

1) 在蓄意扰动策略下, 五个网络性能遭到严重破坏, SSLNG 网络表现出相对较高的鲁棒性, 其余网

表 8 GNG 网络、LNG 网络中转能力、扩散能力排名前 20 位的国家

Table 8 Top 20 countries in the NG, LNG networks in terms of transit capacity and diffusion capacity

GNG 网络				LNG 网络			
国家	中转能力	国家	扩散能力	国家	中转能力	国家	扩散能力
美国	0.140	乌克兰	0.389	美国	0.097	意大利	0.361
德国	0.104	摩尔多瓦	0.352	法国	0.087	德国	0.290
以色列	0.086	匈牙利	0.339	西班牙	0.065	法国	0.260
意大利	0.084	克罗地亚	0.266	意大利	0.055	芬兰	0.251
希腊	0.076	希腊	0.261	中国	0.047	瑞典	0.225
中国	0.053	意大利	0.258	德国	0.045	荷兰	0.221
卢森堡	0.050	奥地利	0.245	荷兰	0.042	爱尔兰	0.217
保加利亚	0.045	斯洛文尼亚	0.225	莫桑比克	0.039	英国	0.212
加拿大	0.043	卢森堡	0.208	南非	0.029	波兰	0.201
匈牙利	0.043	罗马尼亚	0.169	比利时	0.026	爱沙尼亚	0.196
比利时	0.036	捷克	0.167	印度	0.023	比利时	0.193
捷克	0.035	瑞士	0.162	爱尔兰	0.021	挪威	0.192
法国	0.029	德国	0.161	巴西	0.020	卢森堡	0.187
日本	0.022	比利时	0.150	安哥拉	0.019	捷克	0.178
克罗地亚	0.017	保加利亚	0.144	立陶宛	0.015	立陶宛	0.174
乌克兰	0.016	法国	0.139	挪威	0.015	西班牙	0.163
西班牙	0.015	塞尔维亚	0.130	韩国	0.013	瑞士	0.147
俄罗斯	0.014	波黑	0.090	埃及	0.013	希腊	0.140
波兰	0.013	荷兰	0.087	新加坡	0.013	巴西	0.115
瑞士	0.011	黑山	0.084	印度尼西亚	0.012	直布罗陀	0.103

络的鲁棒性均低于初始时刻性能的 10%。短期现货合同 LNG 贸易的灵活性、多元性一定程度上为贸易网络功能的稳定性赋能。随机扰动情况下五个网络仍然可以保持功能较大的情况下稳定运行,网络韧性表现显著优于蓄意扰动情况。天然气贸易网络能够较好的应对自然灾害等随机事件的破坏,但面对蓄意破坏事件的风险吸收能力较弱。

2)在四种模拟情景下,SSLNG 网络韧性表现均优于 MLLNG 网络,LNG 网络韧性表现均优于 GNG 网络。SSLNG 网络的综合韧性水平最高。短期合同和现货 LNG 贸易的多元性和灵活性使得 SSLNG 网络无论在扰动阶段还是恢复阶段均能保持较高功能总量。GNG 网络的综合韧性水平最低,受交易和运输模式所限,对网络扰动更加敏感,吸收破坏能力与功能恢复能力较弱。

3)综合 GNG 网络和 LNG 网络来看,欧洲天然气贸易市场具有强大的中转能力和扩散能力。法国、意大利、德国、比利时在天然气贸易中表现出较强抗干扰性。中国加强拓展国际天然进口贸易通道,并且积极参与天然气再出口贸易,中转能力凸显。

3.2 政策建议

1)我国作为天然气国际贸易市场的主要参与者应密切关注现货 LNG 的价格波动情况,加强我国天

然气现货价格博弈能力,积极开展再出口贸易活动,争取贸易效益最大化,增强市场韧性^[37]。GNG 仍是我国天然气贸易进口的主体,应借助地缘优势持续发挥、加强和维护其稳定性和输送能力优势,配合 LNG 的灵活性特点,推动我国国际天然气贸易健康发展,为我国天然气资源供给的可靠性赋能。

2)我国应持续深化与天然气主要贸易国的能源国际合作。拓展对俄罗斯与中亚各国的海外油气股权投资,保证长期天然气资源供给合作关系;推动对油气资源丰富的非洲、拉丁美洲国家的油气开发服务输出,基础设施建设合作;加强与美国及欧洲各国的天然气、清洁能源、能源装备等方面的技术创新研发合作与交流,引进先进的技术与管理经验,全面提升我国天然气资源开发和利用效率,减少外部依赖;重点关注我国与赤道附近国家或澳大利亚等南半球国家的天然气贸易合作,规避因季节因素导致的资源供给短缺风险;探索与南亚各国共建跨境油气管道,打造新的天然气海陆运输通道,规避马六甲海峡等 LNG 海上运输关键节点中断的风险。

3)我国应积极参与天然气国际贸易治理体系建设,利用国际能源组织的多边合作机制,形成具有区域影响力的天然气贸易联盟、天然气贸易论坛,加强我国天然气企业与天然气、LNG 国际组织和机构的

交流与信息共享,与亚洲关键天然气贸易国家共同探索设置适宜本地区天然气产业平稳、健康发展的价格指数或机制。随着天然气国际供给需求变化情况,与其他具有影响力的国际天然气贸易价格指数、枢纽协调适应,优化我国天然气国际贸易议价能力。

4)我国需构建更加完善可靠的天然气储备体系,持续推进我国天然气储气库、LNG接收站、天然气管网等设施的建设^[38],关注对浮式储存及再气化装置的开发和利用,提高天然气能源工程设施设备自主研发制造能力,增强天然气基础设施系统灵活性,提升国内天然气应急保障和调峰能力,提升贸易抗风险能力。同时也为天然气基础设施的市场化利用提供更多的机会和空间,加速深化天然气市场化改革进程。

参考文献(References):

- [1] 邹才能,林敏捷,马锋,等.碳中和目标下中国天然气工业进展、挑战及对策[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 418-435.
ZOU Caineng, LIN Minjie, MA Feng, et al. Development, challenges and strategies of natural gas industry under carbon neutral target in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 418-435.
- [2] 樊大磊,王宗礼,卜小平,等.2024年上半年国内外油气资源形势分析及展望[J]. *中国矿业*, 2024, 33(7): 1-8.
FAN Dalei, WANG Zongli, BU Xiaoping, et al. Analysis and prospects of oil and gas resources situation at home and abroad in the first half of 2024[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(7): 1-8.
- [3] 樊大磊,王宗礼,李剑,等.2023年国内外油气资源形势分析及展望[J]. *中国矿业*, 2024, 33(1): 30-37.
FAN Dalei, WANG Zongli, LI Jian, et al. Analysis of domestic and international oil and gas resources situation in 2023 and outlook[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(1): 30-37.
- [4] 黄建,冯升波,肖彬彬,等.安全降碳背景下能源韧性的测度指标及其宏观分析框架研究[J]. *宏观经济研究*, 2022(12): 115-125, 151.
HUANG Jian, FENG Shengbo, XIAO Binbin, et al. A study on the measurement indicators of energy resilience in the context of safely reducing carbon and its macro analysis framework[J]. *Macroeconomics*, 2022(12): 115-125, 151.
- [5] 丹美涵,张厚和,车超,等.大能源视角下中国能源安全形势及中央企业作用研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(2): 1-9.
DAN Meihan, ZHANG Houhe, CHE Chao, et al. Research on China's energy security situation and the role of central SOEs from the perspective of generalized energy[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(2): 1-9.
- [6] 朱彤.能源安全新风险与新逻辑:系统韧性的视角:兼论新逻辑下我国能源安全问题与战略思路[J]. *技术经济*, 2023, 42(2): 1-10.
ZHU Tong. New risks and new logics of energy security: from the perspective of system resilience concurrently discussing problem of energy security and strategic thinking under the new logic in China[J]. *Journal of Technology Economics*, 2023, 42(2): 1-10.
- [7] XU H, WANG Z, JAWADI F, et al. Reconstruction of international energy trade networks with given marginal data: a comparative analysis[J]. *Chaos Solitons and Fractals*, 2023, 167: 113031.
- [8] MEI Q, HU Q, HU Y, et al. Structural analysis and vulnerability assessment of the European LNG maritime supply chain network (2018-2020)[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2024, 253: 107126.
- [9] 夏启繁,杜德斌.21世纪海上丝绸之路能源贸易结构及与中国的贸易关系演变[J]. *地理研究*, 2022, 41(7): 1797-1813.
XIA Qifan, DU Debin. Evolution of energy trade structure in the 21st century maritime silk road and its trade relations with China[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(7): 1797-1813.
- [10] 马远,雷会妨.丝绸之路经济带沿线国家能源贸易网络演化及互联互通效应模拟[J]. *统计与信息论坛*, 2019, 34(9): 92-102.
MA Yuan, LEI Huifang. Simulation of energy trade network evolution and connectivity effect of countries along the silk road economic belt[J]. *Journal of Statistics and Information*, 2019, 34(9): 92-102.
- [11] 何则,杨宇,刘毅,等.世界能源贸易网络的演化特征与能源竞争关系[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(10): 1621-1632.
HE Ze, YANG Yu, LIU Yi, et al. Characteristics of evolution of global energy trading network and relationships between major countries[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(10): 1621-1632.
- [12] 完颜泽,张虎俊,王朗.全球LNG网络特征及中国LNG进口现状分析[J]. *中国矿业*, 2022, 31(7): 1-13.
WANYAN Ze, ZHANG Hujun, WANG Lang. Analysis of characteristics of global LNG trade network and China's LNG imports[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(7): 1-13.
- [13] 张宏,丁昊,张力钧,等.全球天然气贸易格局及中国天然气进口路径研究[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(6): 1-5.
ZHANG Hong, DING Hao, ZHANG Lijun. Global natural gas trade pattern evolution and development of China's natural gas importing paths[J]. *Areal Research and Development*, 2020, 39(6): 1-5.
- [14] 邢文婷,贺向宇,袁琳.全球管道天然气贸易节点重要性评价[J]. *工业技术经济*, 2022, 41(1): 142-151.
XING Wenting, HE Xiangyu, YUAN Lin. Research on evaluation of important nodes in global pipeline natural gas trade network[J]. *Journal of Industrial Technology and Economy*, 2022, 41(1): 142-151.
- [15] SHAHNAZI R, SAJEDIANFARD N, MELATOS M. Import and export resilience of the global oil trade network[J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 2017-2035.
- [16] GENG J, JI Q, FAN Y. A dynamic analysis on global natural gas trade network[J]. *Applied Energy*, 2014, 132: 23-33.
- [17] 梅强,胡勤友,刘希亮,等.全球LNG海上运输网络演化及中国贸易现状分析[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(9): 1701-1716.
MEI Qiang, HU Qinyou, LIU Xiliang, et al. Research on the evolution of global LNG maritime transportation network and trade condition of China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(9): 1701-1716.
- [18] 陈伟,王蕊,龙燕,等.“一带一路”沿线地区贸易网络韧性研究[J]. *经济地理*, 2024, 44(1): 22-31.
CHEN Wei, WANG Xinrui, LONG Yan, et al. Resilience evolution of the trade networks in regions along the belt and road[J]. *Economic*

- Geography, 2024, 44(1): 22-31.
- [19] SUN X, WEI Y, JIN Y, et al. The evolution of structural resilience of global oil and gas resources trade network[J]. *Global Networks*, 2022, 23(2): 391-411.
- [20] SHUTTERS S, WATERS K, MUNEEPEERAKUL R. Triad analysis of global energy trade networks and implications for energy trade stability[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 15103673.
- [21] 陈伟, 蒋益飞, 刘志高. 全球镍资源贸易网络演化及其韧性研究[J]. *世界地理研究*, 2025, 34(1): 1-15.
CHEN Wei, JIANG Yifei, LIU Zhigao. Evolution and resilience of the global nickel resources trade network[J]. *World Regional Studies*, 2025, 34(1): 1-15.
- [22] 焦兵. 能源安全视角下国际能源贸易网络韧性测度研究[J]. *工业技术经济*, 2024, 43(5): 131-140.
JIAO Bing. Measuring the resilience of international energy trade networks from an energy security perspective[J]. *Journal of Industrial Technology and Economy*, 2024, 43(5): 131-140.
- [23] 左芝鲤, 成金华, 郭海湘, 等. 锂产业链贸易网络结构韧性的演化与评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(2): 155-166.
ZUO Zhili, CHENG Jinhua, GUO Haixiang, et al. Resilience evolution and evaluation of the trade network structure in the lithium industry chain[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(2): 155-166.
- [24] CHEN Y, CHEN M. Evolution of the global phosphorus trade network: a production perspective on resilience[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 136843.
- [25] 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.
YU Yu, MA Daipeng, WANG Xianmei. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources[J]. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2006-2021.
- [26] 周霞, 于娱, 施琴芬. 基于专利引用的通信芯片产业创新网络韧性研究[J]. *软科学*, 2024, 38(8): 94-104.
ZHOU Xia, YU Yu, SHI Qinfen. Resilience of the innovation network in the communication semiconductor industry based on patent citations[J]. *Soft Science*, 2024, 38(8): 94-104.
- [27] 易璐, 李云云, 谢柳燕, 等. 全球稀土产业链贸易格局演化与出口竞争力研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(6): 53-62.
YI Lu, LI Yunyun, XIE Liuyan, et al. Research on the evolution of trade pattern and export competitiveness of global rare earth industry chain[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(6): 53-62.
- [28] 王列辉, 张圣, 陈锐. 南海周边航运网络脆弱性及对中国集装箱运输的影响[J]. *世界地理研究*, 2022, 31(4): 700-712.
WANG Liehui, ZHANG Sheng, CHEN Rui. Network vulnerability of ports around the South China Sea and the impact on Chinese maritime transport[J]. *World Regional Studies*, 2022, 31(4): 700-712.
- [29] 吴迪, 王诺, 于安琪, 等. “丝路”海运网络的脆弱性及风险控制研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1133-1148.
WU Di, WANG Nuo, YU Anqi, et al. Vulnerability and risk management in the maritime silk road container shipping network[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1133-1148.
- [30] YU Y, MA D, ZHU W. Resilience assessment of international cobalt trade network[J]. *Resources Policy*, 2023, 83: 103636.
- [31] 谢永顺, 张琦琦, 王成金. 全球海底光缆网络的脆弱性结构及区域抗毁性评价[J]. *地理科学*, 2024, 44(3): 411-420.
XIE Yongshun, ZHANG Qiqi, WANG Chengjin. Vulnerability structure of global submarine optical cable network and evaluation of regional survivability[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(3): 411-420.
- [32] 陈超, 谭心鑫, 王迪, 等. 油库抗震韧性动态评估模型[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(4): 87-92.
CHEN Chao, TAN Xinxin, WANG Di, et al. Dynamic assessment model for seismic resilience of oil depot[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(4): 87-92.
- [33] 李静远, 周娜, 胡珮琪, 等. 全球铬矿贸易网络格局演化及竞争力分析[J]. *中国矿业*, 2024, 33(7): 48-58.
LI Jingyuan, ZHOU Na, HU Peiqi, et al. Evolution of trade network pattern of chromium ore in global and analysis of competitiveness[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(7): 48-58.
- [34] 吴迪, 王宇鹏, 盛世杰, 等. “21世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络的脆弱性变化[J]. *地理学报*, 2022, 77(8): 2067-2082.
WU Di, WANG Yupeng, SHENG Shijie, et al. Vulnerability changes of the maritime silk road container shipping network under intentional attacks[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 2067-2082.
- [35] YUAN X, GE C, LIU Y, et al. Evolution of global crude oil trade network structure and resilience[J]. *Sustainability*, 2022, 14(23): 026447.
- [36] DING Y, ZHANG M, CHEN S, et al. Assessing the resilience of China's natural gas importation under network disruptions[J]. *Energy*, 2020, 211: 1-14.
- [37] 孙杜芬, 邹倩, 吴义平, 等. 油价低位震荡期间中国进口LNG定价机制改革思考[J]. *中国矿业*, 2022, 31(4): 31-35.
SUN Dufen, ZOU Qian, WU Yiping, et al. Thoughts on pricing mechanism reform of Chinese LNG imports during the low fluctuation of oil princes[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(4): 31-35.
- [38] 李国永, 徐波, 王瑞华, 等. 我国天然气地下储气库布局建议[J]. *中国矿业*, 2021, 30(11): 7-12.
LI Guoyong, XU Bo, WANG Ruihua, et al. Suggestions on the layout of underground gas storage in China[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(11): 7-12.