

中国电力供应可靠性经济价值评估

曲申^{1,2}, 王千姿^{1,2}, 林瑾^{1,2}, 张佳琪^{1,2}, 贾雅雯^{1,2}, 周琪^{1,2*}

1. 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 北京 100081

2. 北京理工大学管理学院, 北京 100081

摘要 电力行业与其他经济部门在供应链网络上相互依赖, 电力中断会对整个经济造成不可预见的高阶影响。为探究不同地区通过提高供电可靠性从而减缓全国经济损失的程度, 利用基于适应性主体的复杂网络供应链模型对中国电力供应可靠性进行经济价值评估。研究采用自上而下的方法, 估算了2018年中国电力中断事件对生产活动造成的直接经济损失, 并将其作为外部冲击输入该复杂网络模型, 逐日模拟电力中断对供应链网络产生的高阶间接经济损失。通过设置298种情景逐个减少全国各地区的停电时间, 识别出了15个电力供应可靠性的重点保障地区。提高这些地区的电力供应可靠性, 可以将全国的间接经济损失平均降低4.39亿~19.63亿元, 相对于基准情景下的间接经济损失减少了0.39%~1.76%。

关键词 电力中断; 电力供应可靠性; 适应性主体; 复杂网络

电力供应的稳定与能源安全和经济发展密切相关。党的二十大报告高度重视能源安全问题, 提出了立足于本国能源资源禀赋, 有计划、分步骤实施碳达峰和碳中和行动的目标。在推进“双碳”目标实现的过程中, 电力供应的安全稳定问题不容忽视。2021年,《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》制定了非化石能源消费比重的目标。根据该意见, 到

2025、2030和2060年, 非化石能源消费比重分别应达到20%、25%和80%以上。然而, 高比例新能源的引入给中国电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战, 主要体现在能源波动性和间歇性方面。此外, 气候变化引起的极端天气事件增加、能源供应不稳定、能源基础设施脆弱性以及能源需求增加进一步加剧了电力供应的不稳定性, 导致了不同程度的电力供应危机^[1]。为了应对电力供应危机, 评估

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-11-26

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目(72022004)

作者简介: 曲申, 教授, 研究方向为环境政策和产业生态, 电子信箱: squ@bit.edu.cn; 王千姿(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为能源与气候经济, 电子信箱: wangqz99@163.com; 周琪(共同通信作者), 副教授, 研究方向为环境风险评价, 电子信箱: qzhou@bit.edu.cn

引用格式: 曲申, 王千姿, 林瑾, 等. 中国电力供应可靠性经济价值评估[J]. 科技导报, 2024, 42(7): 25-39;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.01298

中国电力供应的可靠性具有重要的经济价值^[2],可以为电力系统容量规划^[3-4]、电力市场交易机制设计^[5-6]、电价制定^[7]和需求响应激励方案设计^[8]等提供科学依据和指导。

近年来,学界广泛关注如何科学准确地评估电力系统可靠性的经济价值^[9]。电力系统可靠性是指电力系统在一定时间内,以满足用户用电需求为目标,保证电力系统安全、稳定、可靠地运行的能力^[10]。电力系统可靠性包括了发电、输电、供电和用户用电可靠性,本研究主要关注其中的供电可靠性。传统的评估方法包括调查法、案例分析和生产函数法^[11]。然而,这些方法都存在一定的局限性。调查法涉及的问卷和访谈需要经过严密的预实验和设计,实施难度较大^[12]。案例分析法的测算结果容易受到停电原因和地区等实际因素的影响,存在较大偏差。生产函数法假设电力是各个部门的主要生产要素之一,忽略了上下游产业之间的连锁反应和适应性行为,从而低估了电力系统可靠性的经济价值^[13]。实际上,供应链中的各个产业相互依存、相互影响,当发生电力中断时,其影响将通过供应链网络产生级联效应。忽视这种级联效应,将导致在估算能源安全维护成本时出现问题,如电力系统投资不足和电力交易机制设计不合理等,并最终会对电力供应的安全性构成威胁。

为了将供应链级联损失风险纳入电力或能源系统的可靠性价值评估中,一些研究人员尝试使用一般均衡模型(general equilibrium model, CGE)和投入产出模型(input-output model, IO)。这些模型的时间维度通常为年或多年。其中,CGE模型旨在模拟电力供应中断后,经济系统通过调整供需两侧的需求和价格,以重新使整个系统恢复平衡的状态^[14-15]。然而,CGE模型通常以年或多年为尺度求解均衡解,无法模拟短期电力供应冲击对经济系统的影响,以及由此造成的电力价格波动。

此外,IO模型也被用于评估供应链的级联风险。在中国的相关研究中,一些研究人员利用IO模型评估了中国各部门的电力失负荷价值和能源韧性等^[16-18]。Chen等^[19]采用改进后的IO模型评估了省级停电事件对中国经济的影响,并分析了停电

时间、电力需求程度、停电时长和停电地点对损失的影响程度。国外研究者也采用IO模型评估了苏格兰^[20]、南非^[21]电力系统稳定性价值。然而,IO模型假设技术系数矩阵不变,往往忽略了生产部门在应对外部冲击时调整生产规模、相对价格以及技术的能力。因此,使用IO模型对电力系统稳定性价值进行评估往往会低估经济系统的弹性,并高估可能造成的经济损失。

为了弥补上述模型的局限性,一些研究提出了基于适应性主体的复杂供应链网络模型。这些模型能够准确模拟微观主体的适应性行为,并展现经济弹性和各部门生产主体的实际动态。这些中短期模型具备高精度,能够捕捉到日尺度的时空动态经济后果,并模拟供应链网络之间的相互影响。例如,Henriet等^[22]建立了适应性区域IO模型,评估了自然灾害对美国供应链网络的冲击以及网络中15个部门500个主体的适应性行为。Shughrue等^[23]建立了网络动力学模型,以模拟飓风造成的危害如何通过全球城市间的动态贸易网络扩散。Leonie等人^[24]运用适应气候模型,计算了1991—2011年,在不断变化的经济和气候条件下,全球186个国家26个部门热暴露引起的生产力下降的一阶和高阶损失。然而,由于中国的经济结构、市场环境、政府管理等方面与发达国家存在巨大差异,因此无法直接将已有的模型应用在中国情境。

在“国内大循环”的形势下,电力系统和社会产业经济网络等系统高度互联,电力中断将带来广泛而深远的高阶影响。此外,中国超高压跨省输电线路和特高压跨区域输电线路的建设和投产,加强了地区之间的电力供应联系。此外,中国大力发展的超高压跨省输电线路和特高压跨区域输电线路加强了地区之间的电力供应联系^[25]。在此背景下,构建考虑不同地区间,供应链间接损失风险和产业部门适应性行为的级联模型,对于科学评估电力系统可靠性的经济价值至关重要。

综上,本研究旨在构建一个适用于中国情景的动态复杂网络供应链模型,以评估中国电力系统可靠性的经济价值。

1 数据与方法

1.1 数据来源

供应链网络数据来自中国碳核算数据库(Carbon Emission Account & Datasets, CEADs)中的2017年中国城市级别多区域投入产出表(MRIO),该表由313个地区(包括309个城市以及青海、云南、海南3个省份和西藏自治区)和42部门构成。这些数据代表了一个稳定状态下的初始供应链网络连接。本研究采用国内生产总值(GDP)比例调整法将2017年的MRIO表调整至2018年。电力中断数据来源于国家能源局电力可靠性管理和工程质量监督中心的《2018年全国地级行政区供电可靠性指标报告》。本研究重点关注各地区总停电时间和各地区平均停电频次这2个数据,这些数据用于计算由电力中断造成的直接经济损失。2018年,各地区用户总停电时间平均为16.01 h/户,平均停电次数为3.28次/户。电力安全重点保障地区的特征数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国电力统计年鉴》以及《中国能源统计年鉴》。

1.2 电力中断直接经济损失核算

本研究提出了衡量经济部门由于电力供应中断造成的直接经济损失风险的指标,即电力中断的直接损失风险。该指标的计算基于以下4点假设。首先,电力在供应链的各个生产主体中不可或缺,是经济部门的重要投入要素。因此,电力供应中断将导致生产活动的停止。其次,电力供应中断期间,生产主体无法提前转移生产活动的时间,并且短时间内也无法转移生产地点。再次,停电发生的地区的经济部门产出将以相同的比例减少。最后,本研究假设电力供应中断的持续时间与经济损失之间存在线性关系。

基于以上假设,本研究使用公式(1)表征电力供应中断对生产主体生产能力的冲击,即直接损失百分比(θ)。 θ 表示在电力供应中断的冲击下,生产主体1 d内生产能力的损失百分比。然后,根据公式(2),计算每个地区每次电力中断所造成的直接经济损失金额。

$$\theta_{i,n} = \frac{\alpha_i \cdot T_i}{24 \cdot F_i} \quad (1)$$

$$D_{\text{loss}(i,n)} = \theta_{(i,n)} \cdot VA_i / 365 \quad (2)$$

式中, i 表示地区编号; n 表示地区 i 的第 n 次停电,以整数表示; T_i 表示地区 i 的年总停电时间(单位:h), α_i 表示地区 i 年平均停电中将导致经济部门生产中断的百分比; F_i 表示地区 i 的年平均停电频率,以整数表示; VA_i 表示地区 i 在2018年的经济总增加值(单位:元); $D_{\text{loss}(i,n)}$ 代表地区 i 的第 n 次停电造成的直接经济损失金额(单位:元)。

根据《2018年中国电力行业可靠性报告》,全国停电主要责任原因分为预安排停电和故障停电。预安排停电主要包括配网预安排停电(56.24%)、主网预安排停电(1.57%)、用户申请停电(0.58%)、限电(0.21%)、调电(0.15%)和低压作业(0.21%)。故障停电包括主网故障停电(2.16%)、配网故障停电(37.7%)和低压设施故障停电(1.15%)。故障停电通常由于其突发性不可预测,无法提前安排生产时间,从而影响用户的生产活动。而预安排停电中的大部分停电类别,用户会提前得到通知,以便推迟或调整生产时间。然而,限电、调电和低压作业等停电类别的损失机制也会影响用户的生产活动。总体而言,上述停电原因导致用户停电的时间占2018年全社会停电时间的约42%。

本研究计算获得的直接经济损失金额($D_{\text{loss}(i,n)}$)可能在一定程度上高估了直接损失,因为经济部门的生产并不是全天候的。然而,由于数据的不可得性,无法确定停电是否发生在工作时间内。因此,本研究采用停电时长与1 d总时长(24 h)的比例表示停电发生在工作时间内的概率。除此之外,根据假设,电力对各行业的生产经营活动都是必不可少的。因此,停电时长与1 d总时长(24 h)的比例同样表示了在工作时间内发生生产中断的概率。在计算直接损失时,由于停电在1 a中发生的具体时间是未知的,因此采用蒙特卡罗模拟将电力中断随机分配到各个地区1 a内的某些天中。

1.3 电力中断间接经济损失核算

本研究构建的基于适应性主体的动态复杂网

络供应链模型是一种基于主体的模型,它在现有的主体模型^[26-27]基础上进行了改进和创新,可用于评估外部冲击对供应链系统的间接影响。参照现实世界中的供应链网络,本基于主体的模型中包含3类主体:生产主体、消费主体和运输主体。此外,为了使虚拟模拟更符合现实世界的经济运行规律,该模型引入了更加详细的主体微观机制和适应性行为,以更准确地模拟经济系统的运行。在该模型中,生产主体表示各地区的部门,消费主体代表各地区的最终需求,运输主体则模拟了生产主体与消费主体或消费主体之间货物运输的过程。这3类主体在复杂的供应链网络中进行动态演化和交互,并具有详细的微观基础^[28]。

该模型的参数定义和主体行为的微观数学描述如表1和表2所示。表1按照不同的分类展示了模型中的变量及其含义,表2展示了3类主体在供应链网络中表现出的行为和对应的微观数学描述。表2中各个变量的含义对照表1。生产主体能够将生产产品和订单交付给供应链网络中连接的其他主体。当遇到外部冲击时,生产主体可以通过补充库存、调整上游供应商订单份额、利用闲置产能、调整生产技术、灾后恢复生产等一系列适应行为进行适应。消费主体的行为包括产品使用、订单发送以及根据供需情况调整供应商份额等。运输主体的行为包括产品装载、运输和卸载等环节。当某地区

的生产遭受停电损失时,外部冲击将被逐日输入模型进行动态模拟。模型的运行过程如下:首先,将中国城市级别的MRIO表分配给中国各地区的逐日经济状态进行初始化,以代表供应链网络的初始稳定状态,决定了模型中定义世界的变量。然后,逐个将由电力中断事件导致的各地区直接损失百分比(状态变量 θ)的外部冲击分配给目标地区的各部门。最后,根据表2中模型运行机制,3类主体在模型规定的初始世界下进行互动。在考虑外部冲击的影响下,逐日模拟经济系统的非均衡演化,以考虑多次短期停电对经济的叠加间接影响。

该模型具有以下优势:(1)高时空分辨率,可模拟停电发生后经济系统的逐日演化,捕捉不同地区多次小规模停电对系统的整体冲击。(2)产业网络构建基于MRIO表,拥有传统投入产出模型优势的同时,可以评估不同地区和部门受到停电冲击的影响,突出供应链网络中电力中断传播的复杂性和广泛性。(3)在新型高比例可再生电力系统的背景下,该模型具有很强的实用价值。由于可再生能源发电的波动性,电力供应的可靠性在一定时间内可能会受到影响。在这种情况下,小规模短期停电的可能性增加。利用该模型可以开展多种情景分析优化限电政策,以最大程度减少停电给社会经济系统带来的损失。以上优势使得该模型在评估中国电力供应的可靠性以及制定相应的可靠性策略方

表1 模型变量

变量类型	符号	含义	取值
定义世界	r	地区	实数(1, 2, ..., R)
	s	每个地区的部门(每个部门只生产1种产品)	实数(1, 2, ..., S)
	$Net^{<P>}$	连接生产者的网络(1有连接;0不连接)	$(RS) \times (RS)$ 矩阵
	$Net^{<P><C>}$	连接生产者和消费者的网络	$(RS) \times R$ 矩阵
特征时间	Δt	每个时间步长的长度	实数,取1(d)
	τ_0	企业生产能力完全恢复需要的时间	实数,取180(d)
	τ_1	调整到目标库存水平需要的时间	实数,取180(d)
	τ_α	调整到最大生产能力需要的时间	实数,取180(d)
	τ_o	调整到目标订单分布需要的时间	实数,取180(d)
	τ_A	技术适应需要的时间	实数,取180(d)
状态变量	θ	相对于事件前水平的生产能力减少比例	实数,取值范围[0,1]
	α	产能过剩比例	实数,取1
	α^{\max}	最大可能的 $R \times S$ 生产过剩比例	实数,取1.2

表1 模型变量(续)

变量类型	符号	含义	取值
订单流入	$O^{\leftarrow<P>}$	其他生产主体的订单	$R \times S$ 矩阵
	$O^{\leftarrow<C>}$	来自不同地区消费主体的订单	$R \times 1$ 向量
	$O^{\leftarrow E}$	出口订单(仅适用于开放经济)	$1 \times S$ 向量
	O^{tot}	总订单, 以上3项之和	—
	$o^{\leftarrow<P>}$	来自其他生产主体的订单在总订单中的份额	$R \times S$ 矩阵
	$o^{\leftarrow<C>}$	来自消费主体的订单在总订单中的份额	$R \times 1$ 向量
	$o^{\leftarrow E}$	出口订单占总订单的份额(仅适用于开放经济)	$1 \times S$ 向量
产品流入	$Z^{\leftarrow<P>}$	通过运输主体(来自生产主体)的产品流入	$R \times S$ 矩阵
	$Z_{t-1}^{\leftarrow<P>}$	上一期通过运输主体的产品流入	$R \times S$ 矩阵
	$z^{\leftarrow<P>}$	生产主体在一个行业中发送的产品份额	$R \times S$ 矩阵
生产技术	a	单位生产的投入需求	$R \times S$ 矩阵
	i	单位生产的进口需求(仅适用于开放经济)	$R \times 1$ 向量
库存	n	不同产品的使用天数	$R \times S$ 矩阵
	l	当前库存水平	$R \times S$ 矩阵
生产	X^{cap}	生产能力	—
	X^s	不同产品库存约束下的可能生产水平	$R \times S$ 矩阵
	X^a	实际生产	—
产品流出	$Z^{\rightarrow<P>}$	产品送到不同的生产主体(通过运输主体)	$R \times S$ 矩阵
	$Z^{\rightarrow<C>}$	产品送到不同的消费主体(通过运输主体)	$R \times 1$ 矢量
	$Z^{\rightarrow E}$	出口产品(仅适用于开放经济)	—
订单流出	$O^{\rightarrow<P>}$	向不同生产主体发送的订单	$R \times S$ 矩阵
	$o^{\rightarrow<P>}$	某部门发送给不同生产主体的订单份额	$R \times S$ 矩阵

表2 模型微观方法运行机制

主体	主体行为	
	语言描述	数学描述
生产主体 <P>(r, s)	生产产品 (基于列昂惕夫生产函数)	$O^{\text{tot}} = \sum O^{\leftarrow<P>}(r', s') + \sum O^{\leftarrow<C>}(r') + O^E$ $X^{\text{cap}} = \alpha(1 - \theta)\bar{X}$ $I^R(s') = n(s')X_{t-1}^a \alpha(s')$ $X^{s'} = \begin{cases} \frac{I(s')}{a(s')}, & \text{if } I(s') \geq \psi I^R(s') \\ \left(\frac{I(s')}{\psi I^R(s')} \right) \frac{I(s')}{a(s')}, & \text{if } I(s') < \psi I^R(s') \end{cases}$ $X^a = \min \{ O^{\text{tot}}, X^{\text{cap}}, \min \{ X^{s'} \} \}$
	送出产品 (基于习惯-适应性准则)	<p>产品分配方式</p> $\begin{cases} Z^{\rightarrow<P>}(r', s') = O^{\leftarrow<P>}(r', s') \\ Z^{\rightarrow<C>}(r') = O^{\leftarrow<C>}(r') \\ Z^{\rightarrow E} = O^E \end{cases} \quad \text{if } X^a = O^{\text{tot}}$ $\begin{cases} Z^{\rightarrow<P>}(r', s') = X^a \cdot o^{\leftarrow<P>}(r', s') \\ Z^{\rightarrow<C>}(r') = X^a \cdot o^{\leftarrow<C>}(r') \\ Z^{\rightarrow E} = X^a \cdot o^E \end{cases} \quad \text{if } X^a < O^{\text{tot}}$

表2 模型微观方法运行机制(续)

主体	主体行为	
	语言描述	数学描述
生产主体 <P>(r, s)		企业的当期库存 $I_t(s') = I_{t-1}(s') - X_{t-1}^q a_{t-1}(s') + \sum Z^{\leftarrow <p>}(r', s')$
	送出订单 (从而向目标水平补充存货)	如果 s' 是同质产品 $I^T(s') = n(s') \cdot \min\{O^{\text{tot}}, X^{\text{cap}}\} a(s')$ $O^{\leftarrow <p>}(s') = a(s') X^a + (I^T(s') - I(s')) \frac{\Delta t}{\tau_I}$
		调整为现实的订单份额
	调整上游供应商 (从而缓解中间品短缺)	$O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(r', s') = O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(r', s') + (z^{\leftarrow <p>}(r', s') - o_{t-1}^{\leftarrow <p>}(r', s')) \frac{\Delta t}{\tau_0}$
		向区域 r' 中的供应商订购 $O^{\leftarrow <p>}(r', s') = O^{\leftarrow <p>}(s') \cdot o^{\leftarrow <p>}(r', s')$
	利用闲置生产能力 (从而保证产品供给)	$a_{t+1} = \begin{cases} a_t + (a^{\text{max}} - a_t) \left(\frac{O^{\text{tot}} - X^a}{O^{\text{tot}}} \right) \frac{\Delta t}{\tau_a}, & \text{if } X^a < O^{\text{tot}} \\ a_t - (a_t - 1) \frac{\Delta t}{\tau_a}, & \text{if } X^a = O^{\text{tot}} \end{cases}$
		对于开放经济(假设 s' 是同质产品) $O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(s') > Z^{\leftarrow <p>}(r, s <p>(s'))$ s' 存在缺失
		将订单转移到进口 $a_t(s') = a_{t-1}(s') - \left(\frac{O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(s') - Z^{\leftarrow <p>}(r, s <p>(s'))}{O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(s')} \right) a_{t-1}(s') \cdot \frac{\Delta t}{\tau_A}$
		调整生产技术 (从而适应中间品短缺) $i_t = i_{t-1} + \sum_{s'=1}^s a_t(s')$ $O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(s') > Z^{\leftarrow <p>}(r, s <p>(s'))$ s' 不存在缺失
		从进口退回 $a_t(s') = a_{t-1}(s') + \left(\frac{\bar{a}(s') - a_{t-1}(s')}{\bar{a}(s')} \right) (\bar{a}(s') - a_{t-1}(s')) \cdot \frac{\Delta t}{\tau_A}$ $i_t = i_{t-1} + \sum_{s'=1}^s a_t(s')$
	对于封闭经济, $a_t(s')$ 没有理由偏离 $\bar{a}(s')$	
	灾后重建 (逐渐恢复生产能力) $\theta_{(t+1)} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_\theta} \right) \theta_t$	
	使用产品 —	
消费主体 <C>(r)		调整为现实的订单份额 $O_t^{\leftarrow <p>}(r', s') = O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(r', s') + (Z^{\leftarrow <p>}(r', s') - O_{t-1}^{\leftarrow <p>}(r', s')) \frac{\Delta t}{\tau_0}$
	准备送出订单	向区域 r' 中的供应商订购 $O^{\leftarrow <p>}(r', s') = O^{\leftarrow <p>}(s') \cdot o^{\leftarrow <p>}(r', s')$

表2 模型微观方法运行机制(续)

主体	主体行为	
	语言描述	数学描述
运输主体 <T>(r ₁ , r ₂ , s)		运输主体长度为 L
		生产主体间
		$Z_{t+1}(\cdot \langle T \rangle^{-\langle P \rangle}(r_1, s_1, r_2, s_2))$
		$= (Z_t^{-\langle P \rangle}(r_2, s_2 \langle P \rangle(r_1, s_1), Z_{1,t}, Z_{2,t}, \dots, Z_{L,t}))$
	装载产品	$\equiv (Z_{1,t+1}, Z_{2,t+1}, \dots, Z_{L+1,t+1})$
		生产主体与消费主体间
	$Z_{t+1}(\cdot \langle T \rangle^{-\langle C \rangle}(r_1, s_1, r_2))$	
	$= (Z_t^{-\langle C \rangle}(r_2 \langle P \rangle(r_1, s_1), Z_{1,t}, Z_{2,t}, \dots, Z_{L,t}))$	
	$\equiv (Z_{1,t+1}, Z_{2,t+1}, \dots, Z_{L+1,t+1})$	
	生产主体间	
	$Z_i(\cdot \langle T \rangle^{-\langle P \rangle}(r_1, s_1, r_2, s_2)) \equiv (Z_{1,t}, Z_{2,t}, \dots, Z_{L,t})$	
	生产主体与消费主体间	
	$Z_i(\cdot \langle T \rangle^{-\langle C \rangle}(r_1, s_1, r_2)) \equiv (Z_{1,t}, Z_{2,t}, \dots, Z_{L,t})$	
	生产主体间	
	$Z_t^{-\langle P \rangle}(r_1, s_1 \langle P \rangle(r_2, s_2)) \equiv Z_{L+1,t+1}$	
	生产主体与消费主体间	
	$Z_t^{-\langle P \rangle}(r_1, s_1 \langle C \rangle(r_2)) \equiv Z_{L+1,t+1}$	

面具有重要的研究意义和广阔的应用潜力。

1.4 电力供应可靠性情景设置

为研究不同地区提高供电可靠性对减缓全国经济损失的影响程度,并了解各地区电力可靠性对全国经济的异质性影响,本研究设置 298 种情景开展了电力供应可靠性经济价值的情景分析。基准情景下的电力中断状态由“用户平均停电时长”和“用户平均停电频次”两者决定,本文选择降低地区的“用户平均停电时长”来提高地区供电可靠性。在全国 313 个地区中,其中 15 个地区由于缺少电力中断数据而没有纳入情景设置中,因此共设置了 298 种不同的电力中断情景。在每种情景下,为了放大与基准情景损失的差值便于观察结果,本研究依次选择一个地区将其用户平均停电时间降低 50%,而其他地区的停电时间不变。该情景设定会

影响模型中的参数 θ ,产生新的直接损失矩阵,并将更新后的直接损失输入多主体模型中进行模拟。通过比较以上 298 种情景的结果,本研究探究了不同地区和部门提高供电可靠性对减缓全国经济损失的异质性,并确定了电力可靠性建设的重点地区和部门。

2 结果分析与讨论

2.1 电力中断的经济损失评估

图 1 展示了 2018 年因电力中断导致的产业链网络总损失排名前 15 名城市的直接和间接损失构成。柱状图显示了直接损失和间接损失的构成,折线图显示了各城市间接损失占总损失的比例,而饼图则展示了全国直接损失和间接损失的比例。由

图1可知,在总损失方面,排名前15名的城市中,华东地区有7个城市遭受了较大的损失,而其他地区的损失分布相对均衡。华北地区有3个城市,西南和华中地区各有2个城市,华南地区有1个城市。

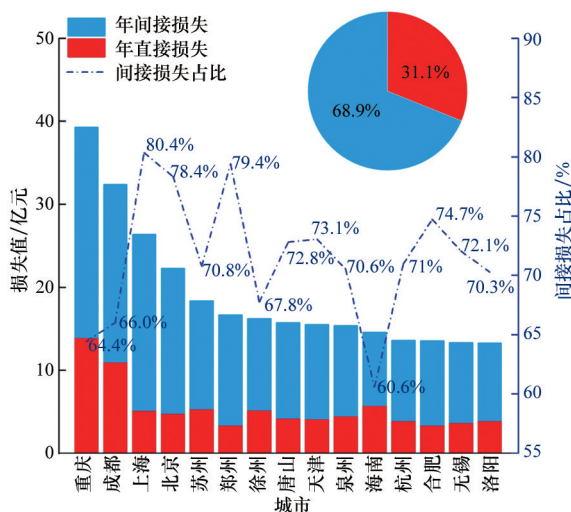


图1 总损失排名前15名城市的损失值与间接损失占比

总损失位于前2位的重庆与成都均位于西南地区。重庆是总损失最大的城市,年总损失为39.3亿元,占据了全国总损失的相当大比例。这主要归因于重庆作为西部地区的重要城市,在能源需求和产业结构上具有较高的复杂性和规模。与此同时,成都的总损失在城市中排名第2,年总损失为32.4亿元。成都在电子信息、机械制造和航空航天等领域具有显著的优势,其经济发展水平较高,对电力的需求量较大。与此同时,这2个城市也是遭遇电力中断时间较长的城市之一。

此外,华东地区的7个城市(如上海、苏州、徐州等)在总损失中占据重要位置。华东地区是中国经济最为发达的地区之一,拥有众多的制造业和服务业中心。这些城市的经济规模和能源消耗量庞大,因此电力中断对其经济活动的影响较为显著。例如,上海的主要行业汽车、石油及精细化工、钢铁等行业都是大型用电行业。苏州、徐州等城市同样是中国重要的工业城市。苏州位于中国江苏省东部,是长三角地区的重要城市之一。它以制造业为主导,尤其在电子信息、机械制造、纺织服装等领域

具有重要地位。苏州是中国重要的制造业基地之一,许多知名企业和跨国公司在这里设有工厂和研发中心。徐州位于中国江苏省中部,是苏北地区的重要城市和交通枢纽。徐州以重工业为主导,特别是在钢铁、煤炭、机械制造等领域具有较强的实力。作为重要的工业城市,其经济活动和就业机会对当地和周边地区的经济发展起到了积极推动作用。同时,它们也面临着电力供应可靠性的重要问题,因为任何电力中断都可能对其工业生产和经济运行造成严重影响。因此,提高电力供应的可靠性对于相关城市的可持续发展至关重要。

综上所述,电力中断对不同地区的经济造成的损失是异质的。重点关注重庆、成都和华东地区的城市可以有效应对电力中断对经济的冲击,以制定相应的可靠性策略和措施,进一步提高电力供应的可靠性,并减少经济损失的风险。

此外,根据图1展示的各城市间接损失占比数据,排名前15名城市的间接损失均高于直接损失,这说明电力中断引发的直接损失在供应链网络中广泛传播,产生了更大规模的高阶损失。全国范围内,间接损失占总损失比重为68.9%。在前15名城市中,上海、北京、苏州、郑州、唐山、天津、泉州、杭州、合肥、无锡和洛阳等11个城市的间接损失占比均高于全国平均水平。特别是上海,其间接损失占比最高,达到其总损失的80.37%。这可能是由于上海拥有较多的高新产业,并且作为长三角地区的重要交通枢纽,其产业关联度更高,处在供应链网络的核心地位,因此遭受的间接损失更为严重。然而,虽然重庆和成都的总损失位居前2位,其间接损失占比却低于全国平均水平,这说明电力中断对重庆和成都造成的直接损失较其他地区更为严重。具体而言,重庆的直接损失金额约为14.0亿元,而成都的直接损失金额约为11.0亿元,这2个城市的直接损失金额相当于第3名城市直接损失金额的2倍以上。这一结果进一步凸显了重庆和成都在电力中断事件中面临的严峻局面。

以上结果深入展示了电力中断对不同城市经济的影响差异,并为相关部门制定更有效的电力供应和应对策略提供了有益的指导。这些研究成果

对于减少经济损失、保障供应链网络的稳定运行具有重要意义。针对那些间接损失占比较高的城市,应重点加强供电可靠性的建设和改进,以减少高阶损失的扩散。这可以包括提升电力设备的可靠性和安全性,加强电力调度和管理能力,以及建立更加灵活的应急响应机制。同时,对于直接损失较大的城市,考虑增加备用电源容量,改进电力设施的维护和管理,以最大程度地减少直接损失的发生和影响。此外,加强与相关行业和企业的合作,建立紧密的信息沟通机制,可以提前预警和响应电力中断风险,降低对生产和供应链的不利影响。研究结果有助于提升全国范围内电力供应的可靠性,促进经济的可持续发展。相关部门和决策者可以基于这些发现,优化电力规划和资源配置,加大对关键城市和地区的电力基础设施建设和改善力度,从而提高整体供电可靠性,降低经济损失,并为经济增长和社会稳定创造更有利的环境。

表3展示了直接损失、间接损失以及总损失占GDP比重最大的前15个地区。直接损失较大的地区表明停电在这些地区造成的一阶损失较为显著,而间接损失较大则表明电力中断通过供应链向这些地区传播,带来了更高级别的影响。这些直接损失和间接损失排名靠前的城市都具有较高的经济

发展水平。值得注意的是,中国的4个直辖市——重庆、成都、上海和北京,在直接损失和间接损失方面都位居前列。这4个直辖市在政治、经济和交通等方面扮演着重要角色。将图1和表3对比可以看出,总损失和间接损失的地区排名顺序具有较高的一致性。这可能是因为这些城市中间接损失占比较高,介于60.6%~80.37%,因此间接损失在总损失中具有决定性的地位。而总损失占GDP比重较大的城市主要分布在西北部的经济欠发达地区,如新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、山西省和西藏自治区。这表明停电对这些地区的经济冲击较大,一旦面临停电危机,将更大程度地影响城市经济建设和居民生活。这些分析结果可以为相关部门制定更有效的电力供应和应对策略提供指导,以减少经济损失并确保供应链网络的稳定运行。

2.2 各区域电力供应可靠性的经济价值评估

在这项研究中,针对298个地区进行了情景分析,旨在研究各地电力供应可靠性的异质性和重要性。对于每个情景,选择一个地区,将其电力中断时间减少50%,然后记录在该情景下全社会间接损失的减少程度。通过分析这些结果,可以确定具有较大损失减少程度的地区,将其视为“重点地区”,确保这些地区的电力可靠性尤为重要。

表3 直接损失、间接损失以及总损失占GDP比重最大的前15个地区

直接损失 排名	地区	直接损失/ 亿元	间接损失 排名	地区	间接损失/ 亿元	占比 排名	地区	(总损失/ GDP)/%
1	重庆	14.0	1	重庆	25.3	1	克拉玛依	0.76
2	成都	11.0	2	成都	21.4	2	和田	0.53
3	苏州	5.4	3	上海	21.2	3	西藏	0.51
4	徐州	5.2	4	北京	17.5	4	阿克苏	0.48
5	上海	5.2	5	郑州	13.2	5	鹰潭	0.43
6	北京	4.8	6	苏州	13.0	6	兴安盟	0.42
7	泉州	4.5	7	唐山	11.5	7	巴音郭楞	0.41
8	沈阳	4.4	8	天津	11.3	8	百色	0.40
9	唐山	4.3	9	徐州	11.0	9	忻州	0.40
10	天津	4.2	10	泉州	10.9	10	朔州	0.39
11	长春	4.1	11	合肥	10.1	11	朝阳	0.38
12	大连	4.0	12	杭州	9.6	12	陇南	0.38
13	洛阳	4.0	13	无锡	9.6	13	赤峰	0.36
14	杭州	3.9	14	深圳	9.4	14	濮阳	0.36
15	温州	3.8	15	烟台	9.4	15	通辽	0.36

如图2所示,在298种提高电力供应可靠性的情景中,间接经济损失降低程度最大的15个地区依次为重庆、成都、徐州、泉州、洛阳、苏州、德州、菏泽、绍兴、北京、合肥、周口、郑州、安阳、许昌。这些地区主要分布在中国的中部地区,且拥有相对较大的人口数量。就经济发展水平而言,北京作为中国的首都和经济中心,具有较高的经济发展水平。同时,沿海城市如泉州、苏州和绍兴也具有较高的经济发展水平。西南地区的重庆和成都近年来也取得了快速的经济增长。所有情景中全国间接损失的降低幅度在4.39亿~19.63亿元,相对于基准情景下的间接损失,降低幅度为0.39%~1.76%。地区的间接损失降低排序体现了各地区电力安全的重要程度,对于排名靠前的地区,保障电力安全可以减少更大的间接损失。提高这些关键地区的电力供应稳定性对于降低国家间接经济风险至关重要,确保这些地区的电力安全可以大大削弱停电对供应链的负面影响。

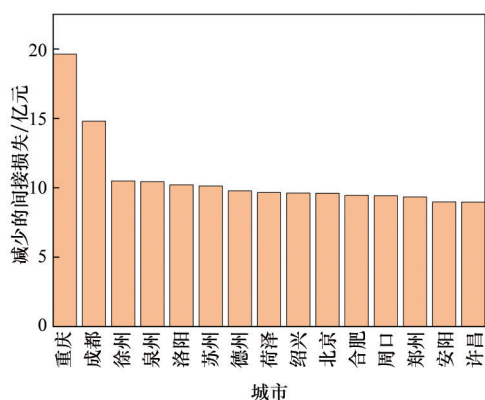


图2 减少间接损失最大的前15个地区

经过对重点地区进行深入分析,进一步展示了它们的重要特征。首先,这些地区的全社会用电量普遍较高,大多数属于全国总发电量排名前10的省份,因此被认定为电力供需的重点地区。其次,许多重点地区属于可再生能源高禀赋地区,在风电、水电、太阳能等可再生能源方面具有较高的发电量。这不仅有助于减少对传统能源的依赖,还促进了可持续能源的利用和环境保护。此外,这些地区在供应链网络中具有高点度中心性。中心性是衡量网络节点重要性的指标,而点度中心性是

其中一种度量方式。这意味着这些地区在供应链中具有更多的连接和交互,其稳定性和电力安全对整个网络的稳定运行起着至关重要的作用。最后,这些重点地区具有高电气化率,大多数重点城市所属省份为全国终端消费能源电气化程度排名前10的省份,电气化率达到了13.2%~25.7%。电气化率衡量了一个地区终端消费能源的电气化程度,这是现代化水平和发展水平的重要指标之一。这些地区在电力使用和能源利用方面较为先进,其电气化率高于全国平均水平,表明电力在其经济社会发展中的重要性及普及程度。

综上所述,重点地区在电力供需、可再生能源、供应链网络和电气化率等方面展现出显著的特征。深入研究这些特征有助于更好地了解电力安全的重要性,并为制定相应的政策和措施提供参考。

2.3 各部门电力供应可靠性的经济价值评估

本研究选取间接经济损失降低程度最大的前4种情景,分别提高重庆、成都、徐州和泉州的电力供应可靠性,对全国分部门的电力供应可靠性价值进行了评估。图3所示,当减少各地区50%电力中断时间时,大部分部门的间接损失值几乎均有所降低。这意味着提高电力供应可靠性可以显著减少各部门的经济损失。然而,在成都情景中,建筑部门的间接损失值却出现了不降反升的情况。这可能是因为建筑部门在产业链网络中受到负向上游效应的影响,导致订单增多,反而增加了其产值。

在4个城市不同情景中,间接损失减少值排名前3的部门存在一定差异。大多数情景中,排名前3的部门属于第三产业,包括批发和零售业、交通运输、仓储和邮政业以及金融业。这表明这些部门在供应链中的地位和作用较为重要,电力中断对它们的影响较为显著。在泉州情景中,排名前3的部门是批发和零售业、交通运输以及农林牧渔产品和服务业。这可能与泉州地区的产业结构和经济特点有关。在重庆情景中,批发和零售业的间接损失减少值最大,超过2.5亿元,也是4种情景中间接损失减少值最大的部门,其他情景中间接损失减少值最大的部门的间接损失减少值均未超过2亿元。

此外,最少的3个间接损失减少值部门主要集

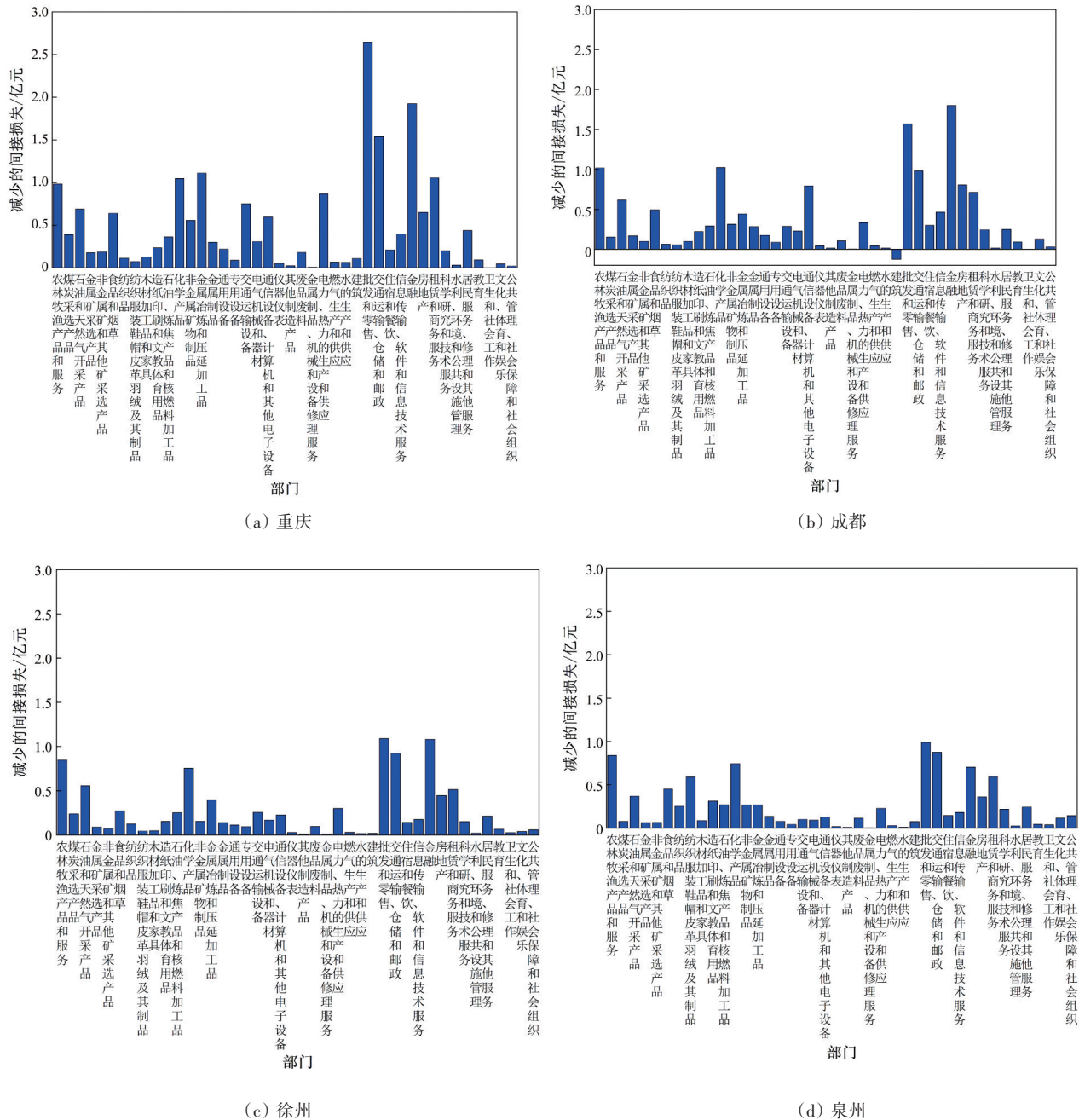


图3 减少50%电力中断时间间接损失减少幅度最大的4个地区所减少的间接损失在各部门之间的分布

中在卫生和社会工作业、其他制造产品业、金属制品、机械和设备修理服务业以及水的生产和供应业。这些部门在电力中断的情况下受到的影响较小,可能由于其生产过程对电力需求较低,或者存在其他替代方案来维持其业务运转。此外,这些部门的间接损失减少值较小可能与经济体量较小有关。经济体量的大小通常反映了一个地区的产业

规模 and 经济发展水平。较小的经济体量意味着该部门的产业活动和经济规模相对较小,因此电力中断对其经济的影响相对较小。

综上所述,通过评估不同部门中的间接损失减少值,可以更全面地了解各部门对电力供应可靠性的依赖程度和经济影响。这有助于政府和相关利益方在制定电力规划和应对电力中断的措施时,更加

关注对经济影响较大的部门,以确保其电力供应的可靠性,从而减少间接损失并促进经济的稳定发展。

图4展示了4个城市中,间接损失及减少的间接损失在三产间的分布。其中上排饼图代表了间接损失在三产间的分布,下排饼图表示减少的间接

损失在三产间的分布。从图4可以观察到,在这4种情景下,间接损失值在三大产业中的分布相对接近。第二产业、第三产业和第一产业分别占据大致12%、45%和43%的比例,与基准情景下间接损失在三产业间的分布相比较为一致。

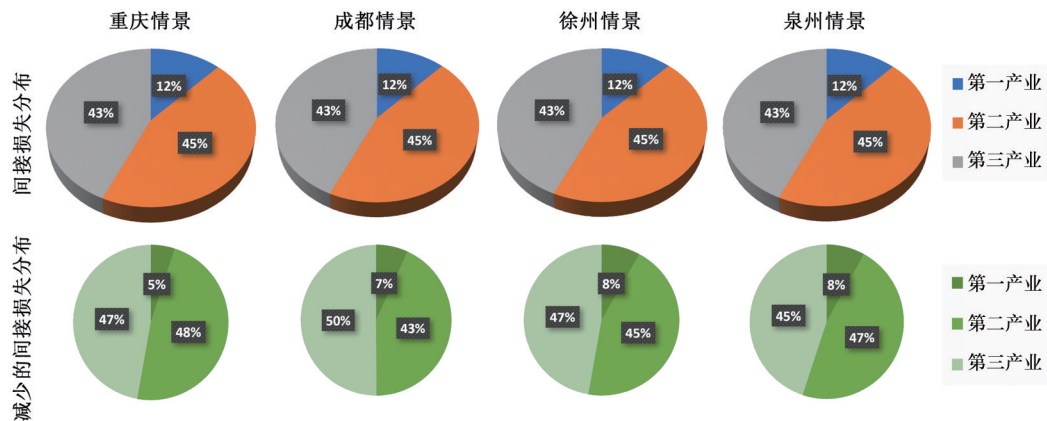


图4 间接损失减少幅度最大的4个地区的间接损失和减少的间接损失在三产之间的分布

在减少50%电力中断时间后,这4种情景的间接损失减少值主要集中在第二产业和第三产业。第三产业的间接损失减少值占比分别在45%~50%,第二产业的间接损失减少值占比分布在43%~48%,第一产业的间接损失减少值占比分布在5%~10%。在重庆和泉州情景中,第三产业的间接损失减少值占比均超过了第二产业,尤其是重庆情景的第三产业间接损失减少值占比最高,达到了48%。而在成都情景和徐州情景中,第二产业间接损失减少值占比最高,成都情景中第二产业间接损失减少值占比高达50%。

这些结果表明,提高电力供应可靠性对减少间接经济损失具有重要作用。不同城市和情景下,不同产业的受益程度存在一定差异,但总体而言,第二产业和第三产业是受益最大的部门。这些研究结果为进一步改善电力供应可靠性、优化产业结构和制定相关政策提供了重要的参考依据。通过深入了解各种情景下不同产业的间接损失减少值分布,可以帮助决策者更准确地把握各产业对电力供应可靠性的依赖程度,从而优化资源配置、加强电力供应保障,并制定针对性的政策和措施。此外,这些研究结果还为促进产业结构升级、推动可持续

发展提供了参考,鼓励发展具有较低能耗和环境友好特性的产业,以降低对电力的依赖性,提高整体经济的韧性和可持续性。

3 结论与政策建议

3.1 结论

本研究利用基于适应性主体的环境经济动态模型,模拟了中国电力中断对供应链网络的影响,并设计了提高电力供应可靠性的情景。研究结果致力于探究不同地区和部门在面对停电冲击时的经济影响的区域异质性。

1) 中国因停电所导致的间接损失远大于直接损失。这一结论与先前基于主体动态网络模型的研究结论一致,比如 Shughrue 等^[23]研究表明在研究范围内规模最大的风暴会带来显著的负面间接损失,是直接损失的3倍。Otto 等^[26]发现,在灾难的前4 d内,间接损失是直接损失的1.6倍。此外,Henri et^[23]研究认为灾害相关的产出损失取决于直接损失的异质性和经济网络结构;Willner 等^[29]认为,地区所遭受的损失取决于该地区在供应链网络中的位置。这些结论与本研究通过模型得出的研究

结论一致。本模型根据以往提出的基于主体的动态网络模型进行创新并完善了主体的微观机制。其具有高时空分辨率,可模拟停电发生后经济系统的逐日演化。通过捕捉不同地区多次小规模停电对系统的整体冲击,在新型高比例可再生电力系统的背景下具有很强的实用价值。

2) 本研究对中国各地区受停电影响的经济损失异质性和区域特征进行了分析,识别了这些区域在电力供需关系、可再生能源比例、供应链网络中心性和电气化率等方面的重要特征。其中,研究确定了15个电力供应可靠性的重点保障地区,并提出了相应的提升供电可靠性建议,为相关部门决策者提供了优化电力系统建设的理论基础。提高这些地区的电力供应可靠性能够大幅减少全国范围内的间接损失。

3) 本研究对中国各部门受停电影响的经济损失异质性和部门特征进行了分析,发现不同情景下间接损失值在三大产业中的占比大致相似,约为12%、45%和43%。减少地区停电时间后,间接损失减少值主要集中在第二产业和第三产业,而第一产业减少的损失仅占5%~10%,这说明了保障电力可靠性对第二和第三产业的重要性更为突出。

然而,本研究仍存在一些局限性:(1) 初始模型中主体之间每一天的贸易网络关系是从年度投入产出表中拆分得到的。尽管这种分配方法可能与真实情况存在差异,但出于数据可获性的考量,这是目前能够获取的最新科学替代数据。(2) 由于生产端的停电数据不可得,模型中生产端的停电数据是由消费者端的停电数据计算转换的。但由于电力的特殊性,电力在发电时就被用尽,因此本研究结果仍具有实际意义。(3) 本研究设置了298种电力可靠性情景以评估停电对中国不同地区和部门影响的异质性,评估了提高电力供应可靠性的经济价值。但本研究没有考虑提高电力供应可靠性的成本,因此未来研究需要进一步研究停电率和维护电力安全成本之间的关系,为相关决策部门提供更科学的指导建议。

3.2 政策建议

本研究的结论可以为确定电力供应可靠性管

控重点地区提供指导,并为电力安全政策的干预措施提供科学依据。本模型可用于识别任何数据可得时期的电力供应可靠性重点保障地区和部门。根据研究结果,不同地区的损失异质性与直接损失和供应链网络结构密切相关。因此,相关政策建议将围绕“减少电力中断直接损失”和“改善供应链网络结构”2个方面展开。

首先,在减少电力中断直接损失方面,具体的政策建议包括以下方面。

1) 基础设施投资:电力供应可靠性对于经济发展至关重要。因此,政府和相关利益方应该考虑增加基础设施投资,包括电网升级、扩容和改造,以确保这些地区的电力需求得到满足。这将有助于提高供电能力和可靠性,降低电力中断的风险,并促进更加可持续和高效的能源利用。

2) 能源多样化:在能源供应方面应该积极推进能源多样化。过度依赖某一种能源可能使各地区在能源供应受限或发生意外情况时更加脆弱。通过促进可再生能源的开发和利用,以及探索其他清洁能源的潜力,可以减少对传统能源的依赖,提高能源供应的弹性和可持续性。相关研究成果也为碳中和背景下煤电退出路径的讨论提供了新视角。

3) 技术创新:引入新的技术和创新解决方案是提高电力供应可靠性的关键。例如,智能电网技术可以实现对电力系统的实时监测和管理,提高故障检测和响应的效率。同时,储能技术的应用可以平衡电力供需之间的波动,提供备用电源以应对突发情况。在重点地区,应该鼓励和支持技术创新,以推动电力系统的现代化和可靠性的提升。

4) 应急响应和灾害管理:建立健全的应急响应和灾害管理机制,以应对电力中断和其他突发事件。这包括制定全面的应急预案、加强设备的维护和检修,以及提供备用电源等关键措施。及时有效的应急响应措施能够降低电力中断所造成的损失,并确保电力供应在紧急情况下能够快速恢复正常。

其次,建议改善供应链网络结构,其中包括了以电力为产品的电网结构。这能够增加主体之间的连接,增强供应链网络韧性。在遭受外界冲击时,可以增大主体适应性行为的效率。

1) 电力系统跨区域合作: 由于电力供应是一个跨区域的复杂系统, 跨地区合作和协调对于提高电力供应可靠性至关重要。可以在重点地区加强与邻近地区的合作, 共享电力资源和互联互通的能力。这样可以通过多地区间的电力交流和供应互助来减少电力中断的风险, 提高整个区域的电力供应可靠性。同时, 促进相关地区和电网之间的电力交易市场建设以及改善区域间的电力传输网络也是必要的措施。这些举措将促进地区之间的协作和资源共享, 增强整个电力系统的韧性和稳定性, 从而有效降低电力中断风险并提高电力供应的可靠性。

2) 加强供应链风险管理: 在供应链网络结构优化的基础上, 还需要加强供应链风险管理, 以应对各种不确定性因素的影响。可以通过建立风险管理机制、加强供应链信息共享等方式来加强供应链风险管理。此外, 建议建立供应链的备份机制和多元化供应链网络, 以减轻因某一环节发生故障而对整个系统造成的冲击。随着大数据化进程推进, 数字化技术的应用可以更好地管理供应链, 提高供应链的效率和可靠性。通过建立数字化供应链平台、推广供应链区块链技术等方式来推动供应链数字化转型。

在推进以上政策措施的过程中, 还需要权衡维护电力安全所需的额外成本和减少停电带来的经济效益(即供电可靠性的经济价值)。政策制定者应该平衡投入和产出, 确保政策在经济可行性和有效性方面取得平衡。应考虑地区异质性、部门差异、经济效益和长期规划, 以确保制定的政策在经济上可行、具有可持续性并满足不同地区和部门的需求。特别是在推动可再生能源发展的背景下, 需要更加全面地考虑可再生能源的特点和局限性, 以确保新型电力系统的稳定性和可靠性。

参考文献(References)

- [1] 汤广福, 周静, 庞辉, 等. 能源安全格局下新型电力系统发展战略框架[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 79-88.
- [2] 饶宏, 韩丰, 陈政, 等. 我国电力安全供应保障策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 100-110.
- [3] Ovaere M, Heylen E, Proost S, et al. How detailed value of lost load data impact power system reliability decisions[J]. Energy Policy, 2019, 132: 1064-1075.
- [4] 许丹, 刘恺, 丁强, 等. 电力市场中备用容量需求评估研究——基于均衡分析制定备用机组的竞价策略[J]. 价格理论与实践, 2022(7): 175-179.
- [5] 朱继忠, 喻芸, 谢平平, 等. 美国稀缺定价机制及对我国现货市场建设的启示[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 37-43, 75.
- [6] 黄姗姗, 叶泽, 罗迈, 等. 中国电力中长期市场分段交易价格形成机制及模型[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 17-27.
- [7] Lavin L, Murphy S, Sergi B, et al. Dynamic operating reserve procurement improves scarcity pricing in PJM[J]. Energy Policy, 2020, 147(12): 111857.
- [8] 陈启鑫, 吕睿可, 郭鸿业, 等. 面向需求响应的电力用户行为建模: 研究现状与应用[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 23-37.
- [9] Gorman W. The quest to quantify the value of lost load: A critical review of the economics of power outages[J]. The Electricity Journal, 2022, 35(8): 107187.
- [10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会令. 《电力可靠性管理办法(暂行)》[EB/OL]. (2022-04-16)[2023-11-18]. www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/25/content_5687101.htm.
- [11] de Nooij M, Koopmans C, Bijvoet C. The value of supply security: The costs of power interruptions: Economic input for damage reduction and investment in networks[J]. Energy Economics, 2007, 29(2): 277-295.
- [12] Broberg T, Persson L. Is our everyday comfort for sale? Preferences for demand management on the electricity market[J]. Energy Economics, 2016, 54(2): 24-32.
- [13] Leahy E, Tol R S J. An estimate of the value of lost load for Ireland[J]. Energy Policy, 2011, 39(3): 1514-1520.
- [14] Wing I S, Rose A Z. Economic consequence analysis of electric power infrastructure disruptions: General equilibrium approaches[J]. Energy Economics, 2020, 89(3): 104756.
- [15] Baik S, Hanus N L, Sanstad A H, et al. A hybrid approach to estimating the economic value of enhanced power system resilience[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2021.
- [16] 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 基于投入-产出法的电力失负荷价值研究[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 44-49.
- [17] 谭显东, 胡兆光. 基于投入产出法的电力失负荷价值

- 研究拓展[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 51-55.
- [18] He P J, Ng T S, Su B. Energy-economic recovery resilience with Input-Output linear programming models[J]. *Energy Economics*, 2017, 68: 177-191.
- [19] Chen H, Yan H B, Gong K, et al. Assessing the business interruption costs from power outages in China[J]. *Energy Economics*, 2022, 105: 105757.
- [20] Poudineh R, Jamasb T. Electricity supply interruptions: Sectoral interdependencies and the cost of energy not served for the Scottish economy[J]. *The Energy Journal*, 2017, 38(1): 51-76.
- [21] Akpeji K O, Olasoji A O, Gaunt C T, et al. Economic impact of electricity supply interruptions in South Africa [J]. *SAIEE Africa Research Journal*, 2020, 111(2): 73-87.
- [22] Henriot F, Hallegatte S, Tabourier L. Firm-network characteristics and economic robustness to natural disasters [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2012, 36 (1): 150-167.
- [23] Shughrue C, Werner B T, Seto K C. Global spread of local cyclone damages through urban trade networks[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(8): 606-613.
- [24] Wenz L, Levermann A. Enhanced economic connectivity to foster heat stress-related losses[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1501026.
- [25] 曲申, 林瑾, 王永豪, 等. 电力部门省际虚拟水流动模式与影响分析[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2023, 25(2): 45-56.
- [26] Otto C, Willner S N, Wenz L, et al. Modeling loss-propagation in the global supply network: The dynamic agent-based model acclimate[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2017, 83: 232-269.
- [27] Hallegatte S, Ranger N, Mestre O, et al. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen[J]. *Climatic Change*, 2011, 104(1): 113-137.
- [28] 曲申, 陈炜明, 刘丽静, 等. 后疫情重建阶段的碳排放趋势与减排策略研究[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(3): 8-18.
- [29] Willner S N, Otto C, Levermann A, et al. Global economic response to river floods[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(7): 594-598.

Economic assessment of China's power supply reliability

QU Shen^{1,2}, WANG Qianzi^{1,2}, LIN Jin^{1,2}, ZHANG Jiaqi^{1,2}, BEN Yawen^{1,2}, ZHOU Qi^{1,2*}

1. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In the context of maintaining energy security and implementing low-carbon development, ensuring the power system reliability is becoming increasingly challenging. The interdependence between power industry and other sectors within the supply chain network exposes the entire economy to unpredictable higher-order economic impact resulting from power interruption. To explore the heterogeneous regional effects by improving power supply reliability in mitigating national economic losses, this study employs an agent-based complex network supply chain model to conduct an economic assessment of power supply reliability in China. Using a top-down approach, the study estimates the direct economic losses of production activities due to power interruption in China in 2018 and incorporates them as external shocks in the complex network model to simulate the higher-order indirect economic losses caused by power disruption in the supply chain network on a daily basis. By setting up 298 scenarios that reduce power outage duration in each region one by one, the study identifies 15 key regions for safeguarding power supply reliability. Enhancing the power supply reliability in these areas can result in an average reduction of indirect economic losses ranging from CNY 439 million to CNY 1.96 billion nationwide, representing a decrease of 0.39% to 1.76% compared to the baseline scenario. The findings of this research may provide guidance for relevant departments in identifying priority areas, assessing the value of power supply reliability, considering additional costs for power security maintenance, and formulating policy implications for the development of power security construction in different regions.

Keywords power outage; reliability of power supply; agent-based model; complex network ●



(责任编辑 徐丽娇)