

基于投入产出模型的停电事故对区域经济的影响

于群¹,马艳子¹,曹娜¹,何剑²,孙为民²

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院,山东青岛266590;2. 中国电力科学研究院有限公司,北京100192)

摘要:当今社会生产高度依赖电力的发展,停电事故会造成严重的经济损失。为有效评估停电对区域各产业部门造成的经济影响,从细分行业角度出发,提出了考虑行业用电特性以及产业关联影响的停电事故经济损失评估方法。采用表征行业用电特性的产电比法评估停电直接经济损失。由于停电事故的间接经济损失涉及到各产业部门之间的供需关系,采用反映行业间依赖关系的投入产出模型评估停电间接经济损失。以2014年石河子“7·09”停电事故和2008年温州“7·28”停电事故为例进行评估计算,验证了所提方法的可行性与合理性,并根据两地区域经济发展水平和产业分布结构的差异性,对比分析停电事故经济损失分布特性。评估结果表明,所建模型能有效评估不同区域停电事故经济损失,其经济损失分布与地区产业结构分布及投入产出结构密切相关。

关键词:停电事故;产电比;投入产出模型;经济损失

中图分类号:TM73

文献标志码:A

Impact of power outages on regional economy based on input-output model

YU Qun¹, MA Yanzi¹, CAO Na¹, HE Jian², SUN Weimin²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In contemporary society, production is highly dependent on the development of electricity and power outages may cause serious economic losses. In order to effectively evaluate the economic impact of power outages on various industrial sectors in the power outage areas, this paper proposed a power outage economic loss evaluation method from the perspective of segmented industries, taking into account the characteristics of industry electricity consumption and the impact of industry correlation. The electricity generation ratio method that characterizes the electricity consumption characteristics of the industry was used to evaluate the direct economic losses caused by power outages. Because the indirect economic losses caused by power outages involved the supply-demand relationship between various industrial sectors, an input-output model reflecting the interdependence between industries was adopted to evaluate the indirect economic losses caused by power outages. The feasibility and rationality of the proposed method were evaluated and calculated by taking the “7·09” power outage in Shihezi in 2014 and the “7·28” power outage in Wenzhou in 2008 as examples. The distribution characteristics of economic losses caused by power outages were compared and analyzed in accordance with the differences in regional economic development level and industrial distribution structure between the two regions. The evaluation results indicate that the constructed model can effectively evaluate the economic losses caused by power outages in different areas and the distribution of economic losses is closely related to the regional industrial distribution structure and input-output structure.

Key words: power outage accident; electricity production ratio; input-output model; economic loss

收稿日期:2023-07-12

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5100-202155482A-0-5-ZN)

作者简介:于群(1970—),男,山东淄博人,教授,博士生导师,主要从事电力系统安全分析和电力系统继电保护的研究。

E-mail:yuqun_70@163.com

马艳子(1999—),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事电力系统安全分析与停电经济影响分析的研究,本文通信作者。E-mail:myzz139459177@163.com

随着我国社会经济和科技的快速发展,社会生产对电力的依赖程度不断加深,电力能源逐渐成为影响社会经济发展的重要因素。虽然近年来电力系统安全稳定性不断提高,但诱发停电事故的风险因素日益增多,电网停电风险依然存在^[1]。突发停电事故往往会对社会造成难以预料的损失,例如2003年美国、加拿大“8.14”大停电事故,造成的经济损失每天多达300亿美元^[2]。因此及时有效地评估停电事故对社会经济造成的影响,可以为制定停电事故预防策略以及未来电网规划提供参考依据,具有十分重要的意义。

目前对电网停电事故的研究多集中在电网故障诊断及风险评估等方面,而在停电事故对经济影响方面的研究相对较少。停电的经济影响包括直接影响和间接影响,直接影响是指停电直接影响电力用户的生产,造成停减产损失,间接影响是由直接经济损失引起的后续影响。现有文献以分析评估停电事故的直接经济损失为主,提出了相应的评估方法,例如产电比法^[3]、构造函数法^[4]等。文献[4]参考其他地区停电损失函数,根据所研究地区的电力平均效益评估计算用户短期停电经济损失。文献[5]通过用户调查法获取经济损失数据,用Tobit模型对数据进行筛选,从而建立能够客观评估各类负荷停电损失的评估模型。以上研究均从直观角度评估停电事故的直接经济影响,未考虑停电事故的间接经济影响。目前对停电事故间接经济影响的研究极少,缺乏对停电事故经济影响的系统性评估。

文献[6]建立了电力用户停电影响指标体系,综合评估停电损失,其中采用产电比法计算直接经济损失,引入国民经济产业影响力系数和感应力系数计算间接经济损失,未考虑停电区域产业结构差异的影响因素。区域产业结构复杂,各产业间存在多种内在联系。投入产出模型中蕴含了丰富的行业结构和经济结构信息,可以量化产业间的关联关系,常被用于评估灾害的间接经济损失,例如评估暴雨洪涝^[7]、地震^[8]等自然灾害的间接经济损失。停电事故的间接经济影响过程与其类似,投入产出模型同样适用于评估停电事故的间接经济损失。

综上所述,本研究以产业部门为评估对象,提出一套全面评估停电事故经济损失的计算方法,分析停电事故对各个产业部门的直接和间接经济影响,并以2014年石河子“7·09”停电事故和2008年温州“7·28”停电事故为例进行评估计算,通过对比两起事故的评估结果分析停电事故对不同经济水平地区造成的经济影响。

1 停电事故经济损失评估框架设计

停电事故损失与区域经济结构是表征区域停电事故的两大基础特征。停电事故会造成用户电量缺损、产业用户生产受阻、产品供给不足等一系列影响,本研究将停电事故直接影响产业生产造成的停减产损失作为停电直接经济损失。产电比是衡量各产业单位电能经济效益的重要指标,首先根据当地经济结构特征计算产业产电比,然后结合停电损失电量即可有效量化停电直接经济损失。产业部门间存在广泛、复杂、密切的技术经济联系,称为产业关联,根据供给和需求关系可划分为前向关联和后向关联^[9]。前向关联是指主导产业在进行生产之前,为其提供原料、燃料和生产设备等而产生的部门关联。后向关联是指主导产业在进行生产之后,其产品是许多产业的原料、燃料或生产设备,或直接进入消费部门而产生的部门关联。本研究根据产业后向关联评估经济损失,将各生产部门间协调关系破坏导致的产业关联损失作为停电间接经济损失。根据地区投入产出表建立完全消耗系数下的投入产出模型,推导停电间接经济损失系数,即可计算停电间接经济损失。

2 停电事故直接经济损失评估

停电事故会对不同类型、不同用电特性的用户造成不同影响,例如工业用户受停电影响可能会导致生产损失、产生次品、材料报废等;商业用户停电可能导致库存产品损坏、销售减少、电脑重要信息丢失等。考虑到不同产业类型的生产效益以及用电情况,本研究采用产电比来衡量不同产业部门的电能经济效益。产电比描述了某一地区单位电能创造的经济效益,是对电能货币价值的一种社会度量^[3]。

假设某一地区共有 n 个产业部门,则其第 i 个产业部门的产电比 B_i 为该部门消耗单位电量时产生的经济效益,即:

$$B_i = G_i / E_i \quad (1)$$

式中: G_i 为 i 产业部门的年生产总值,元; E_i 为 i 产业部门的年总用电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

停电事故对第 i 产业部门造成的直接经济损失 Z_i (单位元)为:

$$Z_i = B_i \times D_i \quad (2)$$

式中: D_i 表示 i 部门的停电损失电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3 停电事故间接经济损失评估

停电事故间接经济损失的评估较复杂,受区域产业结构以及产业关联的影响,采用投入产出模型能明确这种关联关系,实现对间接经济损失的量化评估。

3.1 投入产出模型介绍及基本假设

投入产出模型最早由美国经济学家 Leontief 于 1936 年提出^[10],主要是通过编制投入产出表和以数学模型的方式来体现区域产业生产关联关系,并研究不同区域生产能力的差异性,因此被广泛应用于灾害损失的间接损失研究中。采用投入产出模型评估停电间接经济损失时,为确保投入产出模型函数形式的唯一性,需要做以下基本假设。

- 1) 短期内宏观经济系统中各产业部门关联关系保持不变,停电事故不会导致产业结构改变;
- 2) 每个产业部门按照各自的产业结构和生产流程进行单一生产;
- 3) 产业部门的生产不受外部政策和经济因素的制约;
- 4) 各产业部门之间的投入与产出呈正相关关系。

3.2 构建投入产出模型

投入产出表是构建投入产出模型的基础,根据计量单位的不同可分为价值表和实物表。表 1 为简化后的投入产出表,表中的数据需要同时满足行向(需求方向)和列向(投入方向)的均衡关系^[11];在行向上各部门的总需求等于中间产出加上最终产出,在列向上各部门的总

表 1 价值型投入产出表

Table 1 Value-based input-output table

投入	中间产出				最终产出	总产出	
	部门 1	部门 2	...	部门 n			
部门 1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	X_1	W_1	
中间投入	部门 2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	X_2	W_2
	
	部门 n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nn}	X_n	W_n
增加值	N_1	N_2	...	N_n	—	—	
总供给	W_1	W_2	...	W_n	—	—	

供给等于部门中间投入加上增加值,同时各部门的总供给与总需求保持一种均衡关系。

根据投入产出表中行向平衡关系可建立投入产出模型平衡关系式:

$$\begin{cases} a_{11}W_1 + a_{12}W_2 + \dots + a_{1n}W_n + X_1 = W_1, \\ a_{21}W_1 + a_{22}W_2 + \dots + a_{2n}W_n + X_2 = W_2, \\ \vdots \\ a_{n1}W_1 + a_{n2}W_2 + \dots + a_{nn}W_n + X_n = W_n. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_{ij} = x_{ij} / W_j$ 为直接消耗系数, x_{ij} 为中间需求, W_j 表示第 j 产业部门总产出(总需求); X_i 为第 i 部门最终需求。式(3)的矩阵形式为:

$$\mathbf{AW} + \mathbf{X} = \mathbf{W} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$ 为直接消耗系数矩阵, \mathbf{W} 表示各产业部门总产出列向量, \mathbf{X} 表示各产业部门最终需求列向量。将式(4)变形可得:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{X} \quad (5)$$

式中: $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 称为 Leontief 逆矩阵^[11], \mathbf{I} 为单位矩阵。

实际上各个部门之间的联系除了直接的消耗与被消耗的关系外,还有间接的消耗与被消耗关系。一种

产品对另一种产品的直接消耗量与全部间接消耗量之和称为完全消耗量^[11]。为全面评估停电间接经济损失,还需同时考虑各产业间的间接消耗。

3.3 完全消耗水平下停电间接经济损失评估模型

完全消耗系数反映了国民经济部门之间的直接和间接技术经济联系,通过线性关系将国民经济各部门的总产出与最终使用联系在一起。从完全消耗的角度出发,直接消耗系数 A 与完全消耗系数 B 之间有以下对应关系:

$$B = (I - A)^{-1} - I. \tag{6}$$

由此总产品的损失可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta W_1 \\ \Delta W_2 \\ \vdots \\ \Delta W_i \\ \vdots \\ \Delta W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1i} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2i} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ii} & \cdots & b_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{ni} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_i \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_i \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix}. \tag{7}$$

式中: ΔW_i 为 i 部门总产出变化量, ΔX_i 为 i 部门最终需求变化量。

假设其他部门最终产出保持不变,即 $\Delta X_j = 0 (j \neq i)$,由于部门 i 的产出有了变化,与之相关联的其他产业部门对部门 i 的使用减少,导致各部门的总需求发生改变,各部门的变化量计算如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta W_1 \\ \Delta W_2 \\ \vdots \\ \Delta W_i \\ \vdots \\ \Delta W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1i} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2i} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ii} & \cdots & b_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{ni} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \Delta X_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \Delta X_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

式中: $b_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示完全消耗系数, ΔX_i 则表示部门 i 因停电造成的直接经济损失, $\Delta W_j (j \neq i)$ 则表示部门 j 受部门 i 直接经济损失影响而产生的间接经济损失。不同区域的产业消费结构不一致,完全消耗系数各异,因此停电经济损失传导也呈现出不同结果。

由式(8)可推得:

$$\begin{cases} \Delta W_1 = b_{1i} \Delta X_i, \\ \Delta W_2 = b_{2i} \Delta X_i, \\ \vdots \\ \Delta W_i = (b_{ii} + 1) \Delta X_i, \\ \vdots \\ \Delta W_n = b_{ni} \Delta X_i. \end{cases} \tag{9}$$

由式(9)可推得第 j 产业部门因部门 i 的损失而产生的间接经济损失计算式为:

$$\Delta W_j = \frac{\Delta W_i \cdot b_{ji}}{b_{ii} + 1}, j \neq i. \tag{10}$$

将部门 i 对各关联产业部门造成的间接经济损失 ΔW_j 求和,即为部门 i 因停电事故产生的间接经济损失,记为 J_i :

$$J_i = \sum_{j=1}^n \Delta W_j = K_i \cdot \Delta W_i, j \neq i. \tag{11}$$

式中: $K_i = \sum_{j=1}^n [b_{ji} / (b_{ii} + 1)]$, $j \neq i$, K_i 为第 i 产业部门的间接经济损失系数,由产业完全消耗系数矩阵而得,表示停电事故直接经济损失与间接经济损失之间的关系,反映某个部门损失一个单位的最终产品对其他

关联部门所产生的影响。不同区域投入产出结构不一样,各产业停电损失影响程度自然也不一样,而间接经济损失系数恰好可以充分体现这一差异,表征各行业停电间接经济损失影响。

4 实例分析

4.1 停电事故数据

为验证本研究模型的可行性,研究停电事故对不同区域产业结构产生的经济影响,选取 2014 年石河子“7·09”停电事故和 2008 年温州“7·28”停电事故进行评估分析。2014 年 7 月 9 日 12 时 8 分,石河子电网发生大面积停电事故,石河子电网与新疆主网解列,损失负荷 224.1 万 kW,损失电量约为 521.5 万 kW·h^[12]。2008 年 7 月 28 日,受第 8 号超强台风“凤凰”的影响,浙江温州电力局 3 条 500 kV 线路(瓯南 5469 线、瓯雁 5470 线、塘海 5472 线)跳闸 3 次,3 条 220 kV 线路(雁玉 4377 线、南海 4367 线、海场 4357 线)跳闸 3 次,8 条 110 kV 线路跳闸 8 次,5 条 35 kV 线路跳闸 5 次,230 条 10 kV 线路跳闸;4 座 110 kV 变电所、4 座 35 kV 变电所全部停电,事故造成负荷损失 24 万 kW,损失电量 140 万 kW·h^[13]。

4.2 停电直接经济损失计算

计算停电直接经济损失,首先需要统计当地不同行业的年总用电量和年生产总值^[14-15],利用式(1)计算出各行业的产电比,然后统计出各行业的损失电量进行评估计算。鉴于缺乏各行业损失电量统计数据,本研究将两起停电事故分别按照事故发生当年该地区各行业用电量所占比重进行加权分配,最终结合各行业产电比计算停电直接经济损失,如表 2 所示。

表 2 停电区域各行业部门直接经济损失

Table 2 Direct economic losses of various industrial sectors in power outage areas

产业部门	编号	产电比/(元/(kW·h))		损失电量/(kW·h)		直接经济损失/元	
		石河子市	温州市	石河子市	温州市	石河子市	温州市
农业	1	18.18	108.87	12 414.03	4 544.27	225 709.19	494 752.99
工业	2	0.48	6.70	5 180 639.75	1 126 622.52	2 500 482.22	7 551 306.33
建筑业	3	435.64	41.42	1 773.43	18 133.85	772 569.28	751 098.02
交通运输业	4	76.93	45.96	2 438.47	10 022.81	187 591.48	460 685.50
信息业	5	274.48	93.67	445.85	5 815.99	122 377.93	544 757.38
批发和零售业	6	52.65	27.70	4 073.41	58 182.51	214 481.15	1 611 495.94
住宿和餐饮业	7	25.94	6.11	3 463.68	49 473.36	89 850.96	302 349.05
金融业	8	1 179.56	295.48	278.91	3 638.38	328 996.12	1 075 061.87
房地产业	9	120.16	26.91	2 208.47	28 808.97	265 376.44	775 164.65
租赁服务业	10	85.84	14.33	973.31	12 696.60	83 546.41	181 951.42
科学研究和技术服务业	11	132.71	21.24	421.46	5 497.90	55 931.84	116 784.42
公共设施管理业	12	54.89	2.89	953.38	12 436.57	52 331.78	36 003.15
其他服务业	13	81.50	22.43	911.58	11 891.36	74 297.96	266 733.03
教育	14	412.49	80.12	532.60	6 947.71	219 692.82	556 629.38
卫生和社会工作	15	116.59	17.38	1 268.15	16 542.74	147 848.85	287 444.52
文化、体育和娱乐业	16	53.15	10.99	483.84	6 311.52	25 714.77	69 360.91
社会保障	17	152.60	24.97	1 719.69	22 432.93	262 430.33	560 242.60

4.3 停电间接经济损失计算

为建立投入产出模型,本研究分别选取距离停电事故时间最近年份 2012 年新疆投入产出表^[16]和 2007 年浙江省投入产出表^[17],考虑到数据量的大小问题,本研究参考国民经济统计产业类型分类^[18],将地区投入产出表的 42 个部门合并为 17 个部门进行计算。

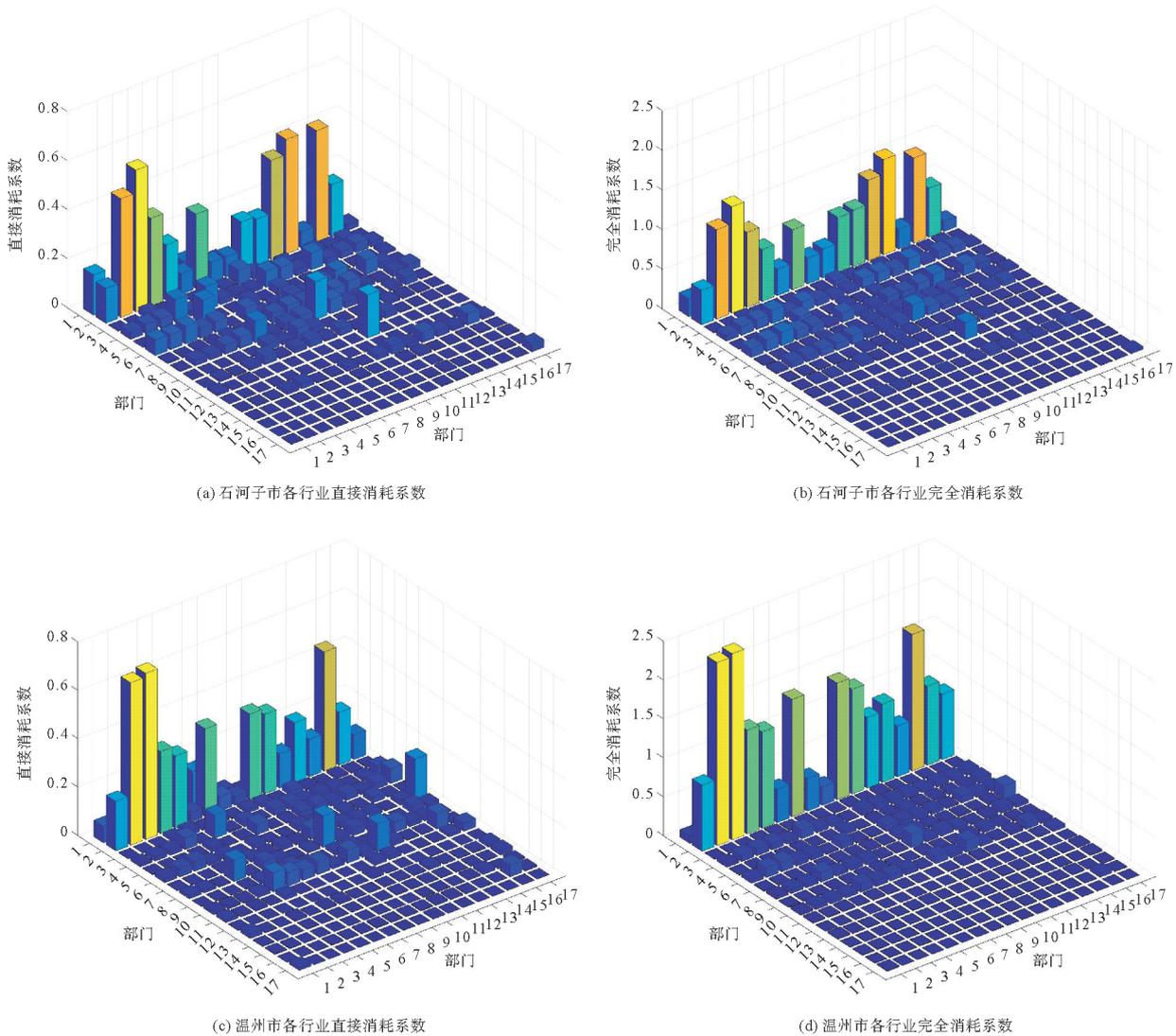


图 1 各行业部门直接消耗系数和完全消耗系数三维图

Fig. 1 Three dimensional diagram of direct consumption coefficient and complete consumption coefficient for various industrial sectors

图 1(a)和图 1(c)分别为石河子市和温州市各行业生产单位产品时,对其他行业产品或服务的直接消耗情况,可以看出两市各行业对工业产品或服务的消耗均较高,其中石河子市的工业、建筑业和其他服务业对工业产品或服务的消耗最高,温州市的工业、建筑业、卫生和社会工作对工业产品或服务的消耗最高。图 1(b)和图 1(d)分别为石河子市、温州市各行业之间的完全消耗情况,可以看出两市各行业对工业产品和服务的完全消耗量均远高于对其他行业的消耗。相较于其他行业,工业与各行业的联系更为紧密。

结合完全消耗系数矩阵,由投入产出模型计算出各行业的停电间接经济损失系数如表 3 所示,在此基础上由各行业的直接经济损失乘以各自的间接经济损失系数,即可计算出各行业停电间接经济损失。

4.4 评估结果分析

根据完全消耗系数核算各行业部门的停电间接经济损失如图 2 所示,当产业部门间接经济损失系数 $K > 1$ 时,例如图 2(a)中的部门 3、4、12、13 和图 3(b)中的部门 3、4、5、7 等,这些部门的间接经济损失在各自部门综合损失中的占比均超过 50%,表示该部门对其他产业的影响程度较大。当 $K < 1$ 时,例如图 2(a)中的部门 1、2、8、17 和图 2(b)中的部门 2、6、8、9 等,这些部门的间接经济损失占比均低于 50%,表示该部门对其他产业的影响程度较小。可以看到温州市的工业间接经济损失占比最小,结合图 1(d)来看,工业在生

表 3 停电区域各行业部门间接经济损失

Table 3 Indirect economic losses of various industrial sectors in power outage areas

行业部门	编号	间接经济损失系数		间接经济损失/元	
		石河子市	温州市	石河子市	温州市
农业	1	0.76	1.01	170 700.95	500 144.29
工业	2	0.78	0.15	1 949 088.22	1 103 268.37
建筑业	3	1.86	2.83	1 434 332.28	2 126 048.61
交通运输业	4	1.34	1.57	251 902.93	725 439.41
信息业	5	1.09	1.59	133 773.47	867 677.57
批发和零售业	6	0.72	0.77	154 206.68	1 244 198.00
住宿和餐饮业	7	1.23	2.05	110 234.23	620 188.27
金融业	8	0.69	0.67	226 818.08	716 494.19
房地产业	9	0.78	0.39	207 995.96	301 743.94
租赁服务业	10	1.37	1.88	114 735.94	342 425.99
科学研究和技术服务业	11	1.25	1.76	69 840.03	206 105.73
公共设施管理业	12	1.56	1.49	81 810.66	53 492.30
其他服务业	13	1.80	1.34	133 518.40	356 285.66
教育	14	0.46	0.90	101 774.73	503 485.53
卫生和社会工作	15	1.55	2.07	229 901.76	596 404.44
文化、体育和娱乐业	16	1.06	1.37	27 263.60	94 873.34
社会保障	17	0.30	1.45	77 517.55	814 647.78

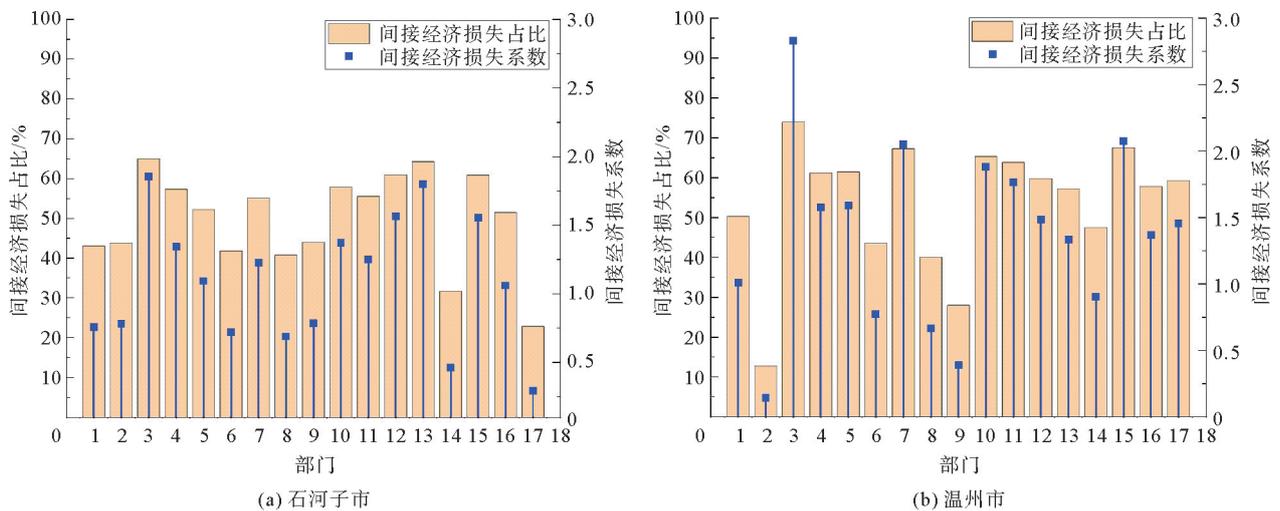


图 2 停电区域各产业部门停电间接经济损失情况

Fig. 2 Indirect economic losses caused by power outages in various industrial sectors in power outage areas

产过程中主要消耗自身产品,相比之下,其他行业对工业的消耗低于工业对自身的消耗。新疆的工业间接经济损失占比较少,图 1(b)中也显示工业对自身产品的消耗与对其他产业产品的消耗差距并不大。两个停电区域的建筑业间接经济损失占比均为最大,图 1(b)和图 1(d)上也显示建筑业对其他行业的消耗大于对自身的消耗。其次信息业、交通运输业、住宿和餐饮业等系数大于 1 的行业间接经济损失均超过了各自的直接经济损失。

停电区域各行业部门停电事故综合经济损失情况如图 3 所示,由图 3(a)和图 3(b)中可以看出,两市的工业停电总经济损失均最大,因为工业的生产总值在各行业中占比最大,石河子市的工业占总产业的

46.13%，温州市占总产业的 48.27%，用电量也最多，所以停电事故对工业造成的直接经济损失是最大的。即使工业的间接经济损失不大，但其综合损失远高于其他产业。其次是建筑业，虽然建筑业的间接经济损失较高，但其生产总值占比不大，石河子市建筑业占 13.6%，温州市仅为全产业的 4.8%，所以建筑业的综合损失低于工业。总体来看，温州市的停电经济损失要高于石河子市，就两市年总产值来看，温州市与石河子市比值约为 8 : 1，两地的经济水平不同，因此停电事故的经济影响程度也不同。

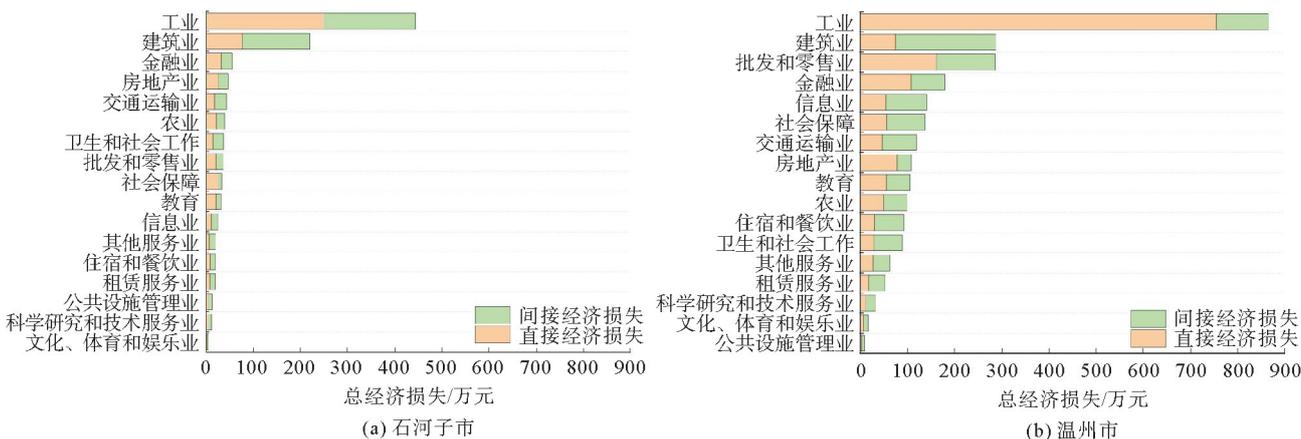


图 3 停电区域各产业部门综合经济损失分布

Fig. 3 Distribution of comprehensive economic losses among various industrial sectors in power outage areas

停电事故对停电区域三大产业造成的经济影响如图 4 所示。图 4(a)和图 4(e)分别为石河子市和温州市的产业结构占比，第三产业对地区的经济发展水平有很大的依赖性，与地区经济发展水平相适应，石河子市第三产业占比为 38.19%，温州市为 43.76%，温州市略高于石河子市。图 4(b)和图 4(f)显示停电事故对第二产业造成的直接经济损失要高于第三产业，第二产业主要以工业制造业、建筑业为主，多为生产制造类产业，且生产总值占比较高，所以受停电事故直接影响较大。由图 4(c)和图 4(g)可以看出，停电事故对石河子市第二产业造成的间接经济损失高于第三产业，但温州市第二产业的间接经济损失远低于第三产业。停电事故对第三产业的间接影响取决于该产业与其他产业的关联紧密度，不同经济结构第三产业的停电间接经济影响程度不同。由于温州市第三产业发展水平较石河子市高，投入产出结构联系紧密，间接经济损失系

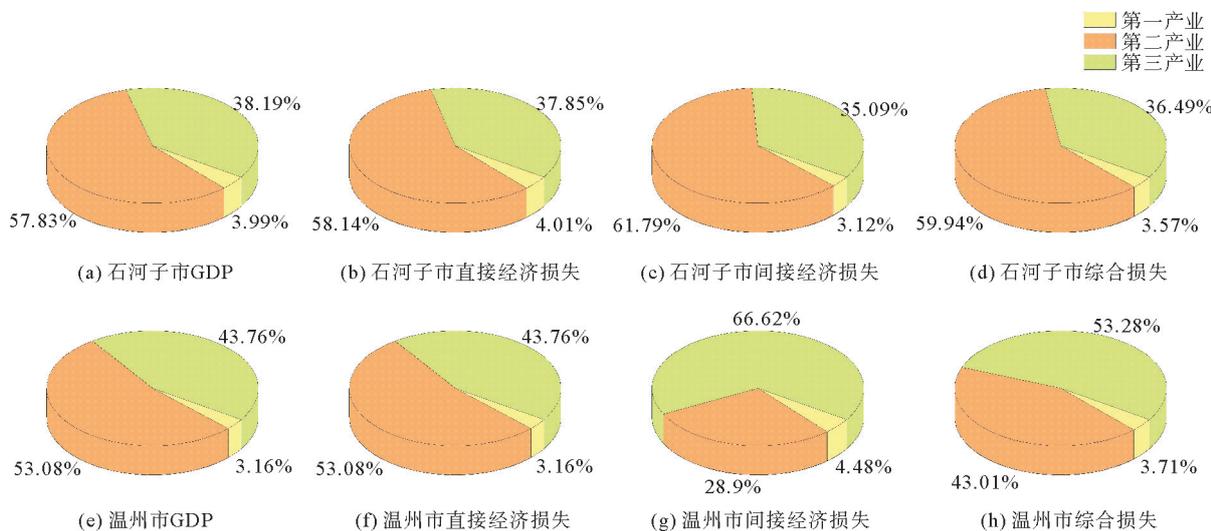


图 4 停电区域三大产业停电经济损失分布情况

Fig. 4 Distribution of economic losses caused by power outages in three major industries in power outage areas

数较高,因此停电事故间接经济影响程度大。根据图 4(d)和图 4(h)停电事故综合损失来看,石河子市的第二产业高于第三产业,而温州市的第三产业高于第二产业。

4.5 评估结果合理性分析

传统停电损失常采用地区产电比来估算,根据停电区域单位电能的经济效益评估停电事故的经济损失。2014 年石河子市年总用电量 235.9 亿 kW·h,生产总值 292.8 亿元,该地区的产电比为 1.24 元/kW·h,估算出此次停电事故经济损失为 647.39 万元。本研究模型评估该停电事故损失为 1 110.46 万元,估算该市的单位电量经济损失为 2.13 元/kW·h。2008 年温州市年用电总量为 252.4 亿 kW·h,生产总值为 2 424.3 亿元,该地区的产电比为 9.61 元/kW·h,估算出此次停电事故经济损失为 1 344.69 万元。本研究模型评估该停电事故损失为 2 681.47 万元,估算该市单位电量经济损失为 19.15 元/kW·h。可以看出,传统的计算结果过于保守,并且地区产电比只能反映停电事故对该地区经济损失的整体影响,无法体现各行业用户具体的损失程度,本研究所采用的行业产电比与投入产出模型相结合的评估方法有效解决了这一问题。

为进一步验证评估结果的准确性,本研究搜集了具有官方统计数据国际典型大停电事故相关数据,如表 4 所示^[19]。根据表 4 中数据得出不同经济发展水平地区大停电事故的单位电量经济损失范围大约在 0.01~138.61 元/(kW·h)之间。

表 4 国际典型大停电事故数据
Table 4 Data on typical international major power outages

事故名称	损失负荷/ MW	经济损失/ 亿美元	单位电量经济损失/ (美元/(kW·h))	汇率(1 美元兑 换人民币)/元	单位电量经济损失/ (元/(kW·h))
2003 年美加“8·14”大停电	61 800	300	16.74	8.28	138.61
2011 年巴西“2·4”大停电	800	0.60	9.38	6.46	60.60
2016 年南澳“9·28”大停电	456	0.82	3.60	6.64	23.90
2012 年印度“7·30”“7·31”大停电	50 000	20	2.67	6.25	16.69
2005 年莫斯科“5·25”大停电	3 600	0.001	0.001	8.10	0.01

2003 年美国、加拿大“8·14”大停电事故,属于经济发达地区,且受影响的地区是纽约、多伦多、渥太华等全球范围内经济发达程度最高的城市,其生产总值折合人民币 74 150.79 亿元,因此该停电事故的单位电量经济损失最高。2008 年浙江省的生产总值为 21 486.92 亿元,经济发展水平要落后于美国、加拿大。2011 年巴西和 2016 年南澳的经济发展水平平均高于浙江省 2008 年的发展水平,但浙江省的经济发展水平高于印度停电事故影响地区,例如印度首都新德里 2019—2020 年生产总值折合人民币 8 074.67 亿元。2014 年石河子市的生产总值为 292.8 亿元,新疆生产总值为 9 273.46 亿元,而 2005 年莫斯科的生产总值折合人民币 2 025 亿元,低于新疆。因此计算出的温州市单位电量经济损失应介于 2016 年南澳大停电事故与 2012 年印度大停电事故之间,而石河子市的单位电量经济损失应低于温州市并高于莫斯科,显然本研究计算结果是可信的。

综上所述,通过与不同经济发展水平地区的对比分析,验证了本研究所建模型的科学性与合理性。

5 结论

1) 针对停电事故对区域经济影响的复杂性,本研究从细分行业角度出发,提出一种考虑产业后向关联影响的停电经济损失评估方法。该方法考虑了各产业完全消耗水平下经济损失传导效应,能更全面地评估停电事故带来的经济影响。

2) 由建模评估过程可见,投入产出法对数据要求不高,解决了统计数据的复杂性问题,且能够深刻反映国民经济各部门间因停电事故扰动产生的连锁反应和波及效应,清晰体现出各行业损失情况,从而有利于相关部门(单位)根据不同行业的损失程度确定恢复方案,制定预防策略。

3) 以2014年石河子“7·09”停电事故和2008年温州“7·28”停电事故为例,验证了本研究模型的可行性。通过对比分析两个停电区域的计算结果可看出,不同地区产业结构受停电事故影响不同,停电经济损失分布与地区经济结构密切相关。

参考文献:

- [1] 安学民,孙华东,张晓涵,等.美国德州“2·15”停电事件分析及启示[J].中国电机工程学报,2021,41(10):3407-3415.
AN Xuemin,SUN Huadong,ZHANG Xiaohan,et al. Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2021,41(10):3407-3415.
- [2] 徐永禧.美国、加拿大8·14大停电[J].国际电力,2003(5):15-19.
XU Yongxi. Big blackout in U. S. and Canada August 14,2003[J]. International Electric Power,2003(5):15-19.
- [3] 程林.电力系统可靠性原理和应用[M].2版.北京:清华大学出版社,2015:394-398.
- [4] 刘怀东,袁保庆,章贤方.一种电力用户停电损失函数估算方法[J].继电器,2006(16):36-38.
LIU Huaidong,YUAN Baoqing,ZHANG Xianfang. A method for estimating power customer interruption cost function [J]. Relay,2006(16):36-38.
- [5] 毛安家,熊超中,张粒子,等.基于改进Tobit模型的负荷停电损失估算方法[J].电力系统自动化,2010,34(9):29-33.
MAO Anjia,XIONG Chaozhong,ZHANG Lizi,et al. A customer's outage cost assessment approach based on the improved Tobit model[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(9):29-33.
- [6] 林锐涛,林哲昊,周勤兴,等.电力用户停电影响指标体系及综合评估方法[J].电网技术,2020,44(6):2350-2360.
LIN Ruitao,LIN Zhehao,ZHOU Qinxing,et al. Impact index system and comprehensive assessment for the power outage of power users[J]. Power System Technology,2020,44(6):2350-2360.
- [7] 陈元刚,周瑞璇.基于IO模型的洪涝灾害关联经济损失评估:以重庆市2020年6—7月为例[J].中国市场,2021(11):46-49.
CHEN Yuangang,ZHOU Ruixuan. Evaluation of economic losses associated with flood and waterlogging disasters based on IO model:A case study of Chongqing from June to July 2020[J]. China Market,2021(11):46-49.
- [8] 郑山锁,尚志刚,贺山川,等.地震灾害经济损失评估方法及应用[J].灾害学,2020,35(1):94-101.
ZHENG Shansuo,SHANG Zhigang,HE Jinchuan,et al. Method and application of economic loss assessment for earthquake disasters[J]. Journal of Catastrophology,2020,35(1):94-101.
- [9] 肖雯雯.产业网络关联分析:概念体系与分析框架[D].济南:山东大学,2014.
XIAO Wenwen. Industrial network linkage analysis:Concept system and analysis framework[D]. Jinan:Shandong University,2014.
- [10] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. The Review of Economics and Statistics,1936,18(3):105-125.
- [11] 向蓉美.投入产出法[M].3版.成都:西南财经大学出版社,2018.
- [12] 国家能源局电力安全监管司.全国电力事故和电力安全事件汇编[M].杭州:浙江人民出版社,2015.
- [13] 国家电网公司安全监察部.国家电网公司2008年安全生产事故报告[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [14] 石河子统计年鉴委员会.石河子统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [15] 温州市统计局.温州统计年鉴(2009)[M].北京:中国统计出版社,2009.
- [16] 国家统计局国民经济核算司.中国地区投入产出表(2012)[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [17] 国家统计局国民经济核算司.中国地区投入产出表(2007)[M].北京:中国统计出版社,2011.
- [18] 国家统计局.2011国民经济行业分类注释[M].北京:中国统计出版社,2011.
- [19] 孙华东.国外大停电事故分析[M].北京:中国电力出版社,2022.

(责任编辑:齐敏华)