

· 经济影响与对策 ·

## 新冠肺炎疫情对我国在“一带一路”沿线国家能源投资风险的影响分析

李志慧<sup>1, 2, 3</sup> 齐麟<sup>4</sup> 邓祥征<sup>1, 2, 3\*</sup> 陈中飞<sup>5</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358
5. 暨南大学经济学院, 广州 510632

**[摘要]** “一带一路”沿线国家是我国能源投资重点区域, 量化评估我国在沿线国家能源投资风险及新冠肺炎疫情对其影响, 对我国能源投资布局优化以应对突发事件冲击具有重要意义。本文利用集对分析评价了2000—2018年我国在沿线国家的能源投资风险时空变化特征, 并基于关联分析从疫情影响能源投资风险变动及疫情因子与风险关联度的角度解析了疫情对能源投资风险的关联影响。研究发现, 2000—2018年“一带一路”沿线国家能源投资风险整体呈现波动下降趋势, 轻度和中度风险区国家主要分布于南亚、东盟、独联体和西亚区域的经济增速较快或资源禀赋较好的国家, 较高和高度风险区国家主要分布于西亚、中亚和东盟部分地区。叠加疫情因素后, 沿线国家能源投资风险排名呈现变动, 南亚、东盟以及西亚部分国家受疫情影响较重导致风险排名上升, 中亚部分国家排名下降, 部分东盟国家如缅甸、越南、印度尼西亚等国以及部分中东国家如阿联酋、沙特阿拉伯等国家能源投资风险及叠加疫情因素后风险排名均较低。从疫情相关因素与能源投资风险关联度来看, 人口密度高、人口流动大及公共卫生条件较差的国家更易受疫情影响, 能源贸易量的削减将会导致投资风险的上升。结合评价结果, 在现有合作条件和疫情影响下, 未来能源战略部署中建议重点考虑的国家包括哈萨克斯坦、印度尼西亚、蒙古和沙特阿拉伯等能源较为丰富、能源合作基础好且受疫情影响相对较轻的国家。

**[关键词]** 能源投资风险; 新冠肺炎疫情; 集对分析; 关联分析; “一带一路”

2019年12月, 新冠肺炎疫情爆发并在全球蔓延。疫情爆发直接对人体健康产生重要影响, 同时通过经济社会中的诸多联系将间接影响粮食、环境和能源等部门<sup>[1-3]</sup>。其中能源产业投资大, 带动效应强, 保能源安全被列为2020年《政府工作报告》“六保”任务之一, 对统筹推进疫情防控和经济社会发展至关重要。我国经济快速发展促进能源需求不断增长, 对外能源投资和能源产品进口已成为满足能源需求的重要途径<sup>[4]</sup>。“一带一路”沿线国家是我国能源投资与合作的重点区域, 其已探明的石油、天然气和煤炭储量分别占全世界储量的58.8%、79.9%和54.0%<sup>[5]</sup>, 丰富的能源资源储备为各国间开展能源



**邓祥征** 博士, 中国科学院地理科学与资源研究所研究员, 国家杰出青年科学基金获得者。发表论文150余篇, 出版中英文专著9部, 担任多家国际期刊编委与副主编。主要研究方向包括资源管理与政策、环境与生态管理及区域发展管理等。



**李志慧** 博士, 中国科学院地理科学与资源研究所助理研究员。发表论文40余篇, 参与专著/编著撰写5部, 获省部级奖1项, 获批软件著作权登记3项。主持或参与重点科研项目或课题5项。负责 *Technological Forecasting and Social Change*, *Journal of Physics and Chemistry of the Earth* 等多个期刊的客座编辑与审稿。主要研究方向包括水土资源管理与政策、区域可持续发展与管理等。

收稿日期: 2019-08-31; 修回日期: 2020-12-13

\* 通信作者, Email: dengxz@igsnrr.ac.cn

合作提供了基础。然而,疫情爆发对“一带一路”沿线国家人口健康与社会经济发展有不同程度影响。随着“一带一路”倡议的推进,我国与沿线各国形成利益、责任、命运共同体<sup>[6]</sup>,识别疫情等突发事件对我国在沿线国家的能源投资与合作风险的影响对保障国家战略的高效实施具有重要意义。

能源投资是能源需求国保障能源稳定供应的重要手段之一。我国是全球最大的能源驱动国,占全球能源消费净增长的75.0%以上。2018年,我国能源对外依存度约为21.0%,其中原油净进口量达到4.6亿吨,石油对外依存度超过70.0%,天然气净进口量达 $1.2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,对外依存度升至45.3%<sup>[5]</sup>。能源安全是我国经济保持高速增长的必要条件,因此建立稳定的能源贸易合作关系是我国的重点需求。“一带一路”沿线地区国家能源丰富,是我国能源进口来源的主要区域之一,加强与“一带一路”沿线国家能源领域的贸易合作是该倡议的重点方向<sup>[7]</sup>。然而,能源投资由于其时间周期长及贸易链稳定性弱等特点而具有较强风险性。从资源禀赋来看,能源资源聚集分布在西亚等国家和地区,丰富的资源国往往伴有产业结构单一的问题,在面临政治动荡、技术攻关、产业调整和金融贸易波动时抵御风险的能力较弱。2020年,新冠肺炎疫情对世界经济及贸易产生了不同程度的冲击,部分国家在短期内封闭国境,削减贸易往来,加重了能源投资风险,并影响新一轮能源合作对象的选择<sup>[8]</sup>。因此,为保障我国能源安全及能源投资稳定性,需要对“一带一路”沿线国家能源投资风险进行全面评估,并综合考虑疫情对能源投资风险的影响,从而提出应对疫情等突发事件我国能源投资的优化布局方案。

合理的投资风险评价体系构建及评价方法选择是开展能源投资风险分析的基础。能源投资面临着区域政治、经济、社会与生态环境等方面复杂多因素变化所产生的诸多不确定性,因此国内外学者从不同角度及维度对不同国家和地区的能量投资风险及贸易前景进行了评价分析。在评价指标体系构建方面,Duan等从政治和监管风险、货币、流动性和再融资风险以及资源风险等六个维度构建能源投资风险指标体系<sup>[4]</sup>,开展了“一带一路”沿线50个国家的能源投资风险评价。Wu等综合技术风险、政治风险、经济风险、资源风险、社会环境风险和中国因素六个维度建立了32个指标,评估了“一带一路”沿线国家可再生能源投资风险<sup>[7]</sup>;袁家海和曾昱榕在基本的经济、政治、环境等要素基础上侧重考虑了金融、市

场、收益等因素,增加了对外金融、电力市场、煤电收益和可再生收益四个维度,建立七个维度35个指标,评估了“一带一路”国家的电力投资风险<sup>[9]</sup>。Zhang从全球商品链和价值链概念出发,基于进出口贸易强度指数、行业内贸易指数、贸易竞争系数及综合贸易比较优势指标分析了“一带一路”沿线国家间油气贸易的现状和前景<sup>[5]</sup>。整体来看,能源投资风险评估的指标体系从社会经济及资源环境等不同维度不断扩展及完善,为综合评估能源投资风险提供了重要参考。针对投资风险的测算,国内外学者多采用模糊层次分析法、网络层次分析法(ANP)、Topsis法、熵权法及集对分析等方法<sup>[4,9]</sup>。其中层次分析法具有一定的主观性,熵权法及集对分析方法能够对模糊多属性问题进行客观评价,提高评价结果的准确性和可信度。熵权法能够根据各指标所提供的信息量来决定指标的权重,能够较好的克服人为判断的主观性以及信息冗余等问题,目前正在工程建设、社会经济等领域得到广泛应用,具有客观性、准确性等优势<sup>[10,11]</sup>。集对分析法由赵克勤提出,针对确定性及模糊性问题进行同异反定量分析,其主要思想是将两个具有联系的集合结成集对,对其同一度、对立度和差异度进行分析,是实现多个因素综合评价的有效方法<sup>[12-15]</sup>。因此,本研究基于熵权法和集对分析开展能源投资风险评价。

在疫情对能源投资影响分析方面,已有学者从传播机理、影响范围、影响程度等方面定性分析了宏观层面疫情爆发对能源部门社会和经济的影响<sup>[16]</sup>,以及微观层面疫情对具体能源项目的影响<sup>[17]</sup>。然而,疫情对“一带一路”沿线国家能源投资风险的影响分析尚缺乏量化分析。灰色关联度是衡量不同因素关联程度的指标,常用于系统内多因素的关联程度分析<sup>[18]</sup>,可应用于疫情对能源投资风险影响的量化分析。灰色关联分析的基本思想是根据参考数列与比较数列构成的曲线之间的几何相似程度来确定参考数列与比较数列集之间的关联度,其曲线的几何形状越相似,关联度越大,常用于对信息不完备、具有非精确性的系统关联问题分析<sup>[19]</sup>。综上,本文以疫情对“一带一路”沿线国家能源投资风险的影响为主要关注点,构建能源投资风险分析多维度定量评价体系,基于熵权法和集对分析法对“一带一路”沿线国家2000—2018年能源投资风险进行评价并开展时空变化分析,在此基础上引入关联分析定量评估疫情对能源投资风险的影响,为保障能源投资安全提供建议。

## 1 “一带一路”沿线国家概况

“一带一路”是一个开放的国际区域经济合作网络,没有精确的空间范围。根据中国一带一路网数据,截至2018年12月,我国已与“一带一路”沿线64个国家签订合作协议<sup>[20]</sup>。基于该数据并借鉴相关研究成果<sup>[21, 22]</sup>,本研究将“一带一路”沿线国家范围界定为64国,包括东亚的蒙古,东盟11国,西亚和北非16国,南亚8国,中亚5国,中东16国以及独联体7国(表1)。从石油、天然气、煤三种能源分布情况来看,西亚、东欧等地区国家能源禀赋较高,在能源进口和出口中占有重要地位。从不同能源类型来看,“一带一路”沿线地区拥有丰富的石油资源,全

球十大石油生产国中沿线国家占了7个。2018年,“一带一路”沿线地区石油产量排名前五位的国家为沙特阿拉伯、俄罗斯、伊朗、阿联酋及科威特。我国进口原油金额达2392亿美元,沿线地区有45个国家向我国出口原油,其中从沙特阿拉伯进口原油的金额为297亿美元,占我国进口总额12.42%。中国—东盟、中国—非盟、中国—中东欧三大国际能源合作平台的建设为沿线各国提供了良好的合作契机。“一带一路”沿线地区的天然气资源极为丰富,全球十大天然气生产国中沿线国家占七个。“一带一路”沿线地区天然气产量排名前五位的国家为俄罗斯、伊朗、沙特阿拉伯、印度尼西亚以及马来西亚,多数为西亚、东亚和东南亚国家,而欧洲天然气资源

表1 “一带一路”沿线国家区域划分

区域	国家和地区	序号	区域	国家和地区	序号
东盟11国	东帝汶	1	西亚和北非16国	土耳其	33
	菲律宾	2		叙利亚	34
	柬埔寨	3		也门	35
	老挝	4		伊拉克	36
	马来西亚	5		伊朗	37
	缅甸	6		以色列	38
	泰国	7		约旦	39
	文莱	8		约旦河西岸和加沙	40
	新加坡	9		阿尔巴尼亚	41
	印度尼西亚	10		爱沙尼亚	42
	越南	11		保加利亚	43
南亚8国	阿富汗	12	中东欧16国	波黑	44
	巴基斯坦	13		波兰	45
	不丹	14		黑山	46
	马尔代夫	15		捷克共和国	47
	孟加拉国	16		克罗地亚	48
	尼泊尔	17		拉脱维亚	49
	斯里兰卡	18		立陶宛	50
	印度	19		罗马尼亚	51
中亚5国	哈萨克斯坦	20	独联体7国	马其顿	52
	吉尔吉斯斯坦	21		塞尔维亚	53
	塔吉克斯坦	22		斯洛伐克	54
	土库曼斯坦	23		斯洛文尼亚	55
	乌兹别克斯坦	24		匈牙利	56
西亚和北非16国	阿拉伯联合酋长国	25	东亚1国	俄罗斯	57
	阿曼	26		乌克兰	58
	埃及	27		白俄罗斯	59
	巴林	28		摩尔多瓦	60
	卡塔尔	29		格鲁吉亚	61
	科威特	30		阿塞拜疆	62
	黎巴嫩	31		亚美尼亚	63
	沙特阿拉伯	32		蒙古	64

较匮乏。中俄、中缅、中亚以及海上四大油气战略通道建设日益完善,管道天然气的和液化天然气的运输更加便利,天然气的地区分布不均情况得到缓解和改善。“一带一路”沿线地区的煤炭和褐煤资源较为丰富,产量排名前五位的国家分别为印度、印度尼西亚、俄罗斯、波兰以及哈萨克斯坦,主要分布在东亚、东南亚以及欧洲的少数国家。沿线国家的能源禀赋及与我国紧密的能源合作基础为保障我国能源安全提供了重要支撑。

## 2 数据与方法

### 2.1 能源投资风险评估指标体系及方法

基于多数文献研究中建立的能源投资风险评价体系<sup>[7,9]</sup>,并综合考虑影响地区能源投资风险的主要因素,特别考虑到基础能源及可再生能源在市场贸易及利用的现状,本文构建了包括经济水平、金融贸易、社会发展、政治风险、环境风险、能源潜力和中国因素七个目标层的能源投资风险指标评价体系。经济水平、金融贸易、社会发展、政治风险四个目标层中指标是能源投资的基础和保障性指标。经济水平能直接反映出一个国家的整体运行情况,也是能源投资的必要资金保障;金融贸易可以反映一个国家的经济活跃度以及贸易总体水平,为选取能源投资对象提供价值参考;社会发展是衡量一个国家社会稳定、发展性的重要标准,是能源投资中选取贸易合作对象时不可忽略的考虑因素;政治风险是国家间展开贸易合作的首要考虑因素,保障投资贸易安全是合作过程中的必要基础。环境风险、能源潜力、中国因素三个目标层中指标与能源投资直接相关。在全球气候变化和“人类命运共同体”背景下,环境因素是当前各国开展能源投资贸易中所考虑的必要因素,影响着资源开采量以及投资的可持续性,在此选取二氧化碳排放量(S1)表征碳排放水平,一氧化氮排放量(S2)表征污染水平,可再生能源消耗占最终能源消耗总量的百分比(S3)表征能源清洁度,PM2.5年平均暴露量(S4)表征空气质量,能源部门的甲烷排放量(S5)表征潜在污染影响;在能源贸易对象选取中还需要考虑各国能源的禀赋与合作潜力,以保证能源投资贸易合作的长期稳定有效,在此选取石油产量(M1)表征石油资源禀赋,天然气产量(M2)表征天然气资源禀赋,煤产量(M3)表征煤资源禀赋,能源使用量(M4)表征能源利用水平,私营部门参与的能源投资(M5)表征投资参与情况;对外投资贸易对象在选择上具有灵活性,很大程度上取决于两国的贸易基础、合作互信以及资源互补性,因此本文在评估能源投资风险评价中加入中国因素

相关指标,在此选取中国对其进口贸易额(C1)表征进口贸易水平,中国对其出口贸易额(C2)表征出口贸易水平,中国对其石油进口额(C3)表征石油进口水平,中国对其天然气进口额(C4)表征天然气进口水平,中国对其煤炭进口额(C5)表征煤炭进口水平。七个目标层中共选取 35 个具有典型性、独立性、低相关性指标(表 2),各项指标数据来源为世界银行世界发展指标(WDI)数据库。

能源投资风险是多元结构变量,包含着自然环境、社会经济、金融市场等多方面因素,受到经济、社会、生态三个系统的综合影响,兼具确定性及模糊性特征。本文使用熵权法对能源投资风险各项指标权重进行计算并引入集对分析进行能源投资风险评价。首先,使用熵权法进行指标权重计算,预判指标对能源投资风险呈现正向还是负向影响,并根据判断结果对指标进行标准化。正向、负向标准化公式分别为:

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\}} \quad (1)$$

$$X'_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\}} \quad (2)$$

第二步计算第  $j$  项指标下第  $i$  个样本值占该指标的比重:

$$g_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m \quad (3)$$

其次,计算第  $j$  项指标的熵值:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n g_{ij} \ln(g_{ij}), j = 1, \dots, m \quad (4)$$

其中,  $k = 1/\ln(n) > 0$ , 满足  $E_j \geq 0$ 。

求得信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - E_j, j = 1, \dots, m \quad (5)$$

得到各项指标权重为:

$$r_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, j = 1, \dots, m \quad (6)$$

之后,根据集对分析思路进行模型改进以适应能源投资风险问题。将指标体系集合  $C$  与评价标准  $B$  结成集对  $H(C, B)$ 。首先,列出评价集对  $H$ :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \cdots & \cdots & h_{ij} & \cdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $h_{ij}$  为评价指标,  $m$  为地区数;  $n$  为评价指标数;其次,根据评价问题确定各评价对象中的优劣指标,组成最优指标集  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  和最劣指

标集  $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 。当  $h_{ij}$  对评价结果起正和负向作用时,分别使用式(8)和式(9)计算。

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{h_{ij}}{(b_j + \omega_j)} \\ c_{ij} = \frac{b_j \omega_j}{h_{ij}(b_j + \omega_j)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{b_j \omega_j}{h_{ij}(b_j + \omega_j)} \\ c_{ij} = \frac{h_{ij}}{(b_j + \omega_j)} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $a_{ij}$  及  $c_{ij}$  分别表示评价指标  $h_{ij}$  与  $b_j, \omega_j$  的接近程度。集对  $H\{C, B\}$  在区间  $(B, W)$  上的同一度和对立度的计算方法如下:

$$\begin{cases} a_i = \sum_{j=1}^n r_j a_{ij} \\ c_i = \sum_{j=1}^n r_j c_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $a_i$  及  $c_i$  分别为评价对象  $C_i$  与最优方案集  $B$  的同一度和对立度,  $r_j$  为指标权重。定义  $C_i$  与  $B$  的接近度  $P_i$  (式(11)),  $P_i$  数值与接近度正相关。基于此,可将  $P_i$  定义为能源投资风险指数,以表征地区能源投资风险水平。  $P_i$  越大,表明评价地区能源投资风险越大。

$$P_i = \frac{a_i}{a_i + c_i} \quad (11)$$

表2 “一带一路”沿线国家能源投资风险评价指标体系

目标层	代码	指标层	指标含义*	权重
经济水平	E1	GDP(现价美元)	经济发展规模(-)	0.307
	E2	人均GDP(现价美元)	经济发展水平(-)	0.072
	E3	GDP增长率	经济增长速度(-)	0.071
	E4	GDP平减指数衡量的年通货膨胀率	通货膨胀程度(+)	0.017
	E5	公共和公共担保债务服务(占GNI的比例)	债务情况(+)	0.006
金融贸易	F1	多边净金融流动(NFL,现价美元)	金融自由度(-)	0.030
	F2	出口价值指数	出口水平(-)	0.160
	F3	实际有效汇率指数(基于国内生产总值平减指数)	汇率变动情况(+)	0.005
	F4	货物和服务进口占GDP的比重	贸易开放度(-)	0.055
	F5	外商直接投资净流入(现价美元)	投资情况(-)	0.004
社会发展	D1	人口增长(年度百分比)	人口增长(-)	0.005
	D2	城镇人口(占总人口比例)	城镇化水平(-)	0.002
	D3	总失业人数(占劳动力总数的比例)	失业状况(+)	0.010
	D4	国际谋杀犯罪率(每10万人)	国际安全(+)	0.013
	D5	公共教育支出(占政府支出的比例)	教育水平(-)	0.002
政治风险	P1	公共部门透明度、问责性和腐败评级(1=低至6=高)	腐败控制(-)	0.002
	P2	公共管理质量评级(1=低至6=高)	政府有效性(-)	0.003
	P3	境内因冲突和暴力而流离失所总人数	政治稳定性(+)	0.003
	P4	法律权利力度指数(0=弱至12=强)	法治水平(-)	0.004
	P5	因战死亡人数	战乱情况(+)	0.009
环境风险	S1	二氧化碳排放量(人均公吨数)	排放水平(+)	0.004
	S2	一氧化氮排放量(千公吨二氧化碳当量)	污染水平(+)	0.002
	S3	可再生能源消耗(占最终能源消耗总量的百分比)	能源清洁度(-)	0.012
	S4	PM2.5年平均暴露量( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	空气质量(+)	0.003
	S5	能源部门的甲烷排放量(千公吨二氧化碳当量)	潜在污染影响(+)	0.004
能源潜力	M1	石油产量(Mt)	石油资源(-)	0.005
	M2	天然气产量(Bcm)	天然气资源(-)	0.009
	M3	煤产量(Mt)	煤资源(-)	0.004
	M4	能源使用量(人均千克石油当量)	能源利用(-)	0.003
	M5	私营部门参与的能源投资(现价美元)	投资参与情况(-)	0.006
中国因素	C1	中国进口贸易额(现价美元)	进口贸易水平(-)	0.029
	C2	中国出口贸易额(现价美元)	出口贸易水平(-)	0.032
	C3	中国石油进口额(现价美元)	石油进口(-)	0.025
	C4	中国天然气进口额(现价美元)	天然气进口(-)	0.036
	C5	中国煤炭进口额(现价美元)	煤炭进口(-)	0.046

\* “+”、“-”表示指标间的正负向关系。

### 2.2 疫情对能源投资风险影响的评价指标体系及方法

本文将关联分析引入疫情对能源投资风险影响的评价,通过建立能源投资风险疫情关联影响评价指标体系,计算疫情与能源投资风险的关联贴适度及疫情相关指标与投资风险的灰色关联度,探究“一带一路”沿线各国能源投资风险受疫情影响的关联程度。本研究以 2018 年能源投资风险指数表征能源投资风险现状,选取累计新冠肺炎确诊人数、死亡率、治愈率和近 14 天内确诊人数等指标表征疫情发展状况(数据截至 2020 年 11 月 10 日),选择千人床位数反映地区医疗卫生条件,人口密度和人口流动表征人群聚集和流动水平,能源净贸易削减量表征能源贸易受疫情冲击造成的削减,构建了疫情对能源投资风险关联影响的评价指标体系,并基于熵权法计算各因素权重(表 3)。其中,人口流动指数来自于 Kraemer 等关于全球人口流动研究的数据<sup>[23]</sup>,能源净贸易削减量指单个国家与世界其他国家的贸易净值的减少量,由各国与世界其他国家能源净贸易削减值计算而来,削减水平数值来源于世界贸易组织 2020 最新发布《贸易统计与展望》乐观情景与悲观情景预测的平均值,其余指标数据来源于世界银行 WDI 数据库。

根据关联分析思想,首先基于能源投资风险疫情关联影响评价指标体系建立“一带一路”沿线国家各指标的数值矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,  $c_{mn}$  代表第  $m$  个国家第  $n$  个指标的值 ( $m=1,2,\dots,M,n=1,2,\dots,N$ )。其次,使用式(1)和式(2)进行数值标准化。

标准化后的数值矩阵如下:

$$C' = \begin{bmatrix} c'_{11} & \cdots & c'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c'_{m1} & \cdots & c'_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

然后,确定指标评价最高及最低参考序列。 $c'^1(m)$  为所有国家第  $n$  个指标标准化得分最大值,  $c'^2(m)$  为所有国家第  $n$  个指标标准化得分最小值。最高及最低参考序列分别为:

$$c'^1 = \{c'^1_1(m), c'^1_2(m), \dots, c'^1_n(m)\}, \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

$$c'^2 = \{c'^2_1(m), c'^2_2(m), \dots, c'^2_n(m)\}, \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (15)$$

计算“一带一路”沿线国家评价序列  $c'$  与最高、最低参考序列  $c'^1$ 、 $c'^2$  关于第  $n$  个指标的关联系数  $g'^1(n)$ 、 $g'^2(n)$ :

$$g'^1(n) = \frac{\min \min |c'^1(m) - c'(m)| + 0.5 \max \max |c'^1(m) - c'(m)|}{|c'^1(m) - c'(m)| + 0.5 \max \max |c'^1(m) - c'(m)|} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

$$g'^2(n) = \frac{\min \min |c'^2(m) - c'(m)| + 0.5 \max \max |c'^2(m) - c'(m)|}{|c'^2(m) - c'(m)| + 0.5 \max \max |c'^2(m) - c'(m)|} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

进一步结合指标权重计算出评价序列与最高和最低参考序列的关联度:

$$Q_1 = \sum_i^n r_j g'^1(n), \quad Q_2 = \sum_i^n r_j g'^2(n) \quad (18)$$

最后,计算“一带一路”沿线国家疫情与能源投资风险的关联贴适度  $N$ 。关联贴适度  $N$  即为疫情关联影响指数,  $N$  的数值越接近 1, 说明该国家与最高水平越接近,也即叠加疫情因素的能源投资风险越大:

$$N = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \quad (19)$$

叠加疫情因素的能源投资风险问题是一个信息不完备的不确定性系统,与疫情发展以及能源投资基础的诸多因素密切相关,如病例增长、能源结构、人口密度等。因此,本研究进一步测算疫情相关指标对关联贴适度的灰色关联系数,判断各指标对叠加疫情因素的能源投资风险的影响程度。

将正向标准化后的关联影响指数  $N_0(m)$  作为参考数列,各项标准化后的指标数据  $N_n(m)$  作为比较数列,分别计算参考序列与各比较序列的绝对差,记  $|N_0(m) - N_n(m)|$  为  $\Delta n(m)$ 。

计算灰色关联系数  $\gamma_n$ :

$$\gamma_n = \frac{\min \min \Delta n(m) + 0.5 \max \max \Delta n(m)}{\Delta n(m) + 0.5 \max \max \Delta n(m)} \quad (m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N) \quad (20)$$

最后计算出疫情各指标与叠加疫情因素的能源投资风险的灰色关联度:

$$\delta_n = \frac{1}{m} \sum_{m=1}^M \gamma_n \quad (21)$$

表3 新冠肺炎疫情对“一带一路”沿线国家能源投资风险关联影响评价指标体系

目标层	代码	指标层	指标含义*	权重
关联影响	R1	2018年能源投资风险指数	初始能源投资风险水平(+)	0.010
	R2	新冠肺炎累计确诊人数	疫情严重程度(+)	0.192
	R3	新冠肺炎死亡率	死亡数/确诊数(+)	0.080
	R4	新冠肺炎治愈率	治愈数/确诊数(-)	0.046
	R5	近14天确诊病例数	一定时期内疫情变化情况(+)	0.145
	R6	人口密度	人群聚集程度(+)	0.196
	R7	千人床位数	医疗卫生条件(-)	0.007
	R8	人口流动指数	人口流动(+)	0.182
	R9	能源净贸易削减量	能源贸易往来削减(+)	0.168

\*“+”、“-”表示指标间的正负向关系。

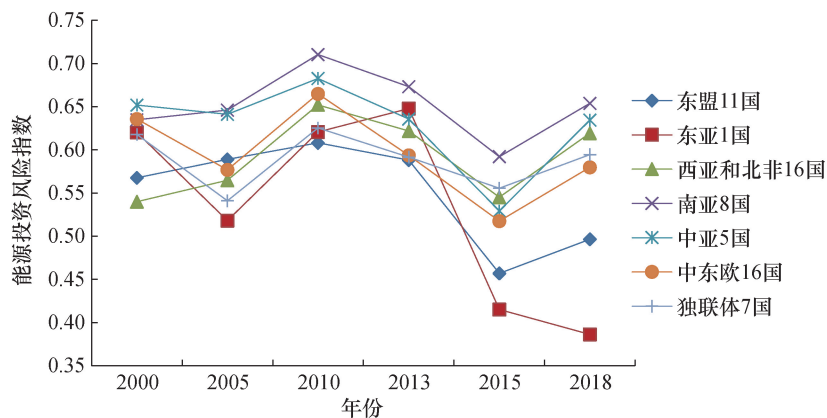


图1 “一带一路”沿线地区能源投资风险指数变化

### 3 结果与分析

#### 3.1 沿线国家能源投资风险时空特征

从沿线国家能源投资风险时间变化特征来看, 2000—2018年“一带一路”沿线国家能源投资风险整体呈现波动下降趋势, 局部有差异。以“一带一路”倡议提出的2013年为时间节点, 将能源投资风险变化划分为两个阶段。第一阶段为2000—2013年, 此阶段各地区能源投资风险整体呈上升趋势, 南亚及西亚和北非地区能源投资风险明显加重。第二阶段为2013—2018年, 此阶段各地区能源投资风险在2013—2015年明显下降, 在2015—2018年有回升态势(图1)。东盟和中东欧能源投资风险整体较低, 南亚及中亚国家能源投资风险相对较高, 并以“一带一路”倡议提出的2013年为时间节点, 整体呈现平稳下降趋势, 近期有小幅回升。西亚和北非地区的能源投资风险从较低的指数水平近年来呈现先降后升趋势, 该地区的伊朗、沙特阿拉伯、阿联酋等国家是我国主要的能源合作国, 适于进行更加深入

的重点投资合作建设, 但要注意避免合作国家资源单一、经济结构不稳定带来的经济风险。东亚的蒙古能源投资风险近年来大幅度下降, 加之石油、煤炭等资源丰富, 有较好的合作潜力, 中国可与蒙古在能源方面开展全面深化的合作, 改变仅从蒙古进口煤炭资源的合作方式, 着力使煤炭和风能、光能等可再生资源领域合作一体化推进, 实现共同发展。此外, 中亚国家是我国能源合作的新领域, 除哈萨克斯坦能源投资风险指数低外, 其他国家风险较高, 因此可以将投资重点适当转向哈萨克斯坦。

基于六个关键时间截面64个国家能源投资风险指数的平均值( $AVG = 0.59$ )和标准差( $STD = 0.12$ ), 以 $AVG - STD(0.48)$ 、 $AVG(0.59)$ 、 $AVG + STD(0.71)$ 为划分节点, 本文将“一带一路”沿线国家能源投资风险划分为轻度风险( $0 \sim 0.48$ )、中度风险( $0.48 \sim 0.59$ )、较高风险( $0.59 \sim 0.71$ )和高度风险( $0.71 \sim 1$ )四个风险等级, 进一步揭示沿线国家能源投资风险的差异特征(图2)。2000—2018年, 沿线国家能源投资风险等级格局分布较为稳定, 中亚、中东欧和西亚地区部分国家风险等级较高, 东盟及

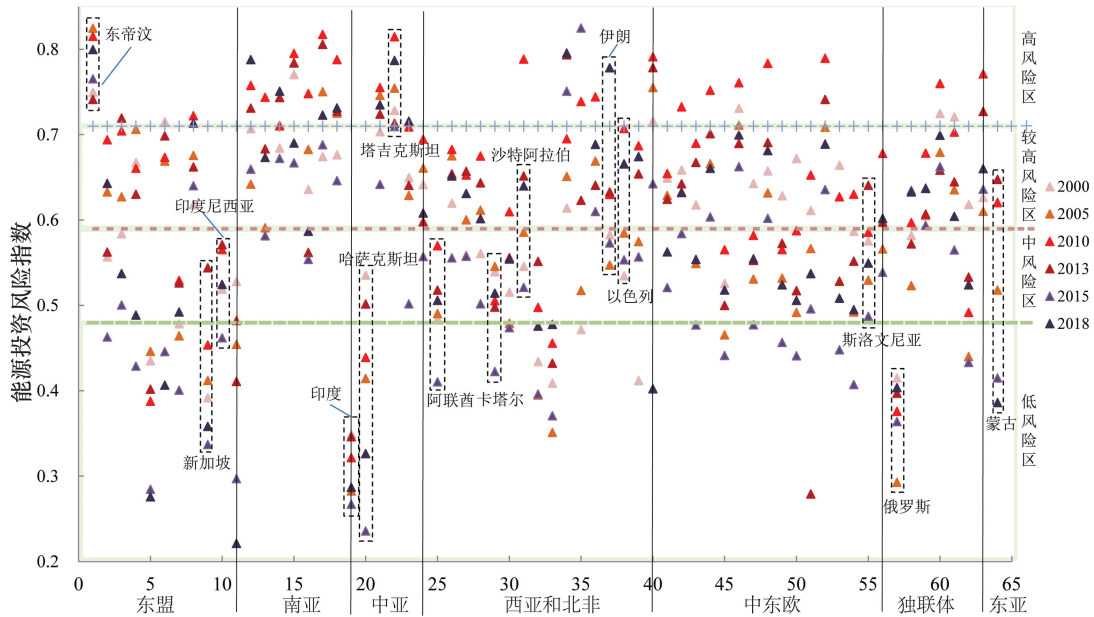


图 2 “一带一路”沿线国家能源投资风险指数

独联体国家风险等级整体较低。从四类区域所包含的国家和地区数量看,较高风险区所包含的国家和地区较多,约占全地区 64 国的一半,轻度和高度风险区所包含的国家和地区较少,说明“一带一路”沿线大多数国家的能源投资风险处于中等至较高水平,但不可忽视潜在的风险加重趋势。具体来看,轻度和中度风险区国家主要分布于南亚、东盟、独联体和西亚部分国家,如风险指数较低的印度、俄罗斯、印度尼西亚、沙特阿拉伯及新加坡等自然资源较丰富或新兴经济发展的国家。以新加坡为例,其一次能源资源较匮乏,但在太阳能、生物燃料等可再生能源方面以及能源开发技术上潜力较大,是亚洲重要的天然气、石油枢纽以及世界三大炼油中心之一,且作为东南亚金融中心,以其优越的地理优势可促进资金融通和市场对接,充分营造投资和贸易的便利化空间。此外,新加坡作为城市国家,对外开放程度高,也是其投资风险较小的主要原因。较高和高度风险区国家主要分布于西亚、中亚和东盟地区部分国家,如卡塔尔、斯洛文尼亚、东帝汶和塔吉克斯坦等国家,此类国家大多风险性在降低,少数因政治动荡等原因处于波动状态。如塔吉克斯坦是位于中亚东部的山地国家,曾经历战乱和政局动荡,加剧了经济脆弱性。为寻求发展,塔吉克斯坦政府制定了“实现能源独立、摆脱交通困境、保障粮食安全”的三大国家发展战略,加入“一带一路”合作倡议

后,与我国在电力、产能等领域开展合作,着力建设中亚天然气管道,将资源禀赋转化为经济发展支撑,逐渐降低自身能源投资风险。

### 3.2 疫情对沿线国家能源投资风险的关联影响

疫情的爆发影响能源投资的稳定性,从地区分布来看,叠加疫情因素的能源投资风险(以疫情与能源投资风险的关联贴进度表征,以下简称“关联贴进度”)较大的国家主要集中在南亚和西亚地区,东盟、中亚和中东地区能源投资风险相对较小(图 3)。我国在“一带一路”沿线地区开展能源合作的国家主要包括伊朗、俄罗斯、沙特阿拉伯、新加坡、阿联酋、卡塔尔、以色列、斯洛文尼亚和印度等国<sup>[24]</sup>。从“一带一路”沿线国家疫情与能源投资风险的关联贴进度来看,伊朗、俄罗斯、卡塔尔、新加坡和印度的关联贴进度偏高,沙特阿拉伯和阿联酋的关联贴进度相对较高,而以色列和斯洛文尼亚的关联贴进度相对较低。新加坡是城市国家,人口密度在全球处于第二位,人地矛盾加剧了疫情影响,使防控措施执行受阻。受疫情影响,新加坡上半年二季度 GDP 同比下降 12.6%,2020 年 5 月对外贸易总额同比下降 25.0%。目前,该国正在积极应对疫情,恢复与周边国家能源贸易,与中国—东盟自由贸易区的合作有望成为走出疫情对能源投资风险冲击的突破口。俄罗斯是世界石油和天然气产量第二大国,也是我国重要的能源贸易国家。近期,俄罗斯单日新增新冠



肺炎确诊病例超过了1万例,疫情反弹明显,疫情冲击成为中俄两国未来能源合作中较大的障碍因素。沙特阿拉伯是我国最大的原油供应国,石油出口是其支柱产业,2020年5月和6月,我国从沙特阿拉伯的石油进口量增至888万吨,相比去年同期增长了15%左右。与我国的合作是沙特阿拉伯能源合作战略的重点内容,增进与沙特阿拉伯的能源合作关系对维持我国的能源安全也具有重要意义。我国可充分利用中阿论坛,继续增进能源投资合作,但同时也应减少自身能源对外依赖度,提高应对中东局势动荡对能源安全的冲击。此外,哈萨克斯坦和印度尼西亚的能源投资风险较低且关联贴进度较低。

哈萨克斯坦是“一带一路”首倡之地,与我国的经济互补性很强,其丰富的原油资源可通过中哈石油管道输送到我国。哈萨克斯坦多年对我国出口处于顺差态势,凭此优势扩大进口可成为哈萨克斯坦进一步加大与我国商贸合作的方向。印度尼西亚的石油、天然气、煤、水能、太阳能、地热能等能源资源储量非常丰富,是世界上第16大产油国并且拥有巨大的天然气储量。我国是印度尼西亚最大的贸易伙伴,两国双边关系稳定且在能源领域的合作取得了积极成果,未来通过管道建设、油气项目推进、绿色煤炭产业建设等合作将有效带动两国能源贸易发展。

结合初始及叠加疫情因素的能源投资风险分析,

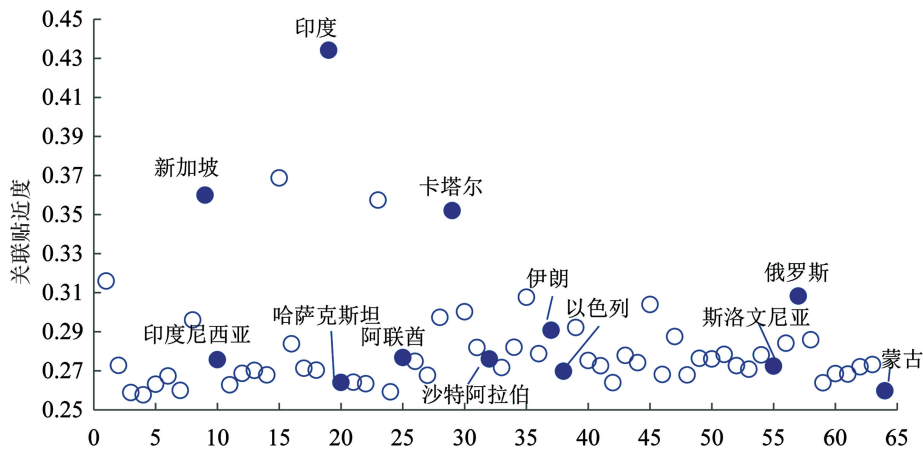


图3 “一带一路”沿线国家疫情与能源投资风险的关联贴进度

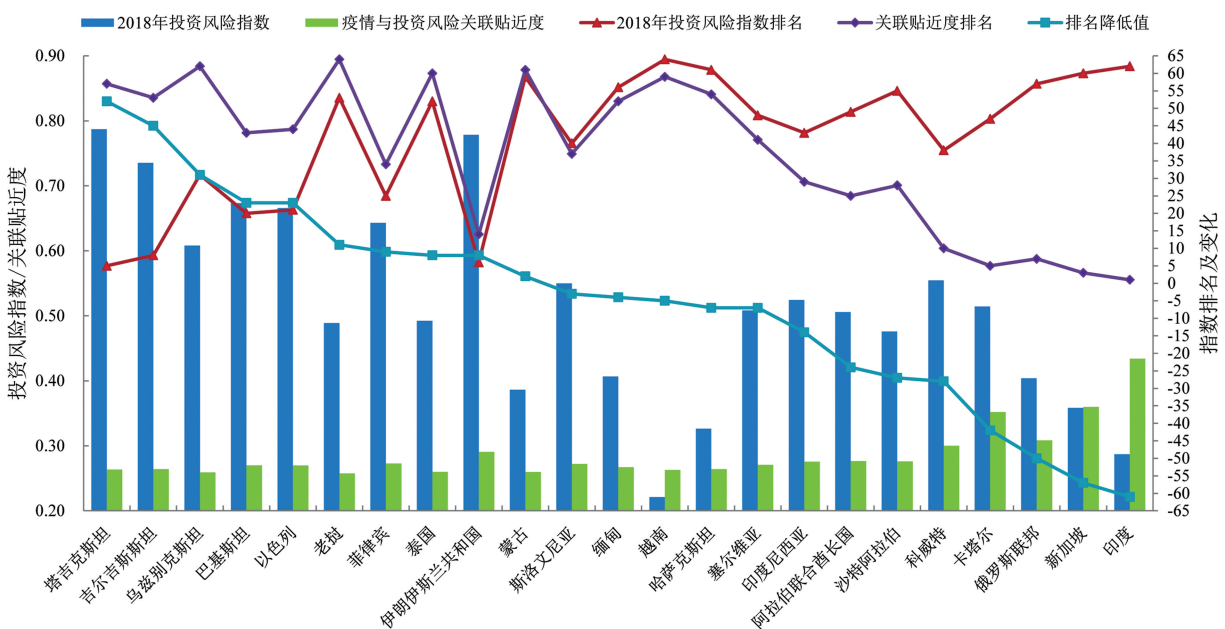


图4 “一带一路”重点能源合作国家能源投资风险指数与关联贴进度指数及排名

从“一带一路”各国能源投资风险指数与关联贴度大小及排名变化来看(图4),南亚、东盟以及西亚部分国家,如印度、新加坡等国能源投资风险较小,排名靠后,但受疫情影响较重导致关联贴度排名上升,因此在疫情冲击下其能源投资风险排名发生较大变化,在能源投资时应充分考量此类国家的经济受重大突发公共卫生事件影响的风险;而中亚部分国家,如塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦等国能源投资风险较大而受疫情影响较轻,在疫情冲击下能源投资风险排名有较大幅度下降,可成为未来中国能源合作重点考虑区域。此外,部分东盟国家,如缅甸、越南、印度尼西亚等国,以及部分中东国家,如阿联酋、沙特阿拉伯等国能源投资风险及叠加疫情因素的风险均较低,该类国家经济合作稳定性较强,可适当加大投资合作力度。综合上述分析,未来能源战略部署中建议重点考虑的国家可包括哈萨克斯坦、印度尼西亚、蒙古和沙特阿拉伯等能源较为丰富、能源合作基础好且受疫情影响相对较轻的国家。在疫情面临二次爆发形势下,中国应密切关注各国疫情变化情况,对能源投资风险进行持续跟踪评估,并及时灵活调整能源贸易合作方向。

从疫情各相关指标与叠加疫情因素的能源投资风险灰色关联度来看,关联度最高的是死亡率、过去14天确诊病例数、确诊病例总数、人口密度及人口流动等疫情相关指标,说明在当前形势下,控制疫情对降低能源投资风险具有重要作用(图5)。人口密度高、人口流动大及公共卫生条件较差的国家更易受疫情影响,如新加坡、马尔代夫等旅游国家以及印度等贫富差距大及公共服务可及性较低的国家,此类国家的当务之急是控制疫情蔓延,在此基础上逐步恢复生产,引导能源投资走上正轨。此外,疫情将对经济形成冲击,能源贸易量的削减将会导致投资风险的上升,经济结构不合理、不稳定以及能源投资

风险原本较高的国家更易受到影响,如能源丰富但产业结构单一的卡塔尔、巴林等西亚国家,可能会面临产品积压、贸易受阻等问题,亟需从自身能源结构出发,正视能源投资中的贸易短板,进行针对性的调整,从而适应和应对各方面的风险冲击。

#### 4 结 语

全球疫情爆发背景下保障国家能源安全经济社会发展稳定发展至关重要。“一带一路”沿线国家是我国能源投资与合作的重点区域,探讨疫情对沿线国家能源投资风险的影响对于保障我国能源安全具有重要意义。本文利用集对分析及关联分析评价了2000—2018年沿线国家的能源投资风险时空变化特征及疫情与各国能源投资风险的关联影响,为未来能源投资重点合作国家提供建议。结果表明,2000—2018年“一带一路”沿线国家能源投资风险整体呈现波动下降趋势,其中2000—2013年各地区能源投资风险整体呈上升趋势,南亚及西亚和北非地区能源投资风险明显加重,2013—2015年各地区能源投资风险明显下降,2015—2018年有回升态势。沿线国家能源投资风险分布格局主要表现为轻度和中度风险区国家主要分布于南亚、东盟、独联体和西亚地区经济增速较快或资源禀赋较好的国家,较高和高度风险区国家主要分布于西亚、中亚和东盟部分地区。叠加疫情因素的能源投资风险较大的国家主要集中在南亚和西亚地区,而东盟、中亚和中东地区风险相对较小。此外,叠加疫情因素后,沿线国家能源投资风险排名呈现变动,南亚、东盟以及西亚部分国家受疫情影响较重导致风险排名上升,中亚部分国家排名下降,部分东盟国家如缅甸、越南、印度尼西亚等国以及部分中东国家如阿联酋、沙特阿拉伯等国家能源投资风险及叠加疫情因素的风险

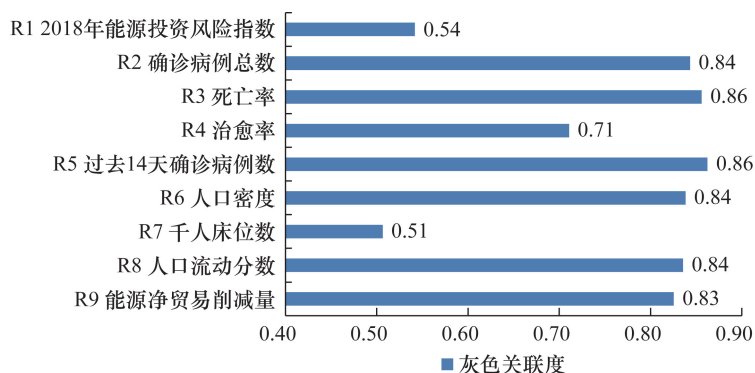


图5 各指标与叠加疫情因素的能源投资风险的灰色关联度

排名均较低。从各指标与叠加疫情因素的能源投资风险灰色关联度总体来看,关联度最高的是死亡率、过去14天确诊病例数、确诊病例总数、人口密度及人口流动等疫情相关指标,人口密度高、人口流动大及公共卫生条件较差的国家更易受疫情影响,能源贸易量的削减将会导致投资风险的上升,经济结构不合理、不稳定以及能源投资风险原本较高的国家更易受到影响。

综合考虑各国能源禀赋及与我国能源合作联系,进一步结合能源投资风险评价以及疫情对其的关联影响分析,未来能源战略部署中建议重点考虑的国家可包括哈萨克斯坦、印度尼西亚、蒙古和沙特阿拉伯等能源较为丰富、能源合作基础好且受疫情影响相对较轻的国家。此外,为应对突发事件对我国能源投资及能源安全的影响,我国也应重视能源投资贸易结构的多样化,未来通过建设中蒙俄经济走廊、中亚天然气管道、中缅油气管道等项目,减轻高度风险区的“钉子户”塔吉克斯坦、东帝汶以及尼泊尔等国的投资风险,以资源共享、优势互补带动区域整体发展,改变较为单一的能源投资及贸易结构,进一步保障我国能源安全及提升其应对突发事件的能力。值得特别关注的是,随着秋冬季节病毒适应性增强,当前疫情存在第二波爆发倾向,俄罗斯出现日增上万病例情况,而在亚洲,印度、尼泊尔等国疫情也居高不下,使中国与“一带一路”国家能源合作风险进一步加大。从短期来看,中国的能源投资进展较为有序,现有合作将不会受到剧烈影响,但疫情对能源投资风险的长期影响仍需持续追踪,是下一步需深入研究的方向。

### 参 考 文 献

- [1] 陈志钢,詹悦,张玉梅,等. 新冠肺炎疫情对全球食物安全的影响及对策. 中国农村经济, 2020, 5: 2—12.
- [2] 陈锡康,杨翠红,鲍勤,等. 新冠肺炎疫情对中国经济的影响分析与对策建议. 中国科学院院刊, 2020, 35: 1—5.
- [3] Eroğlu H. Effects of COVID-19 outbreak on environment and renewable energy sector. Environment Development and Sustainability, 2020, 3: 1—9.
- [4] Duan F, Ji Q, Liu B, et al. Energy investment risk assessment for nations along China's Belt & Road Initiative. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 535—547.
- [5] Zhang J. Oil and gas trade between China and countries and regions along the 'Belt and Road': a panoramic perspective. Energy Policy, 2019, 129: 1111—1120.
- [6] Graff M, Carley S. COVID-19 assistance needs to target energy insecurity. Nature Energy, 2020, 5(5): 352—354.
- [7] Wu Y, Wang J, Ji S, et al. Renewable energy investment risk assessment for nations along China's Belt & Road Initiative: an ANP-cloud model method. Energy, 190: 116381.
- [8] Rahman MM, Fattah IMR, Ong HC, et al. Impact of COVID-19 on the social, economic, environmental and energy domains: lessons learnt from a global pandemic. Sustainable Production and Consumption, 2021, 26: 343—359.
- [9] 袁家海,曾昱榕. 基于熵权 Topsis 灰色关联的“一带一路”国家电力投资风险评价研究. 华北电力大学学报(社会科学版), 2019, 3: 32—40.
- [10] 李博. 辽宁沿海地区人海经济系统脆弱性评价. 地理科学, 2014, 34(6): 711—716.
- [11] 那伟,刘继生. 辽源市经济系统的脆弱性及其规避措施研究. 地理科学, 2009, 29(5): 666—672.
- [12] 赵克勤. 集对分析及其初步应用. 大自然探索, 1994, 1: 67—72.
- [13] 李锋. 基于集对分析法(SPA)的中国旅游经济系统脆弱性测度研究. 旅游科学, 2013, 27(1): 15—28+40.
- [14] 韩瑞玲,佟连军,佟伟铭,等. 基于集对分析的鞍山市人地系统脆弱性评估. 地理科学进展, 2012, 31(3): 344—352.
- [15] 酆天映,彭建,刘焱序,等. 基于集对分析的区域生态文化健康评价——以云南省大理白族自治州为例. 地理科学进展, 2017, 36(10): 1270—1280.
- [16] Hosseini SE. An outlook on the global development of renewable and sustainable energy at the time of COVID-19. Energy Research & Social Science, 2020, 68: 101633.
- [17] Song J. COVID-19, climate change, and renewable energy eesearch: we are all in this together, and the time to act is now. Acs Energy Letters, 2020, 5(5): 1709—1711.
- [18] 李恩,黎姿,温志盛,等. 基于灰色关联分析法与熵权法的地区供水能力评估模型. 科技经济导刊, 2016, (17): 178—179.
- [19] 李健,周慧. 中国碳排放强度与产业结构的关联分析. 中国人口资源与环境, 2012, 22(1): 7—14.
- [20] 中国一带一路网. 中国一带一路网各国概况. (2019-01-01)/[2019-11-21]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/>.
- [21] 邹嘉龄,刘春腊,尹国庆,等. 中国与“一带一路”沿线国家贸易格局及其经济贡献. 地理科学进展, 2015, 34(5): 598—605.
- [22] 赵亚博,刘晓凤,葛岳静. “一带一路”沿线国家油气资源分布格局及其与中国合作中的相互依赖关系. 地理研究, 2017, 36(12): 2305—2320.
- [23] Kraemer MUG, Sadilek A, Zhang Q, et al. Mapping global variation in human mobility. Nature Human Behavior, 2020, 4: 800—810.
- [24] 马贵凤,李载驰,雷仲敏. “一带一路”主要能源合作国家识别及投资环境评价. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 45—54.

## The Effects of COVID-19 Pandemic on Energy Investment Risk in Countries along China's Belt & Road Initiative

Li Zhihui<sup>1, 2, 3</sup>    Qi Lin<sup>4</sup>    Deng Xiangzheng<sup>1, 2, 3\*</sup>    Chen Zhongfei<sup>5</sup>

1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

2. *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4. *College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358*

5. *School of Economics, Jinan University, Guangzhou 510632*

**Abstract** The countries along China's Belt & Road Initiative (BRI) are key regions for China's energy investment. Quantitative assessments of China's energy investment risks in the countries along the BRI and the effects of the COVID-19 pandemic on the risks are of great significance for optimizing China's energy investment layout to cope with the impact of emergencies. In this paper, set pair analysis was employed to evaluate the temporal and spatial variation characteristics of energy investment risks in countries along the BRI from 2000 to 2018, and the effects of the COVID-19 pandemic on energy investment risks was analyzed based on relational analysis. The results show that the energy investment risks of the BRI countries present a fluctuating decreasing trend. Countries with mild and moderate risk are mainly located in South Asia, the ASEAN area, the CIS area and West Asia region with relatively fast economic growth or good resource endowment. Countries with relatively-high and high risk are mainly located in West Asia, Central Asia and parts of the ASEAN area. Taken epidemic factors into consideration, the energy investment risk ranking of the BRI countries present changes. The risk ranking of some countries located in the ASEAN area, South Asia, and West Asia increases, while it drops in some countries located in Central Asia. Specifically, for some ASEAN members, such as Myanmar, Vietnam and Indonesia, and some Middle East countries, such as the United Arab Emirates and Saudi Arabia, the rankings of energy investment risk are low with or without considering epidemic factors. Nations with high population density, high population mobility and poor public health conditions are more vulnerable to the epidemic. The reduction of energy trade will lead to the increase of investment risks. Based on the evaluation results, under the current conditions of cooperation and considering the impact of the COVID-19 pandemic, countries with abundant energy resources, good foundation of energy cooperation and relatively little impact from the pandemic, such as Kazakhstan, Indonesia, Mongolia and Saudi Arabia, should be given priority consideration in the proposed future energy strategic deployment.

**Keywords** energy investment risks; COVID-19 pandemic; set pair analysis; relational analysis; China's Belt & Road Initiative

(责任编辑 张强)

\* Corresponding Author, Email: dengxz@igsnr.ac.cn