

The Western Land Energy Channels Security Risk Assessment Research under “The Belt and Road” Initiative

Gang Wang*, Huaren Zhou, Jia Yao

Basic Department, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu
Email: *627557126@qq.com

Received: Jun. 15th, 2020; accepted: Jul. 15th, 2020; published: Sep. 15th, 2020

Abstract

Energy security is an important component of the overall national security concept. Based on strategic considerations, while strengthening the security of maritime energy channel, China has also made great efforts to plan and build onshore energy channel. The western region is a major national priority. On the basis of risk measurement expressions, this paper selects safety risk indexes from micro and macro perspectives and conducts systematic evaluation based on AHP-PCA weighted model. The results show that the safety risk probability of China-Kazakhstan crude oil pipeline is the lowest while that of China-Pakistan Iran pipeline is the highest. Taking the energy design throughput as loss, it can be concluded that section A/B/C of the China-Central Asia natural gas pipeline has the highest safety risk, while the China-Pakistan-Iran crude oil pipeline has the lowest safety risk. The author suggests to improve the national energy database construction, strengthen the systematic assessment of the risk probability of countries along the route, and calculate the risk that the country can bear, so as to plan the design throughput of each route.

Keywords

Onshore Energy Channels, Safety Risk, Comprehensive Evaluation, Analytic Hierarchy Process, Principal Component Analysis

*通信作者。

“一带一路”倡议下西部陆上能源通道安全风险评估研究

王 刚*, 周华任, 姚 佳

陆军工程大学基础部, 江苏 南京
Email: *627557126@qq.com

收稿日期: 2020年6月15日; 录用日期: 2020年7月15日; 发布日期: 2020年9月15日

摘 要

能源安全是国家总体安全观的重要组成部分。基于战略考虑, 中国在加强海上能源通道安全保障的同时, 也着力规划和构建陆上能源通道, 西部地区则是国家的重点布局方向。本文在风险计量表达式的基础上, 从微观和宏观视角选取安全风险指标, 基于AHP-PCA加权模型进行系统评估。结果表明中哈原油管道安全风险概率最低, 中巴伊管道安全风险概率最高。再将能源设计输送量记为损失, 得到中国-中亚天然气管道A/B/C段安全风险最大, 中哈原油管道安全风险最小。建议完善国家能源数据库建设, 加强对沿线国家风险概率系统评估, 计算国家可承受风险, 以此规划各线路的设计输送量。

关键词

陆上能源通道, 安全风险, 综合评价, 层次分析法, 主成分分析

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

中国是一个能源消耗大国, 石油和天然气的对外依存度较高, 分别在 70%和 40%左右。在较长时间内, 中国的能源进口严重依赖海上通道, 经马六甲海峡运输到中国的石油, 占中国进口石油总量的 80%以上, 这对中国的能源安全构成巨大潜在风险。相比海上通道, 陆上通道往往距离更短, 途经国家更少, 安全可控性更高; 但陆上通道对基础设施联通和运营的要求更高, 前期投入较大, 因而发展较缓。不过, “一带一路”倡议恰为陆上能源通道的构建创造了绝佳条件。据 HIS 数据统计, 在“一带一路”沿线区域内, 石油可采储量占世界总储量的 55%, 天然气储量占世界总储量的 74%, 加强国家间能源贸易与合作符合各国利益。因此, 无论从海运风险控制、能源供应多元化还是地缘经济合作等多重视角看, 构建陆上能源通道不仅非常必要, 而且切实可行。当前, 中国已基本形成向西北、西南和东北三线并进构建陆上能源通道的格局, 并且, 从地理位置看, 西部方向将具有更大的潜力。

开展陆上能源通道安全风险评估可以为政策制定者和能源建筑、运营相关人士提供辅助决策支持, 具有较强的现实意义。在安全指标选取上, Kiriyama (2014)从地理政治、经济、相关政策和技术的四方面对

能源安全进行评估[1]。Geng (2014)在四个维度中构建 7 个指标评估中国能源安全[2]。陈德峰(2008)指出向西开放是中国能源保障和开发利用的战略举措,并阐释地缘环境、脆弱生态和设施技术等将对通道安全造成不利影响[3]。李琪(2007)认为西北方向是中国开展能源合作的聚焦点,并梳理地缘政治、技术和投资等对通道安全的影响[4]。吴玉杰和李军等(2019)通过分析管道失效的统计数据,归纳得出通道安全微观层面风险指标[5]。吕敏和帅斌等(2019)认为微观运营风险不适合具有较大地理空间差异且受国际宏观因素影响的跨国通道风险评估,构建了包括经济、主权信用、政治和法律社会等在内的宏观风险评估体系[6]。谢明华和杨明珠(2016)梳理了陆上油气通道的地缘政治和安全环境[7]。此外,在评估方法选取上,贝叶斯网络、层次分析法、模糊综合评价、主成分分析和云模型等均有被用于风险评估[8]-[13]。笔者认为从微观和宏观视角共同考虑陆上能源通道安全风险来源,同时,由于设计的指标体系具有层次性和专业性,因而层次分析法是一项适用的方法。不过,层次分析法在指标较多的情况下难以对各项指标的重要性进行有效排序,这将导致指标定权的计算过程难以进行。因此,笔者还将借助主成分分析方法进行处理。

2. 西部陆上能源通道概况

当前,中国陆上能源通道已初定格局,将以西部方向为打造重点,形成以石油、天然气管道为主,铁路、公路运输为辅的综合渠道。其中,管道是陆上能源通道中最主要的渠道,具有运输量大,速度快,安全性相对较高等特点;铁路运量有限,且运输成本相较于管道较高,一般作为补充形式。因此,后续研究的陆上能源通道将主要考虑能源管道。

2.1. 中哈原油管道

中哈原油管道起于哈萨克斯坦西部的阿特劳,止于我国新疆距国境线 2.2 公里的阿拉山口末站,管道全长 2798 公里,管径 610/813 毫米,设计压力 6.3 兆帕斯卡,设计输送能力为 2000 万吨/年。其中,阿塔苏—阿拉山口段于 2006 年 7 月 20 日投入商业运行;阿特劳—阿塔苏段于 2009 年 7 月建成投产,管道实现全线贯通。截止 2019 年 3 月底,中哈原油管道累计输送达到 1 亿吨。

2.2. 中国 - 中亚天然气管道 A/B/C 段

A、B、C 三线气源来自土库曼斯坦的阿姆河天然气公司和国家天然气康采恩、乌兹别克斯坦国家输气公司,起始于阿姆河右岸的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦边境,经乌兹别克斯坦中部和哈萨克斯坦南部,从阿拉山口进入中国。其中土库曼斯坦境内 188 公里,乌兹别克斯坦境内长 530 公里,哈萨克斯坦境内长 1300 公里。A/B 段分别于 2009 年和 2010 年率先建成运营,设计年输量达 300 亿立方米,采用 X70 钢管,干线管径 1067 毫米,设计压力 9.8 兆帕斯卡。2014 年,C 线正式运行,采用目前世界上在用等级最高的 X80 钢级管道钢材,设计年输量达 250 亿立方米。自此,A/B/C 三线合计年输量达 550 亿立方米,且该三条线路为并行敷设,都将经过土库曼斯坦、乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦,最后进入中国。

2.3. 中缅天然气管道、原油管道

石油、天然气双线并行的中缅油气管道于 2010 年 6 月正式开建,起点位于缅甸西海岸马德岛,经缅甸若开邦、曼德勒省等地,从云南瑞丽入境。中缅原油管道缅甸段长达 771 公里,国内段输油管线全长 1631 公里,主要转运来自中东和非洲地区的石油。中缅天然气管道起点位于缅甸皎漂港,缅甸段长 793 公里,国内输气管线长 1727 公里,按协议初步设定年输原油和天然气量分别为 2200 万吨和 120 亿立方米。2013 年 9 月,中缅天然气管道全线贯通。2015 年 1 月,中缅原油管道全线贯通。

2.4. 在建中和拟规划的能源通道

中国 - 中亚天然气管道 D 线预计 2021 年建成, 线路较 A/B/C 段发生变化, 将途径乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦, 最后进入中国新疆, 管道全线长 1000 公里, 其中塔吉克斯坦境内管道长达 410 公里, 乌兹别克斯坦约 220 公里, 吉尔吉斯斯坦约 210 公里。设计年输气量达 300 亿立方米。

此外, 中俄西线油气管道和中巴油气管道仍在筹划中。

3. 安全评估指标选取与 AHP-PCA 加权模型构建

3.1. 安全评估指标选取

国内外关于风险的定义有较多的解释, Fell R 和 Hartford D (1997)提出的“风险 = 损失 × 概率”表达式得到较多认可[14], 笔者将在该表达式的基础上进行系统评估, 把管道设计输送量记为风险损失, 再对陆上能源通道风险概率进行评估, 最后求得安全风险。

通常, 风险概率无法直接度量, 但一般安全威胁程度越高, 风险概率越大, 反之越小。因此, 本文将以安全威胁程度的高低间接度量风险概率的大小。这里, 评价陆上能源通道安全威胁程度的指标主要从微观因素和宏观因素进行选取。一般, 评价运输风险的微观因素包括人、机、货、环境和管理五方面, 考虑实际情况下, 货均为石油、天然气等化石能源, 对于质量鉴别量化的专业性要求较高, 这里不再设置衡量货的指标, 主要从其余四方面进行选取。同时, 陆上能源通道具有现实的地域性, 因此还需要从政治环境、经济环境和社会环境等宏观要素中选取风险指标。

参考文献和专业书刊, 并结合专家咨询意见, 依据相关性、代表性、数据可得性和可操作性等原则, 最终整理得到陆上能源通道安全评估指标体系(共 24 项三级指标)。详见表 1。

Table 1. Safety risk assessment index system for onshore energy channel

表 1. 陆上能源通道安全风险评估指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
微观层次 A	人员素质 A1	该国公民受教育水平(BTI)
		该国承包商资质水平(普氏能源资讯)
	设施条件 A2	管道建制标准(普氏能源资讯)
		物流绩效指数(W.B)
宏观层次 B	自然环境 A3	地质灾害烈度(GSHAP)
		公共部门有效性(WGI)
	运营管理 A4	该国私营部门参与的能源投资(WDI)
		政局稳定性(ICRG)
政治环境 B1	政府廉洁度(ICRG)	双边政治关系(国家智库报告)
		外部冲突指数(ICRG)
	经济环境 B2	GDP 总量(WEO/CEIC)
		GDP 五年波动系数(WDI)
通货膨胀(WEO)	贸易开放度(WDI、UNCTAD)	
	汇率波动程度(IFS、CEIC)	
		公共债务/GDP (WEO、WDI)

Continued

宏观层次 B	经济环境 B2	外债/GDP (QEDS、WDI) 外债/外汇储备(WDI、QEDS) 银行业不良资产比重(WDI)
	社会环境 B3	贸易依赖度(WDI、IMF) 内部冲突指数(BTI) 恐怖主义风险指数(GTI) 社会安全(UNODC)

3.2. AHP-PCA 加权模型

3.2.1. 评估通道沿线国家安全威胁程度，间接度量风险概率

主要基于层次分析法和主成分分析。层次分析法是一种解决复杂层次结构评估问题的有效方法，它用一定的标度对专家的主观判断进行量化[15]，逐层检验比较结果的合理性，最后依据各指标最终权值代入数据进行综合评估。主成分分析同样使用较为普遍，主要利用降维的思想，抓住问题关键，是将多个原始指标转化为少数几个综合指标的一种方法[16]。由于上述方法较为成熟，此处仅简要罗列常规步骤，仅对方法的整合之处加以重点说明。步骤如下：

1) 构造判断矩阵。针对上一层次因素而言，构建本层次与之有关的各因素之间的判断矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ ， b_{ij} 表示因素 i 与因素 j 的相对重要性。

2) 层次单排序。根据判断矩阵，计算本层次与上一层某因素重要性次序的权值，即对判断矩阵 B ，计算满足 $BW = \lambda_{\max} W$ 的特征根与特征向量，式中 λ_{\max} 为 B 的最大特征根， W 为对应于 λ_{\max} 的特征向量， W 的分量 w_i 即是相应因素单排序的权值。而后再检验矩阵的一致性。

3) 层次总排序及一致性检验。利用同一层次中所有层次单排序的结果，计算层次总排序 w_i 。而后计算总排序一致性指标 CI ，并比对总排序随机一致性指标 RI ，方法与单层一致性检验类似。检验通过，即确定出专家赋权的各指标权重。

需要注意的是，在构建判断矩阵和一致性检验时，如果指标较多，诸如本文经济环境下的三级指标，则较难得到满意的结果。于是，笔者将引入主成分分析对该部分进行处理，而后运用第一主成分的系数作为该层权重。整合步骤如下：

- 1) 求标准化问题指标的相关系数矩阵 R_{ij} ，并对其进行 KMO 检验和 Bartlett 球形检验；
- 2) 求实特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ ，及对应的 p 个标准特征向量；
- 3) 根据特征值 λ_i 的大小排序，结合方差累计贡献率和 λ_i 的变化特征确定主成分个数；
- 4) 得到主成分系数。

3.2.2. 基于加权模型计算陆上能源通道风险概率

按能源通道在沿线国家境内长度构建加权求和模型，得到陆上能源通道安全风险概率。如中哈原油管道基本从哈萨克斯坦最西的阿特劳至最东与中国交界，因此赋权为 1；而中国 - 中亚天然气管道 A/B/C 段则对塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦境内通道长度对应国家东西跨度进行加权求和。中国 - 中亚天然气管道 D 线则考虑乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦，中缅油气管道考虑缅甸段，拟规划的中巴伊段，则主要考虑巴基斯坦和伊朗。

3.2.3. 计算陆上能源通道安全风险

设定管道设计输送量记为风险损失，基于“风险 = 损失 × 概率”表达式计算求得陆上能源通道安

全风险。

4. 陆上能源通道安全风险实证评估

4.1. 数据来源及处理

4.1.1. 数据来源

根据文章设计的陆上能源通道安全风险评估思路, 本文从 WB、WDI、ICRG 等多个数据库获取沿线国家 2013~2019 年的上述指标对应数据。部分指标数据见表 2 所示。

Table 2. Some index data of countries along the belt and Road

表 2. 沿线国家部分指标数据

国家	年份	人员素质		.....	社会环境	
		该国公民受教育水平	该国承包商施工水平	.....	恐怖主义风险指数	社会安全
哈萨克斯坦	2013	6.000	0.100	.....	2.840	0.700
	2014	6.000	0.100	.....	2.370	2.000
	2015	6.000	0.100	.....	1.881	1.740
	2016	6.000	0.050	.....	0.934	1.550
	2017	6.000	0.050	.....	2.950	1.550
	2018	6.000	0.050	.....	2.228	1.550
	2019	6.000	0.050	.....	1.566	1.550
乌兹别克斯坦	2013	4.000	0.050	.....	0.270	3.200

.....	2019	5.000	0.050	.....	0.019	1.550

巴基斯坦	2013	3.000	0.000	.....	9.140	7.800

	2019	3.000	0.000	.....	7.889	4.410
伊朗	2013	4.000	0.500	.....	5.000	4.800
	2014	4.000	0.500	.....	4.900	2.000
	2015	4.000	0.500	.....	4.222	1.740
	2016	4.000	0.500	.....	3.946	1.550
	2017	4.000	0.500	.....	3.714	1.550
	2018	4.000	0.500	.....	4.399	1.550
	2019	4.000	0.500	.....	4.717	1.550

4.1.2. 数据处理

由于选取的风险评估指标既有正向也有反向指标, 为使最后评估方向统一, 即分数越高, 安全威胁程度越高, 风险概率越大, 便于实际理解。这里需首先对原始指标数据进行归一化处理, $\min x_i$ 为指标最小值, $\max x_i$ 为指标最大值。针对正向指标采用公式(1)进行处理,

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (1)$$

针对反向指标则采用公式(2)处理。

$$y_i = \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (2)$$

4.2. 实证评估

4.2.1. 评估过程

按上述 AHP-PCA 加权模型对指标数据展开实证评估。查阅相关资料并结合专家意见, 设定微观层次 A、宏观层次 B、政治环境 B1 和社会环境 B3 各层次判断矩阵数值如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ 7 & 1 & 3 & 5 \\ 5 & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 1 & 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \quad B3 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

运用 MATLAB R2018b 对上述判断矩阵进行运算和一致性检验。得到 A1-A4 权重为 0.0553, 0.5650, 0.2622, 0.1175; B1-B3 权重为 0.4286, 0.1429, 0.4286; B1 下层各指标权重为 0.1998, 0.0781, 0.1998, 0.5222; B3 下层指标权重为 0.2583, 0.6370, 0.1047。

经济环境 B2 层将运用主成分分析进行定权, 运用 SPSS 24 完成以下运算。总方差解释和成分系数矩阵如表 3 和表 4 所示。

从主成分分析结果可以看出, 经济环境 B2 下各项指标大致归为四个主成分, 可解释 72.2%。同时, 第一主成分系数全为正, 表明指标归一化后呈正相关, 在这种情况下, 可以基于第一主成分系数进行评估(何晓群, 2015), 作为权数分解。

Table 3. Total variance interpretation

表 3. 总方差解释

成分	初始特征值			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积 %	总计	方差百分比	累积 %
1	2.479	24.794	24.794	2.085	20.846	20.846
2	2.069	20.685	45.48	2.049	20.491	41.337
3	1.604	16.041	61.521	1.743	17.427	58.764
4	1.068	10.677	72.197	1.343	13.433	72.197
5	0.954	9.54	81.737			
6	0.633	6.33	88.067			
7	0.472	4.719	92.786			

Table 4. Component score coefficient matrix
表 4. 成分得分系数矩阵

	成分			
	1	2	3	4
GDP 总量(十亿美元)	0.177	-0.356	0.002	0.138
GDP 五年波动系数	0.316	0.114	-0.321	-0.216
通货膨胀	0.391	0.078	0.115	-0.122
贸易开放度	0.135	0.049	0.559	-0.027
汇率波动程度	0.163	-0.126	-0.08	0.693
公共债务/GDP	0.341	-0.023	0.034	0.112
外债/GDP	0.178	-0.013	-0.415	0.077
外债/外汇储备	0.443	0.157	-0.017	0.074
银行业不良资产比重	0.106	0.414	0.033	-0.18
银行业不良资产比重	0.105	0.379	0.083	0.112

综合上述权值计算,进行归总。得到 24 项三级指标的权值为 0.0066, 0.0155, 0.1582, 0.0678, 0.0470, 0.0235, 0.0514, 0.0201, 0.0514, 0.1343, 0.0064, 0.0115, 0.0142, 0.0049, 0.0059, 0.0124, 0.0065, 0.0161, 0.0039, 0.0038, 0.664, 0.1638, 0.0269。

代入标准化数据计算,得到哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等陆上能源通道沿线国家的安全威胁程度,以此度量风险概率。结果如图 1 所示。

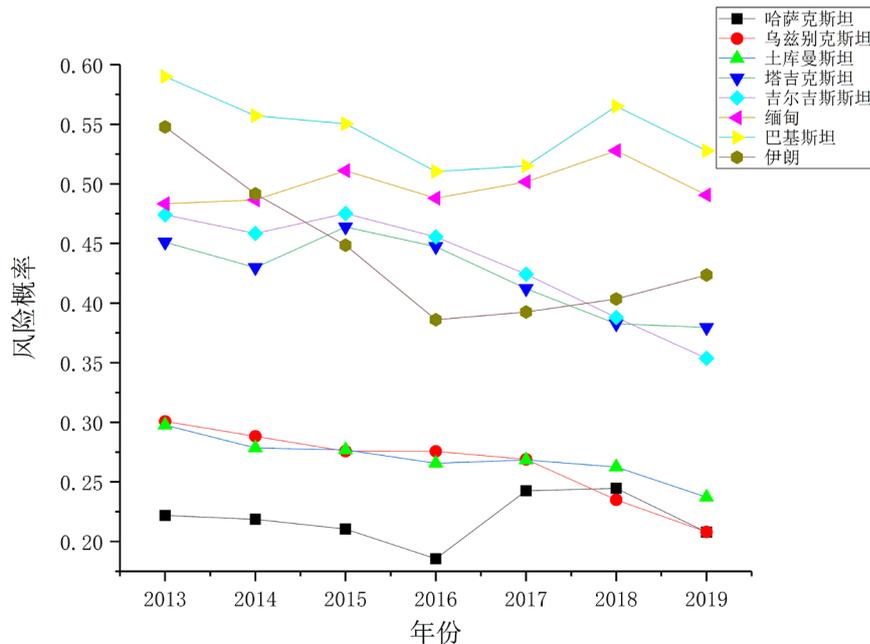


Figure 1. Risk probability graph of countries along the route
图 1. 沿线国家风险概率图

对陆上能源通道按沿线国家风险概率加权求和,此处定权按能源通道方向(东西或者南北)对应国家在该方向的国境跨度进行计算。得到各通道风险概率如图 2 所示。

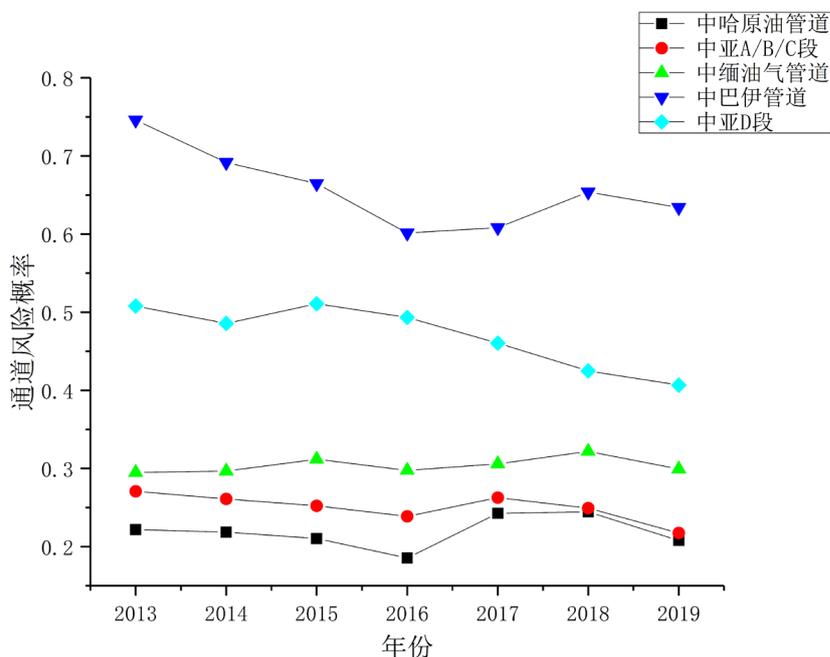


Figure 2. Risk probability diagram of onshore energy channel
图 2. 陆上能源通道风险概率图

最后基于“风险 = 损失 × 概率”表达式，以通道设计输送量占中国消耗量比重为损失。按当前的能源对外依赖度，石油较天然气对中国更为重要，分别为 70%和 40%左右，恰按此比例设置权重，计算得到已运行的陆上能源通道安全风险。并按 2019 年通道风险和预计损失测度建设中的中亚 D 段和待规划的中巴伊管道安全风险，假定中巴伊石油管道的输送设计量在 5000 万吨/年左右。结果如图 3 所示。

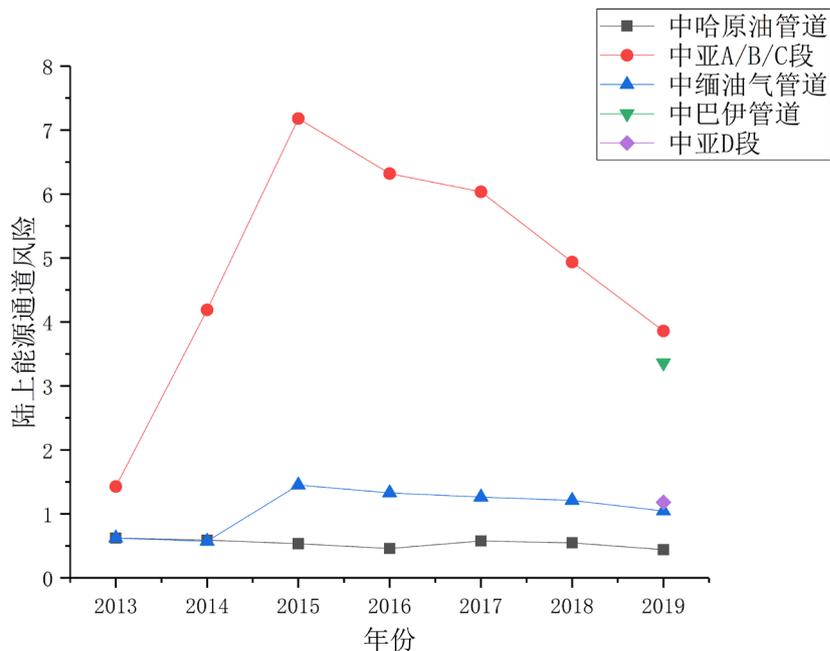


Figure 3. Onshore energy channel risk Map
图 3. 陆上能源通道风险图

4.2.2. 评估结论

能源通道沿线国家风险概率整体呈下降趋势，哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦三国最低，巴基斯坦和缅甸较高，塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦位于中等。巴基斯坦主要是由于管道建制基础较差，内外部冲突和恐怖主义活动频繁导致风险较高；缅甸的主要问题在于管道建制基础不佳，物流绩效较差和内部冲突风险较高；塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦的管道建制基础均较差，此外，塔吉克斯坦的自然地理条件较为恶劣。

同样，西部陆上能源通道风险概率整体也呈下降趋势，中哈原油管道和中国-中亚天然气管道 A/B/C 段风险概率较低，中巴伊管道和中国-中亚天然气管道 D 段风险概率较高，中缅油气管道位于中列。需要特别说明的是，中国-中亚天然气管道 D 段需要跨越多个中等风险国家，因此整体风险概率高于中缅油气管道。

最后，按管道设计输送量为损失求算的能源通道安全风险对能源通道整体布局具有一定的参考性。中哈原油管道的安全风险最低，其次是中缅油气管道，最高为中国-中亚油气管道 A/B/C 段。这主要是因为当前中国石油进口仍依赖于海上通道，陆上通道占比较小，因此，石油管道的损失低于天然气管道，整体上对中国造成的影响较小。不过随着后续陆上石油管道输送量的增加，这一局面预计将发生改变。此外，以 2019 年值预测的中巴伊管道安全风险较高，建成后的中国-中亚天然气管道 D 段与中缅油气管道安全风险近似。中亚天然气 A/B/C 段的的风险在 2015 年为最高，部分原因在于 C 线的接通使天然气输送量增加所致；同理，中缅能源通道的原油通道也于 2015 年竣工，原油输送量的增加导致安全损失增加。

5. 建议

构建陆上能源通道是一项具有战略意义的重要举措。中国当前仍处于工业化高速发展的进程中，中长期内对传统化石能源仍有较大需求。建立多元化的进口渠道是确保国家能源安全和增强主动性的必要手段，与之配套的即是打造安全且畅通的能源通道。结合上述研究，提出以下建议。

一是提升能源系统智能化水平，完善国家能源数据库建设；二是加强对沿线国家风险概率实时评估，通过国家和地区合作改善关键风险因素来源；三是计算国家可承受安全风险，以此来规划各线路设计输送量。

基金项目

本文是国家社会科学基金项目“基于大数据分析的‘一带一路’沿线国家机遇与风险评估研究”（项目批准号：17BGJ005）的阶段性成果。

参考文献

- [1] Kiriya, E. and Kajikawa, Y. (2014) A Multilayered Analysis of Energy Security Research and the Energy Supply Process. *Applied Energy*, **123**, 415-423. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.026>
- [2] Geng, J.B. and Ji, Q. (2014) Multi-Perspective Analysis of China's Energy Supply Security. *Energy*, **64**, 541-550. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.036>
- [3] 自治区政府办公厅课题组, 陈德峰. 我国陆上能源资源安全大通道战略研究[J]. 新疆金融, 2008(S1): 25-36.
- [4] 李琪. “丝绸之路”的新使命: 能源战略通道——我国西北与中亚国家的能源合作与安全[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2007(2): 77-83.
- [5] 吴玉杰, 李军, 李程. 国内外燃气管道失效率及失效原因对比与归纳[J]. 煤气与热力, 2019, 39(2): 1-5 + 44-45.
- [6] 吕敏, 帅斌, 张士行, 左静. 国家运输支撑力下的陆上丝绸之路运输通道风险测算方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11): 185-190.
- [7] 谢明华, 杨明珠. “一带一路”油气通道建设的地缘政治和安全风险[J]. 探索, 2016(2): 63-69.

-
- [8] Wu, J.S., Zhou, R., Xu, S.D., *et al.* (2017) Probabilistic Analysis of Natural Gas Pipeline Network Accident Based on Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **46**, 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.025>
- [9] Senouci, A., Elabbasy, M., Elwakil, E., *et al.* (2014) A Model for Predicting Failure of Oil Pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering*, **10**, 375-387. <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.756918>
- [10] 李军, 张宏, 梁海滨, 等. 基于模糊综合评价的燃气管道第三方破坏失效研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 140-145.
- [11] 王霞, 段庆全. 基于改进层次分析法的油气管道风险因素权重计算[J]. 油气储运, 2019, 38(11): 1227-1231.
- [12] 张杰. 基于主成分-聚类分析法的管道风险评价方法[J]. 油气储运, 2014, 33(2): 139-143.
- [13] 杨理智, 张韧. 基于云模型的我国海上能源战略通道安全风险评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(1): 74-80.
- [14] Fell, R. and Hartford, D. (1997) Landslide Risk Management. In: Cruden, D. and Fell, R., Eds., *Landslide Risk Assessment*, Balkema, Rotterdam, 51-109.
- [15] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 陈俊羊, 赵俊峰. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [16] 何晓群. 多元统计分析(第四版) [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.