

引用格式:刘立涛,沈镭,刘晓洁,等. 基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析[J]. 资源科学, 2017, 39(8): 1431-1443. [Liu L T, Shen L, Liu X J, et al. Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation[J]. Resources Science, 2017, 39(8): 1431-1443.] DOI: 10.18402/resci.2017.08.01

基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析

刘立涛^{1,2}, 沈 镭^{1,2}, 刘晓洁¹, 成升魁¹, 钟 帅^{1,2}, 曹 植^{1,2},
张 超^{1,2}, 孔含笑^{1,2}, 孙艳芝^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:本文从资源流动视角并借助复杂性网络方法, 定量刻画中国石油资源供应网络和时空格局变化趋势, 旨在通过构建石油资源供应安全模型, 模拟不同供应中断情景下中国石油资源供应安全衰减轨迹, 从而揭示中国石油资源供应安全演进特征及其主要影响因素。研究表明:①1990-2015年期间中国对世界石油资源贸易网络中其他各国的影响逐步增强, 而世界出口国对于中国石油资源进口的影响不断下降, 中国石油资源网络物资传输效率呈先降后升趋势;②中国石油资源进口来源地从亚太地区转移到中东、非洲、俄罗斯、中亚以及美洲地区;③中国石油资源供应安全历经快速提升后进入稳定发展阶段, 进口来源国政治稳定性是影响中国石油资源供应安全的关键要素;④目标性中断对中国石油资源供应安全的危害十分显著, 防范主要进口来源国的目标性中断对于保障中国石油资源供应安全至关重要。模拟结果还显示, 在进口来源区域及国家层面实施多元化战略, 如加大对俄罗斯、哈萨克斯坦、阿塞拜疆以及美洲地区的石油资源进口, 不仅有助于分散风险, 也有助于提升中国石油资源贸易网络的传输效率, 保障中国石油资源供应安全。

关键词:石油资源贸易网络; 资源流动; 时空格局; 复杂网络; 供应安全; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.08.01

1 引言

石油资源是世界的主导能源, 但其资源储量与消费量分布不均, 导致石油资源在全球范围内的重新配置和流动。2015年底, 世界石油资源总探明储量为2394亿t, 其中, 中东石油资源已探明储量最大为1133亿t, 占世界总储量的47.3%, 中南美洲、北美洲、欧洲及欧亚、非洲和亚太地区储量依次占世界的19.4%、14.0%、9.1%、7.6%和2.5%。各地区占世界石油消费的比重则依次为: 亚太34.7%、北美洲23.9%、欧洲&欧亚20.0%、中东9.8%、中南美洲7.6%和非洲4.2%^[1]。

石油还是全球重要的战略性资源。与世界经

济、政治、军事、外交等密切相关, 石油资源流动直接关系到国家安全、社会稳定和可持续发展。自1993年中国成为石油净进口国以来, 中国在全球范围内寻求石油资源保障石油供应安全的行为引起了国际社会的争论和担忧^[2-5]。中国快速增长的石油消费需求与有限的石油供给能力导致中国对进口石油的依赖不断提升。自2002年中国超越日本成为仅次于美国的世界第二大石油消费国以来, 中国石油消费以年均6%以上的速度增长。2015年, 中国石油消费量增长至5.78亿t, 占世界石油消费总量的13.3%^[1]。与此同时, 中国石油产量增速则较低, 仅为2%^[1]。有限的石油供给能力与持续快速增

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271546; 41401644; 41271547; 41501430); 中国地质调查局项目(121201103000150014)。

作者简介: 刘立涛, 女, 湖南岳阳人, 博士, 助理研究员, 主要研究领域为能源经济与安全研究。E-mail: liult@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 刘晓洁, E-mail: liuxiaojie_sd@163.com

长的消费需求造成中国石油进口依存度的大幅上升(图1)。中国石油资源进口依存度从1993年的6.6%,增长至2000年的32.7%,2008年首次超过50%,2012年首次超过60%,2014年上升至62.8%。据IEA预测显示,2030年中国石油资源进口依存度将达到75%^[6],2035年中国石油资源进口依存度将进一步增长至76%,保障中国石油资源稳定安全供应面临巨大挑战^[7]。

保障石油供应安全的思想最早可以追溯至1910年,时任海军大臣的温斯顿·丘吉尔指出石油供应的安全性和确定性在于多元化^[10]。随后,1973年爆发的第一次石油危机使得大部分工业化国家将保障石油供应安全置于能源政策核心^[11]。IEA指出石油安全即以合理的价格获得充足的石油供给,而供应来源及供应品种的多元化则有助于降低供应中断风险^[12]。有鉴于此,降低石油进口依存度^[13,14],促进石油资源和进口来源的多元化^[15-17]成为石油进口国能源安全政策的关键所在。构建单一或综合指标对不同时国家石油供应安全进行评价,是石油安全研究的常用方法^[18-22]。石油脆弱性指标^[23],APERC综合指标^[24],多元化指标^[14,15],供应风险指标^[25],等被广泛用于石油安全研究。中国学者从地缘政

治视角重点关注石油战略运输通道,主要石油来源地及其政局变化对保障中国石油供应安全的影响^[26-30]。

近年来,资源流动分析、复杂网络理论等被引入到石油供应分析之中。赵媛等对中国石油资源省际流动格局及流场特征^[31]、形成机制^[32]、要素组合关系^[33]、集中与离散趋势及其位移和形变特征^[34]等进行了研究。刘晓洁等从宏观、中观和微观层面上分析了石油资源流动的空间格局、演变模式及其特征,揭示了石油资源流动的社会、经济和环境效应^[35,36]。安海忠等阐述了国际石油贸易无权和加权网络的度分布、中心性、度相关性、强度分布和加权集聚系数的演化规律^[37],揭示了全球石油市场一体化与多元化演进特征^[38]。Ji等、Zhang等揭示了全球石油贸易网络的全局特征,区域特征、稳定性及其驱动因素^[39,40]。YANG等研究表明,全球石油贸易网络呈现出小世界和扁平化特征^[41]。

当前,虽然石油资源安全评价及石油资源贸易网络相关方面的研究成果较为丰富,但是将石油资源流动时空格局与石油资源供应安全相结合,开展石油资源供应安全情景模拟的成果较为鲜见。中国是一个人口大国,其工业化和城镇化进程还远未完成,生产和生活能源消费都还处于快速增长阶

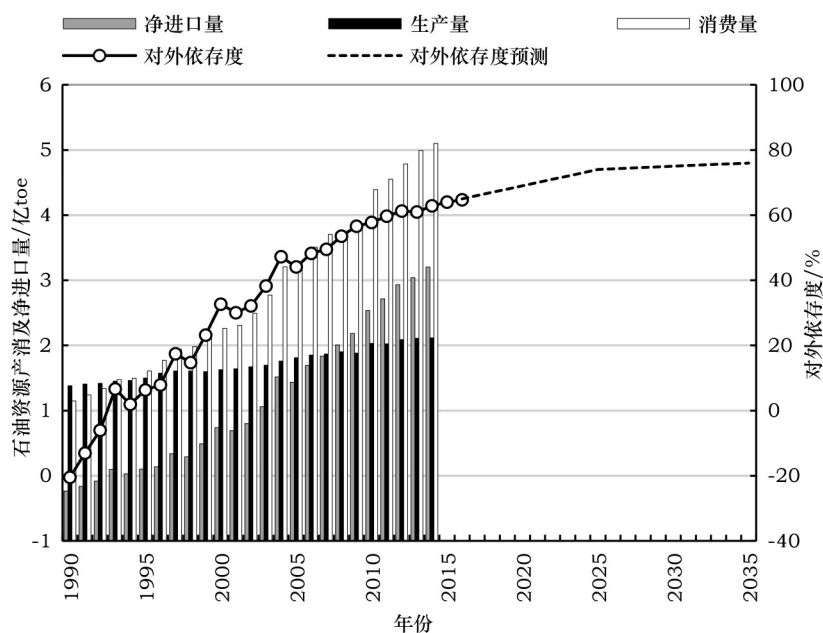


图1 1990–2035年中国石油资源进口对外依存度演变

Figure 1 China's oil import dependence from 1990 to 2035

注:石油生产、消费量数据来自文献[8],净进口量数据来自国家海关总署及文献[9],石油对外依存度预测数据根据文献[1,6]整理。

2017年8月

段^[42]。如何保障中国石油资源的稳定安全供应是当前中国能源安全战略的核心问题。分析过去25年中国石油资源供应网络的变化趋势,模拟不同石油资源供应中断情景下中国石油资源供应安全变化趋势,揭示不同情景下中国石油资源供应安全衰减轨迹及其特征,是积极应对石油资源供应中断风险,保障中国石油资源供应安全的基础。本文借助R统计软件和ArcGIS空间分析技术,在分析中国石油资源供应网络的变化趋势,刻画中国石油资源流动时空格局的基础上,通过构建不同的石油资源供应安全模型,设置不同供应中断情景对中国石油资源供应安全衰减轨迹进行模拟,以期把握中国石油资源贸易网络及供应安全现状,制定中国石油资源安全策略提供科学依据。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 石油流动网络指标的构建

基于复杂网络理论,可以将中国与世界其他国家之间的石油进出口流动抽象为由点与线构成的中国石油贸易网络 $G=(V,E)$ 。其中, n 表示参与贸易的国家, $N=|V|=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点,国家之间的贸易量 $M=|E|$ 为边,石油进出口流动方向由有向线表示(图3)。 f_{ij} 表示从 j 国出口石油到 i 国的数量(万 t /年), T_i^{import} 为 i 国进口石油的总量,假设石油出口总量等于石油进口总量。

$$T_{i,t}^{import} = \sum_{j=1}^n f_{ji,t} \quad (1)$$

$$T_{j,t}^{export} = \sum_{i=1}^n f_{ij,t} \quad (2)$$

式中 $T_{i,t}^{import}$ 为 t 年 i 国进口石油的总量; $T_{j,t}^{export}$ 为 t 年 j 国出口的石油总量。

$$\sum_{i=1}^n T_{i,t}^{import} = \sum_{j=1}^n T_{j,t}^{export} \quad (t=1990, 1991, \dots, 2015) \quad (3)$$

式中 $T_{i,t}^{import}$ 为 t 年 i 国进口石油的总量; $T_{j,t}^{export}$ 为 t 年 j 国出口的石油总量。

根据复杂性网络分析,本文从度及度分布、度的中心性、集群与群落等方面开展石油流动复杂网络的统计分析。

(1)石油流动网络的度。在无向网络图中,度($k_{i,t}^{degree}$)通常指与节点相连的边数;在有向网络图

中,根据与节点相连的边指向不同可以分为“入度”($k_{i,t}^{in-degree}$)与“出度”($k_{i,t}^{out-degree}$)。在中国石油进出口贸易网络中,度为“入度”与“出度”之和(公式(4)-公式(6)), $a_{ji,t}$, $a_{ij,t}$ 分别为 t 年从 j 国进口石油到 i 国的边数(“入度”)和从 i 国出口石油到 j 国的边数(“出度”)。若 i 与 j 国之间存在石油进出口流动则 $a_{ji,t}$, $a_{ij,t}=1$,否则 $a_{ji,t}$, $a_{ij,t}=0$ 。

$$k_{i,t}^{in-degree} = \sum_{j=1}^n a_{ji,t} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$k_{i,t}^{out-degree} = \sum_{j=1}^n a_{ij,t} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$k_{i,t}^{degree} = k_{i,t}^{in-degree} + k_{i,t}^{out-degree} \quad (6)$$

本文中,入度为中国石油的进口国数量,出度指中国石油的出口国数量,度为进口国与出口国数量总和。一般地,一国石油进出口贸易网络度越大,与该国建立石油贸易联系的国家越多,其关系结构越复杂,则该国在石油贸易网络中的影响力也越大。

(2)石油流动网络的密度(density)。密度 Δ 指实际存在的贸易联系 L 占所有可能贸易联系的比例。在由 N 个国家构成的有向石油贸易网络中,最多可能的贸易联系量为 $N(N-1)$ 。密度反映的是石油贸易网络关系的密切程度,密度越大表示石油贸易网络成员之间的关系越密切^[43]。

$$\Delta = \frac{L}{N(N-1)} \quad (7)$$

(3)石油流动网络的紧密中心度(Closeness centrality)。 t 年紧密中心度 $C_{i,t}$ 是通过测度节点与其他节点最短距离之和的网络中心度,紧密中心度数值越大则该节点与其他节点之间的关系越密切。其中, d_{ij} 为 t 年石油贸易网络中任意两个国家 i 与 j 之间的测地线长度, N 为贸易网络中的国家数量(节点数),紧密中心度计算公式如下^[44]:

$$C_{i,t} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i}^n d_{ij,t} \right]^{-1} = \frac{n-1}{\sum_{j \neq i}^n d_{ij,t}} \quad (8)$$

(4)石油流动网络的直径与平均路径长度(Diameter and Average Path Length)。网络直径 $D_{i,j,t}$ 指在石油贸易网络中任意两个国家 i 与 j 之间的最长测地线(geodesic)距离,平均路径长度 $L_{i,j,t}$

指石油贸易网络中任意两个国家*i*与*j*之间测地线长(最短路径)的平均步数,常用于测度信息或者物资在网络中传输的效率。一般而言,越短的网络直径和平均路径长度有助于信息的快速传送和降低传输成本。网络直径与平均路径长度计算如下:

$$D_{i,j,t} = \max_{i,j} d_{ij,t} \quad (9)$$

$$L_{i,j,t} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij,t} \quad (10)$$

式中 d_{ij} 为石油贸易网络中任意两个国家*i*与*j*之间测地线长; N 为贸易网络中的国家数量(节点数)。

2.1.2 供应安全模型的构建

多元化是应对石油供应中断风险的重要途径^[45],被石油进口国作为保障本国石油供应安全的重要战略^[14]。香农-维纳指数(Shannon-Wiener Index, SWI)^[46]和赫芬达尔-赫希曼指数(Herfindahl-Hirschman Index, HHI)^[47]是测度多样性最常用的两个指数。当前,石油供应安全及稳定性模型大多基于SWI和HHI指数构建。Blyth等运用HHI对能源供给者的能源供应安全性进行了研究^[48],Gupta运用修正HHI,对26个石油净进口国家2004年的石油供应脆弱性进行研究^[23],Le Coq等认为HHI更适于测度单一能源结构所引致的风险,并认为进口依存度,能源进口多元化,供给商国家政治风险,能源运输及在能源供给者之间转换的难易程度是影响能源安全最主要的因素^[49]。考虑到,SWI对占据市场份额较小的供给者赋予较大权重,而HHI对占据市场份额较大的能源供给者赋予较大权重。随着市场参与者数量的增加SWI值域不断扩大从而造成了市场之间的不可比^[50]。McFalls认为HHI是测度市场集中度最简单和精确的方法^[51]。一般地,我们认为较大的石油供应商对于进口国石油供应安全的影响更大,有鉴于此,本文基于HHI指数构建石油资源供应安全指数测度短期石油供应安全。

由于石油资源供应安全的影响因素众多,本文在HHI指数基础上,通过逐步加入中国石油资源进口来源国政治风险、运输距离因素构建石油资源供应安全评价模型,具体公式如下所示:

$$S_{i,t}^0 = \left[\sum_j \left(\frac{f_{ji,t}}{\sum_j f_{ji,t}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (j \neq i) \quad (11)$$

$$S_{i,t}^1 = \left[\sum_j \left(\frac{f_{ji,t}}{\sum_j f_{ji,t}} \right)^2 \times P_{j,t} \right]^{-1} \quad (j \neq i) \quad (12)$$

$$S_{i,t}^2 = \left[\sum_j \left(\frac{f_{ji,t}}{\sum_j f_{ji,t}} \right)^2 \times d_{ji} \right]^{-1} \quad (j \neq i) \quad (13)$$

$$S_{i,t}^3 = \left[\sum_j \left(\frac{f_{ji,t}}{\sum_j f_{ji,t}} \right)^2 \times P_{j,t} \times d_{ji} \right]^{-1} \quad (j \neq i) \quad (14)$$

$$P_{j,t} = \frac{100 - PRS_Risk_{j,t}}{100} \quad (15)$$

$$d_{ji} = 1 - D_{ji}^{-1} \quad (16)$$

式中 $S_{i,t}^0$, $S_{i,t}^1$, $S_{i,t}^2$, $S_{i,t}^3$ 为*t*年进口国*i*的不同情境下的石油资源供应安全指数; $f_{ji,t}$ 为*t*年从*j*国流入*i*国的石油量; $PRS_Risk_{j,t}$ 为石油出口国*j*在*t*年的政治风险评级指数; $P_{j,t}$ 为石油出口国*j*在*t*年标准化的政治风险评级指数,该值分布在0~1之间,值越大表示该国的政治风险越大; D_{ji} 为石油出口国*j*到石油进口国*i*的欧氏距离; d_{ji} 为标准化的距离,分布在0~1之间,数值越大表示距离越远。

2.1.3 供应中断情景的设置

复杂性网络理论将节点*i*的脆弱性定义为去除该节点后所引起的网络效率变动^[52]。Ji等将石油出口国的重要性定义为当该石油出口国中断供应时所引致的石油贸易网络稳定性变化。借鉴上述成果,本文将中国石油供应网络中出口国的重要性定义为当石油出口国*j*中断供应时所引致的中国石油供应安全变化(公式(17))。分别设置随机和目标性两种供应中断情景,对中国石油供应安全进行模拟。其中,随机性中断情景指从中国石油进口来源国所组成的数据集中,每次无放回随机抽取一个国家假设其中断供应,直至中国所有石油进口来源国均处于供应中断状态;目标性中断情景指从中国石油进口来源国所组成的数据集中,依据其对中国石油进口的重要程度,按照由大到小的次序无放回抽取,直至中国所有石油进口来源国处于供应中断状

2017年8月

态。目标性中断情景假设出口国占中国石油进口份额越大,则该国对保障中国石油供应安全越重要。分别考察不同供应中断情景对中国石油供应安全的影响以及两种情景下中国石油供应安全的变化趋势。

$$M_{j,t} = \frac{S_t - S_{j,t}}{S_t} \quad (17)$$

式中 $M_{j,t}$ 为石油出口国 j 在 t 年的重要性; S_t 为无供应中断时的中国资源石油供应安全性; $S_{j,t}$ 为当石油出口国 j 中断供应时的中国石油资源供应安全性。

2.2 数据来源

本文以1990-2015年中国及其石油进出口贸易国作为“网络的点”,石油进出口流量作为“边”,构建中国石油资源贸易网络。世界石油探明储量及消费数据来源于2016年BP世界能源统计年鉴^[1]。中国石油贸易、净进口总量数据来源于国家海关总署,石油生产和消费总量数据来源于《中国统计年鉴2015》^[8]和2015年国民经济和社会发展统计公报。政治风险评级指数(Political Risk Rating)是用于测度出口国政府能力(Government Ability)、社会经济状况、投资情况、国内外冲突等的综合性指标,该值分布在0~100之间,政治风险评级指数越大说明该国风险越低,政治越稳定,反之则风险越高。1990-2015年政治风险评级指数分月数据来源于the PRS Group (www.prsgroup.com),本文采用12个月平均值作为该年的政治风险指数。除进口国石油对外依存度、政治稳定性以外,石油运输通道的安全性也是重要影响因素。由于缺乏石油通道脆弱性、运输通道替代路线等相关数据,本文借鉴文献[50]的做法,采用石油出口国与进口国之间的运输距离来表征运输渠道中断的潜在风险。通过进出口国经纬度数据计算出口国与中国之间的欧氏距离代表运输距离。

3 结果及分析

3.1 网络变化趋势及时空格局

3.1.1 石油资源流动网络特征分析

(1)石油资源流动网络的度。在石油出口国家数量(出度)相对稳定而进口国家数量(入度)快速

增长的作用下,中国石油贸易网络度迅速增加(图2a)。1997年,党的十五大上提出:“要更好地利用国内国外两个市场、两种资源”;2000年初,中央首次把“走出去”战略上升到“关系我国发展全局和前途的重大战略之举”,并于2001年正式写入《国民经济和社会发展第十个五年计划纲要》;2003年《中共中央关于完善社会主义市场经济体制若干问题的决定》指出继续实施“走出去”战略。在上述政策背景下,中国实施石油资源进口来源多元化战略以保障石油供应安全。在此期间,中国石油资源流动网络的进口来源国家数量即入度从1990年的6个快速增加到2015年的42个,进出口国家总数(度)则

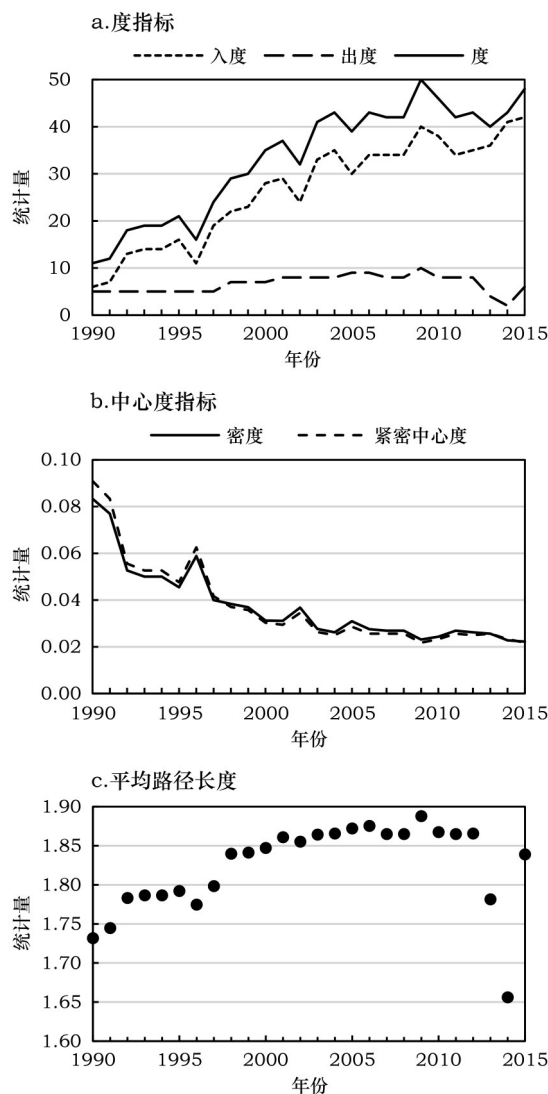


图2 1990-2015年中国石油资源贸易网络指标变化趋势

Figure 2 The evolution of China's oil trade network measures from 1990 to 2015

从11个快速增加到2015年的48个。同时,中国石油资源出口国家数量(出度)则呈先增加后减少相对稳定的变化趋势,出口国家数量从1990年的5个逐步增加至2009年的10个随后降低到2014年的最低值2个,截止2015年,中国石油出口国家数量为6个。

(2)石油资源流动网络的密度与紧密中心度。密度与紧密中心度逐年递减,中国与石油贸易网络中其他国家之间关系的密切程度呈下降趋势(图2b)。伴随着中国石油贸易网络规模的不断壮大,网络密度从1990年的0.083下降至2015年的0.022;与此同时,紧密中心度则从1990年的0.091下降至2015年的0.022。中国石油贸易网络密度与紧密中心度的下降,一方面源于网络仅考虑了与中国存在直接石油进出口贸易的关系,其他国家之间的石油进出口关系没有纳入计算范围;另一方面,随着中国石油进口多元化战略的实施,各个出口国对中国石油进口的重要性均在下降。

(3)石油资源流动网络的平均路径长度。平均路径长度先增后减致使中国石油贸易网络石油物资传输效率先降后升。伴随着中国石油贸易网络规模的不断扩张,中国石油贸易网络的平均路径长度呈现先增后减的趋势(图2c)。中国石油贸易网络节点数从1990年的11个增加至2009年的最大值50个,2013年降至阶段低值40个,截止2015年,中国石油贸易网络节点数增加至48个。中国石油贸易网络平均路径长度从1990年的1.732增加至2009年的最大值1.888,2014年下降至最低值1.656,2015年平均路径长度出现反弹,重新上升到1.839。由于平均路径长度与网络传输效率呈反向变动关系,由此推断,中国石油资源贸易网络的石油资源传输效率呈先下降后上升的变化趋势。此外,由于中国石油资源贸易网络仅考虑与中国存在直接进出口贸易联系的国家,网络直径固定为2,因此不针对该指标做进一步分析。

3.1.2 石油资源流动时空格局变化

中国石油资源进口主要来源地从亚太地区转移到中东、非洲、前苏联以及美洲地区。亚太地区占中国石油进口份额从1990年的61%迅速下降至2015年不足3%;与此同时,中国加大了对中东、非

洲、前苏联和美洲地区石油资源进口份额(图3)。中东地区的石油资源进口份额从1990年不足40%增加至1998年的峰值61%,随后逐步回落到50%左右,截止2015年,源自中东地区的石油资源占中国石油资源进口总量的份额为51%。源自非洲的石油资源从1990年的0%上升2007年的峰值33%后逐年下降至2015年的19%;俄罗斯和中亚地区(哈萨克斯坦和阿塞拜疆)所占份额从1990年的0%稳步增长至14%。此外,2000年之后,源自美洲的石油资源进口迅速增加,从2003年不足2%快速增长至2015年的13%。其中,美洲石油资源主要源自委内瑞拉、巴西和哥伦比亚三国。综上,中国石油资源进口源自中东地区的份额基本稳定在50%左右,非洲呈下降趋势,而俄罗斯、中亚和美洲地区则是未来的主要增长区域。

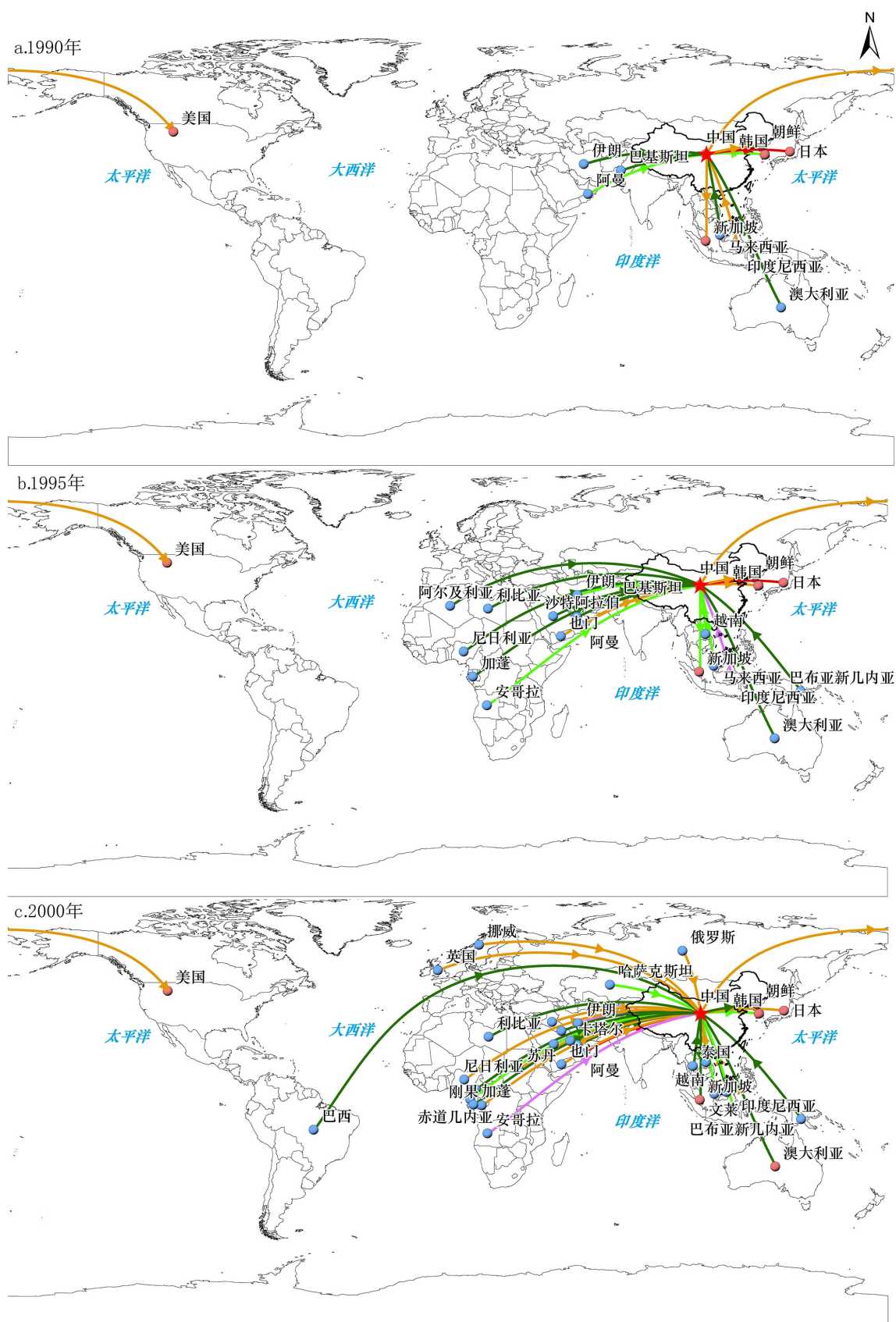
中国石油资源出口地主要集中在亚太地区,且其所占份额从1990年的83%上升至2015年的97%。具体从出口国家及其所占份额变动上看,1990年,中国的出口国家主要包括亚太地区的日本(57%)、新加坡(14%)、韩国(4%)和朝鲜(4%)四国,以及美国(17%)和其他国家(4%)。2009年中国石油资源出口国数增至峰值10个,主要包括亚太地区的韩国(32%)、新加坡(17%)、日本(14%)、朝鲜(7%)、澳大利亚(6%)、泰国(5%)、印度(2%)、印度尼西亚(2%)和马来西亚(1%),以及美国(14%)和其他国家(3%)。随后,中国出口国数迅速下降,截止2015年,中国出口国下降至6个,主要包括亚太地区日本(54%)、印度(16%)、韩国(10%)、马来西亚(2%)和新加坡(1%)5国,以及美国(3%)和其他国家(14%)。

3.2 供应安全趋势及情景分析

3.2.1 供应安全及其趋势

相较于进口来源国运输距离,进口来源国政治稳定性对于保障中国石油资源供应安全更为重要(图4,见第1439页)。对比不同模型的运算结果, S^0 假设中国石油资源进口来源国政治稳定性、运输距离恒定且均等于1,仅考虑到石油资源进口来源多元化因素对中国石油资源供应稳定性的影响,因此,相较于模型 S^1 、 S^2 和 S^3 , S^0 对于中国石油资源供应稳定性存在低估。 S^1 在 S^0 的基础上将中国石油

2017年8月



(转下页)

(接上页)

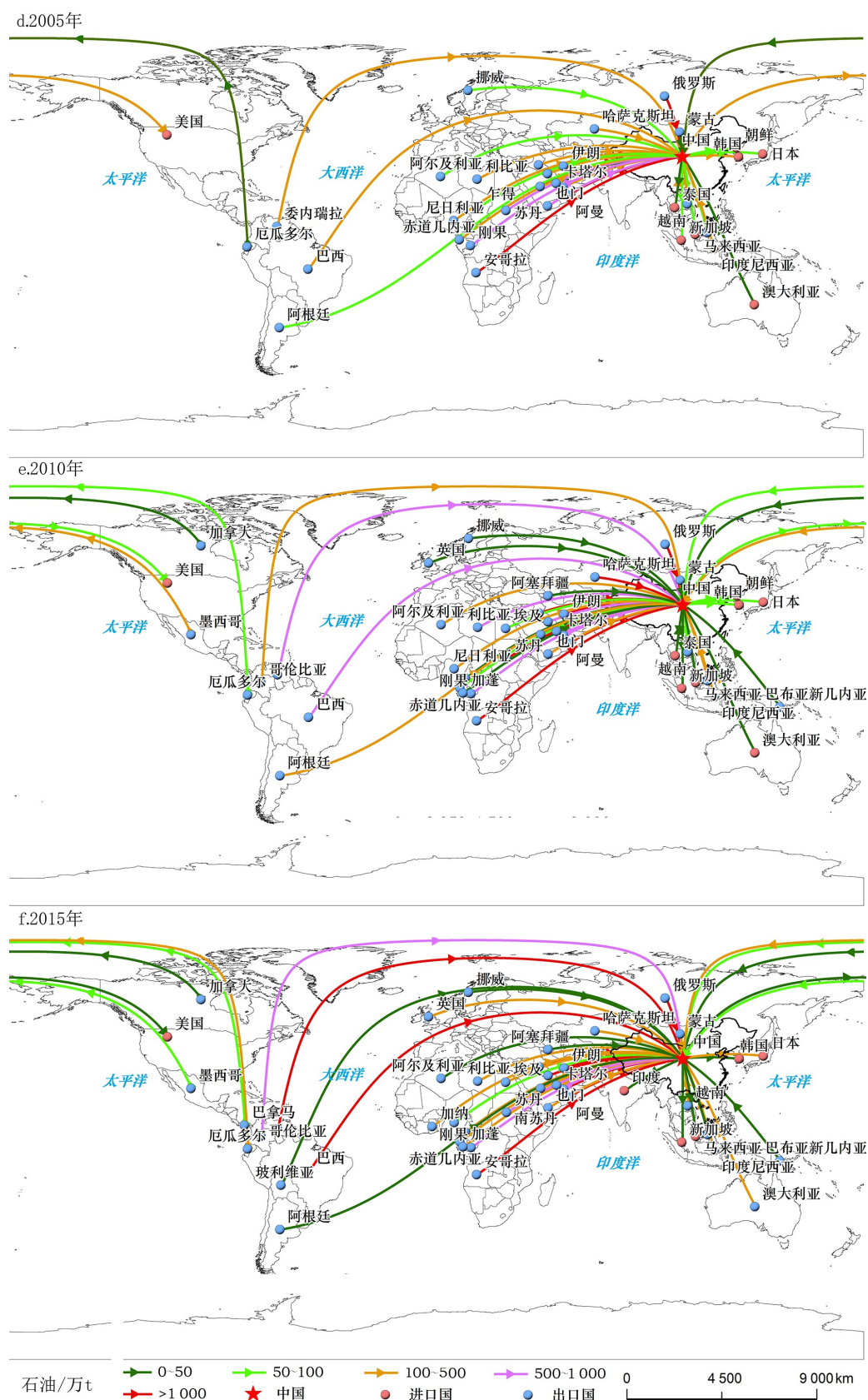


图3 1990-2015年中国石油资源贸易时空格局

Figure 3 Temporal and spatial pattern of China's oil trade flow from 1990 to 2015

2017年8月

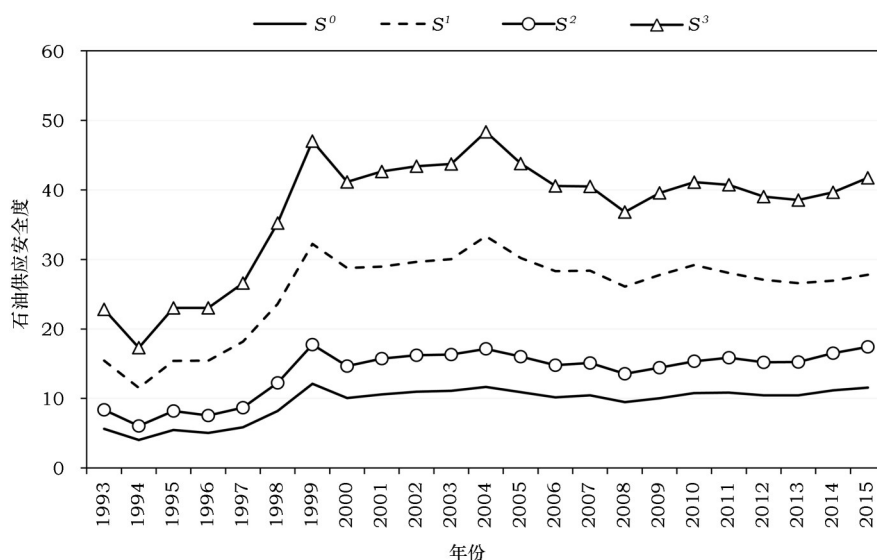


图4 1993–2015年中国石油资源供应安全变化趋势

Figure 4 Trends in oil supply security of China from 1993 to 2015

资源进口来源国政治稳定性纳入计算,因此 $S^1 > S^0$; S^2 在 S^0 的基础上将中国石油资源进口来源国的运输距离因素纳入计算,因此 $S^2 > S^0$; S^3 在 S^0 的基础上将中国石油资源进口来源国的政治稳定性和运输距离两个因素同时纳入计算,因此 $S^3 >> S^0$;与此同时, $S^1 > S^2$ 则说明,相较于进口来源国运输距离,进口来源国政治稳定性对于保障中国石油资源供应安全的影响更大。

中国石油资源供应安全历经快速提升期后进入稳定发展阶段。从中国石油资源供应安全评估结果来看:1993-1999年,中国石油资源供应安全进入快速提升期, S^3 从1993年的23迅速增长至1999年的47,除2004年 S^3 上升至峰值48之外,2000-2015年, S^3 略有下降,并基本稳定在41左右。

3.2.2 供应安全情景模拟

根据模型 S^3 ,分别设置目标性与随机性供应中断两种情景,模拟在两种供应中断模式下,中国石油资源供应安全的变化趋势。本文将随机模拟次数设置为100次,模拟结果如图5所示。其中,粉红色虚线为100次随机性供应中断引致的中国石油资源供应安全衰减轨迹,红色实线为100次随机性中断衰减轨迹的平均值,蓝色虚线为目标性中断衰减轨迹。情景模拟结果显示:

(1)目标性中断对中国能源供应安全的危害显

著高于随机性中断。1995年、2015年目标性中断衰减曲线位于随机性中断衰减曲线之下,说明目标性中断比随机性中断能够引致中国石油资源供应安全更大幅度的衰减。

(2)进口来源多元化战略显著增强了中国抵御供应中断风险的能力。目标性中断情景下,1995年top5石油资源进口来源国(印度尼西亚、阿曼、也门、安哥拉和伊朗)中断供应将引致中国石油资源供应安全接近98%的衰减,这一比率在2015年下降至81%;随机性中断情景下,1995年top5进口来源国中断供应将引致中国石油资源供应安全超过30%的衰减,2015年这一比例下降至不足14%。2015年top5石油资源进口来源国依次为俄罗斯、安哥拉、伊拉克、阿曼和伊朗。

4 结论与讨论

本文基于复杂性网络方法,利用1990-2015年中国石油资源进出口贸易数据构建了中国石油资源贸易网络。采用复杂网络指标对中国石油资源流动网络特征进行了分析,借助ArcGis刻画了中国石油资源流动时空格局,建立供应安全模型开展了中国石油资源供应安全评价,设置不同供应中断情景对中国供应安全衰减趋势展开了模拟。基于上述分析,可以得到以下结论:

(1)中国石油资源贸易网络在“入度”快速增

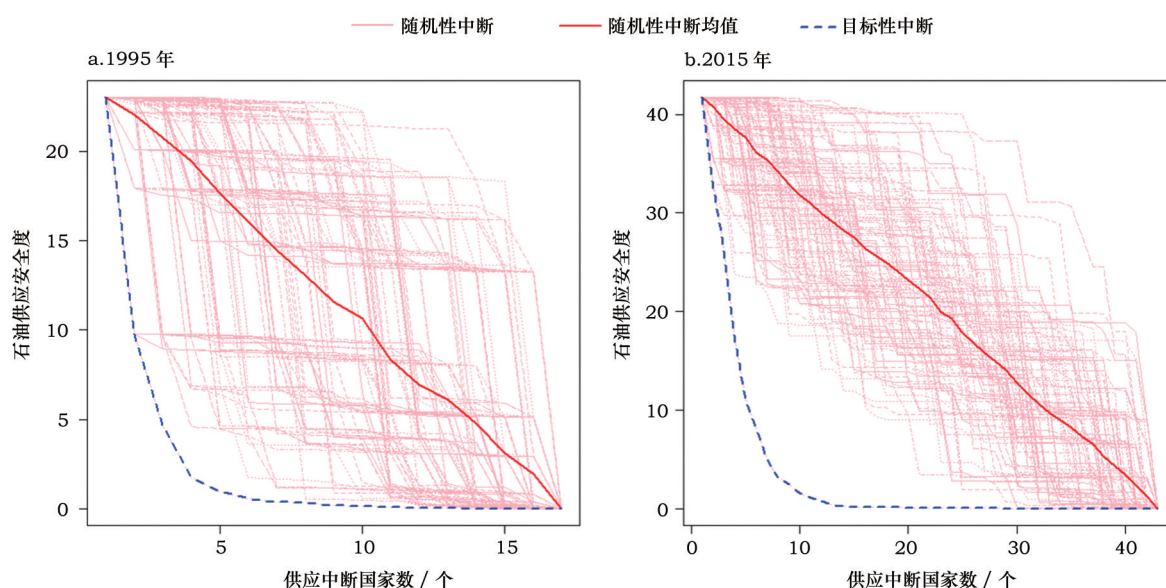


图5 1995年、2015年中国石油资源供应安全中断情景模拟

Figure 5 Supply security of China's oil trade network under different attack scenario for 1995 and 2015

长,“出度”趋于稳定的综合作用下,网络规模不断扩张,网络“度”稳步增加,中国对石油资源贸易网络中各国的影响逐步增强。与此同时,网络密度与紧密中心性逐年递减表明各个出口国对中国石油资源进口的重要性在下降;此外,平均路径长度先增后减致使中国石油资源贸易网络传输效率先降后升。中国石油资源贸易网络变化趋势表明,继续实施石油资源进口多元化战略,建立与更多石油资源出口国的直接贸易联系,在进一步分散风险、降低出口国对中国石油资源进口重要性的同时,有助于增强中国在石油资源贸易网络中影响力和话语权,还有助于提升中国石油资源贸易网络的传输效率。

(2)中国石油资源供应安全历经快速提升期后进入稳定发展阶段,进口来源国政治稳定性是影响中国石油资源供应安全的关键要素。当前,中国50%以上的石油资源来自于动荡的中东地区,接近20%的石油资源来自政治较不稳定的非洲地区。在石油资源进口来源区域层面实施多元化策略,加大政治稳定区域的石油资源进口,有助于进一步分散风险,提升中国石油资源供应安全。如加大对前苏联地区如俄罗斯、哈萨克斯坦和阿塞拜疆等,以及美洲地区的石油资源进口。

(3)目标性中断对中国石油资源供应安全的危

害十分显著,实施进口来源多元化战略,防范top5进口来源国的目标性中断,有助于增强中国抵御供应中断风险的能力。

此外,石油资源供应安全不仅涉及到供应稳定性还涉及石油资源价格合理性因素。由于篇幅和数据限制,本文没有进一步将价格因素纳入到中国石油资源供应安全评估模型中,也没有考虑中国国内能源产销结构,石油资源开采,中国石油资源对外依存度,中国海上和陆地石油资源运输通道以及气候变化等对中国石油资源流动及供应安全的影响。以上研究不足,也是未来进一步需要深入研究的重要问题所在。

参考文献(References):

- [1] BP. Statistical Review of World Energy 2016 [EB/OL]. (2016-06-09) [2016-06-30]. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>.
- [2] Salameh M G. China, oil and the risk of regional conflict[J]. *Survival*, 1995, 37(4): 133-146.
- [3] Jakobson L, Daojiong Z. China and the worldwide search for oil security[J]. *Asia-Pacific Review*, 2006, 13(2): 60-73.
- [4] Lai H H. China's oil diplomacy: Is it a global security threat?[J]. *Third World Quarterly*, 2007, 28(3): 519-537.

2017年8月

- [5] Rotberg R I. China into Africa: Trade, Aid, and Influence[M]. Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 2008.
- [6] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2010 [EB/OL]. (2011-01-09)[2016-06-30]. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf.
- [7] 刘立涛, 沈镭, 高天明, 等. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. 地理学报, 2013, 67(12): 1634-1644. [Liu L T, Shen L, Gao T M, et al. Evaluation and spatial-temporal evolution of energy security in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 67(12): 1634-1644.]
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.]
- [9] 田春荣. 2015年中国石油进出口状况分析[J]. 国际石油经济, 2016, 24(3): 44-53. [Tian C R. Review of China's oil imports and exports in 2015[J]. *International Petroleum Economics*, 2016, 24(3): 44-53.]
- [10] Yergin D. Ensuring energy security[J]. *Foreign Affairs*, 2006, 85(2): 69-82.
- [11] Lacasse C, Plourde A. On the renewal of concern for the security of oil supply[J]. *The Energy Journal*, 1995, 16(2): 1-23.
- [12] International Energy Agency (IEA). Towards a Sustainable Energy Future[M]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development(OECD)Publishing, 2001.
- [13] Cohen N, Naor M. Reducing dependence on oil? How policy entrepreneurs utilize the national security agenda to recruit government support: the case of electric transportation in Israel [J]. *Energy Policy*, 2013, 56(5): 582-590.
- [14] Hedenus F, Azar C, Johansson D J A. Energy security policies in EU- 25- the expected cost of oil supply disruptions[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(3): 1241-1250.
- [15] Jansen J C, Van Arkel W G, Boots M G. Designing Indicators of Long- Term Energy Supply Security[EB/OL]. (2004- 02- 17) [2016-06-30]. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04007.pdf>.
- [16] Vivoda V. Diversification of oil import sources and energy security: a key strategy or an elusive objective?[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4615-4623.
- [17] Cohen G, Joutz F, Loungani P. Measuring energy security: trends in the diversification of oil and natural gas supplies[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 4860-4869.
- [18] Kruyt B, van Vuuren D P, De Vries H J M, et al. Indicators for energy security[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(6): 2166-2181.
- [19] Wu G, Wei Y M, Fan Y, et al. An empirical analysis of the risk of crude oil imports in China using improved portfolio approach [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(8): 4190-4199.
- [20] Martchamadol J, Kumar S. An aggregated energy security performance indicator[J]. *Applied Energy*, 2013, 103(1): 653-670.
- [21] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁. 能源安全研究的理论与方法及其主要进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(4): 403-411. [Liu L T, Shen L, Liu X J. Theories, methods and progress of energy security research[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(4): 403-411.]
- [22] 张华林, 刘刚. 我国石油安全评价指标体系初探[J]. 国际石油经济, 2005, 13(5): 44-48. [Zhang H L, Liu G. Study on evaluation index system of oil security in China[J]. *International Petroleum Economics*, 2005, 13(5): 44-48.]
- [23] Gupta E. Oil vulnerability index of oil-importing countries[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(3): 1195-1211.
- [24] Asia Pacific Energy Research Centre (APERC). A Quest for Energy Security in the 21st Century [EB/OL]. (2011- 11- 16) [2016- 06- 30]. http://aperc.ieej.or.jp/file/2010/9/26/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf.
- [25] Yang Y, Li J, Sun X, et al. Measuring external oil supply risk: a modified diversification index with country risk and potential oil exports[J]. *Energy*, 2014, 68(4): 930-938.
- [26] 刘新华, 秦仪. 中国的石油安全及其战略选择[J]. 现代国际关系, 2002, (12): 35-39. [Liu X H, Qin Y. China's oil security and its strategic choices[J]. *Contemporary International Relations*, 2002, (12): 35-39.]
- [27] 吴磊. 中国石油安全[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2003. [Wu L. China's Oil Security[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2003.]
- [28] 史春林, 李秀英. 霍尔木兹海峡安全对中国进口石油供应和运输影响[J]. 中国软科学, 2013, (7): 1-15. [Shi C L, Li X Y. The impact of the security of the Strait of Hormuz on China's imported oil supply and shipping[J]. *China Soft Science Magazine*, 2013, (7): 1-15.]
- [29] 岳来群. 突破“马六甲困局”-马六甲海峡与我国原油通道安全解析[J]. 中国石油企业, 2006, (4): 6-9. [Yue L Q. Breaking the Malacca dilemma-analysis of the safety of the crude oil passage in China[J]. *China Petroleum Enterprise*, 2006, (4): 6-9.]
- [30] 马晓宇, 张子阳, 胡利明. 中国石油在马六甲海峡运输的安全研究[J]. 中国水运, 2007, 7(1): 29-31. [Ma X Y, Zhang Z Y, Hu L M. Safety analysis on China's oil transportation at Malacca Strait[J]. *China Water Transport*, 2007, 7(1): 29-31.]
- [31] 赵媛, 郝丽莎. 20世纪末期中国石油资源空间流动格局与流场特征[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 753-764. [Zhao Y, Hao L S. The spatial structure of crude oil flow and the characteristic of its flow field in China[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 753-764.]
- [32] 赵媛, 郝丽莎. 我国石油资源空间流动的形成机制[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1027-1036. [Zhao Y, Hao L S. The forming mechanism of crude oil flow in China[J]. *Geographical*

- Research*, 2008, 27(5): 1027-1036.]
- [33] 赵媛, 郝丽莎. 我国石油资源空间流动的地域类型分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 93-103. [Zhao Y, Hao L S. Analysis of the region classification of crude oil flow in China[J]. *Journal of Natural Resource*, 2009, 24(1): 93-103.]
- [34] 赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源-汇系统空间格局特征[J]. 地理学报, 2012, 67(4): 455-466. [Zhao Y, Yang Z Y, Hao L S, et al. The evolution of spatial displacement pattern of China's crude oil flow source-sink system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(4): 455-466.]
- [35] 刘晓洁. 石油资源流动效应与机理研究[D]. 北京: 中国科学院, 2008. [Liu X J. Effects and Mechanism of Oil Resources Flow [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008.]
- [36] Liu X J, Liu L T, Cheng S K, et al. A national accounting framework for the petroleum cycle: a case study of China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(5): 386-396.
- [37] 安海忠, 陈玉蓉, 方伟, 等. 国际石油贸易网络的演化规律研究: 基于复杂网络理论[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(22): 57-64. [An H Z, Chen Y R, Fang W, et al. Research on the evolution of the international oil trade network[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2013, 43(22): 57-64.]
- [38] Jia X, An H, Sun X, et al. Evolution of world crude oil market integration and diversification: a wavelet-based complex network perspective[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1788-1798.
- [39] Ji Q, Zhang H Y, Fan Y. Identification of global oil trade patterns: an empirical research based on complex network theory [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 85(9): 856-865.
- [40] Zhang H Y, Ji Q, Fan Y. What drives the formation of global oil trade patterns? [J]. *Energy Economics*, 2015, 49: 639-648.
- [41] Yang Y, Poon J P H, Liu Y, et al. Small and flat worlds: a complex network analysis of international trade in crude oil[J]. *Energy*, 2015, 93: 534-543.
- [42] 沈镭, 刘立涛, 王礼茂, 等. 2050 年中国能源消费的情景预测[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 361-373. [Shen L, Liu L T, Wang L M, et al. 2050 energy consumption projection for China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(3): 361-373.]
- [43] 林聚任. 社会网络分析: 理论、方法与应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2009. [Lin J R. Social Network Analysis: Theory, Method and Application[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2009.]
- [44] Tang L, Liu H. Community Detection and Mining in Social Media[M]. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2010.
- [45] International Energy Agency (IEA). Contribution of Renewables to Energy Security [EB/OL]. (2007-05-16)[2016-10-20]. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/o_contribution.pdf.
- [46] Stirling A. Diversity and ignorance in electricity supply investment: addressing the solution rather than the problem[J]. *Energy Policy*, 1994, 22(3): 195-216.
- [47] Neff T L. Improving Energy Security in Pacific Asia: Diversification and Risk Reduction for Fossil and Nuclear Fuels[EB/OL]. (1997-12-30)[2016-10-23]. <http://nautilus.org/wp-content/uploads/2015/04/NeffPARES.pdf>.
- [48] Lefevre-Marton N, Blyth W. Energy Security and Climate Change Policy Interactions: an assessment framework[EB/OL]. (2005-01-30)[2016-10-25]. <https://www.ogel.org/article.asp?key=1795>.
- [49] Le Coq C, Paltseva E. Measuring the security of external energy supply in the European Union[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4474-4481.
- [50] Frondel M, Schmidt C. Measuring Energy Security- a Conceptual Note[EB/OL]. (2008-07-16)[2016-10-23]. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/26817/1/572040385.PDF>.
- [51] McFalls M S. The role and assessment of classical market power in joint venture analysis[J]. *Antitrust Law Journal*, 1998, 66(3): 651-700.
- [52] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. [He D R, Liu Z H, Wang B H. Complex Systems and Complex Networks[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.]

Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation

LIU Litao^{1,2}, SHEN Lei^{1,2}, LIU Xiaojie¹, CHENG Shengkui¹, ZHONG Shuai^{1,2},
CAO Zhi^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2}, KONG Hanxiao^{1,2}, SUN Yanzi^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The increasing complexity of oil flow within oil trade networks has become a key factor affecting oil supply security. Here, we constructed China's oil trade network to analyze the overall features and patterns of oil flow using complex network theory. From 1990-2015, the influence of China on network trade partners gradually increased, while exporting countries followed the opposite pattern. The transmission efficiency of China's trade network followed a downward trend and then slightly increased. China's main oil import sources transferred from the Asia-Pacific region to the Middle East (51%), Africa (19%), Russia and Central Asia (15%) and the Americas (13%) in 2015. We estimated oil supply security from 1993-2015 using different evaluation models and found it was 23 in 1993 and 47 in 1999, peaking at 48 in 2004 before falling to 42 in 2015. The political risk rating of exporting countries was the most important factor affecting China's oil supply security. We simulated attenuation in supply security across China's oil trade network under two different attacks scenarios: a random attack and targeted attack. We found that China's oil trade network is fragile to targeted attacks and would experience a rapid decline in oil supply security; the network is robust to a random attack. Accordingly, the key for China safeguarding its oil supply security is how to prevent a targeted attack. These findings have significant implications on the implementation of oil import diversification policy, for example, increasing oil imports from Russia, Kazakhstan, Azerbaijan and the Americas, that are critical to assuring China's oil supply security in coming decades.

Key words: oil trade network; oil flow; spatial-temporal features; complex network theory; supply security; China