

全球液化石油气运输网络贸易社区特征及其演化分析

彭 澎^{1,2}, 程诗奋^{1,2}, 陈闪闪³, 陆 锋^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 福州大学数字中国研究院(福建), 福州 350002)

摘要: 液化石油气在全球清洁能源消耗市场中扮演着极为重要的角色, 其通过船舶在不同港口之间进行运输, 而港口之间通过局部密集的运输关系, 形成了联系极为紧密的贸易社区。采用复杂网络社区探测方法, 基于2013—2017年全球液化石油气船舶轨迹大数据构建运输网络, 并对其贸易社区特征及其演化趋势开展分析。结果表明: (1) 液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG) 贸易社区内的港口之间的联系更加紧密, 不同社区内的枢纽港口联系也日益紧密; (2) 各个贸易社区的规模呈现出增长趋势, 且同一社区内的港口在地理空间上变得更为集聚; (3) 亚太地区、中东、西北欧和地中海地区形成的社区在全球LPG贸易中一直保持着重要地位, 而随着时间推移, 美洲社区已逐渐从一个相对孤立的社区发展成为与其他社区存在紧密联系的社区。

关键词: 液化石油气; 船舶轨迹数据; 社区探测; 贸易特征

液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG) 作为一种清洁能源, 在全球油气消费市场占据着较大的比例, 且呈现出持续增长的趋势^[1]。而由于LPG生产国与消费国在地理空间的显著错位, 导致绝大部分LPG贸易依赖于海上运输。而港口在海上运输中扮演着极为重要的角色。因此, 从港口尺度对全球LPG运输网络开展研究将有助于加深对全球LPG贸易模式的理解。此外, 也可为LPG贸易供需国家能源政策的调整和优化以及保障能源供应安全提供科学支持。

当前对LPG贸易的研究主要围绕着LPG的处理储存^[2,3]、运输风险分析^[4,5]、定价政策^[6,7]、贸易模式^[8-10]等方面开展。Bai等^[11]发现波罗的海LPG运费和远东与中东丙烷价格之间存在依赖关系; 在市场低迷时, 这种依赖关系更高。海上运输安全是LPG贸易需要考虑的重要因素, 而与LPG运输有关的风险主要取决于航行距离等方面。Guersola等^[5]通过研究发现, 在非繁忙日进行LPG运输并减少行进距离可能有助于降低运输风险。

除了从微观视角分析LPG贸易之外, 基于全球国家之间的贸易统计数据, 部分学者从宏观视角, 采用复杂网络分析方法从网络结构特征及其演化分析^[12-14]、潜在贸易关系预测^[15,16]、贸易社区特征分析^[17,18]等方面开展不同类型的能源贸易网络 (如石油、液化天然气等) 研究。Yang等^[14]通过分析1988—2013年的全球原油贸易网络, 发现其呈现出小世界网络特征, 美国、中国、英国、俄罗斯和加拿大是最为重要的贸易国; 沙特阿拉伯、

收稿日期: 2020-02-01; 修订日期: 2020-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42001391); 中国博士后科学基金资助项目 (2020T130644, 2019M660774)

作者简介: 彭澎 (1989-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 研究方向为海上交通地理信息科学、复杂网络分析。

E-mail: pengp@lreis.ac.cn

通讯作者: 陆锋 (1970-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为交通地理信息系统、导航与位置服务技术、复杂网络分析等。E-mail: luf@lreis.ac.cn

阿联酋等传统石油出口国保持着出口领先地位, 尼日利亚、俄罗斯和委内瑞拉等新兴出口国的贸易量呈现稳步增长态势。

然而, 基于统计数据开展的研究无法反映出LPG贸易中细粒度的港口之间的差异性^[19]。当前, 货运船舶轨迹大数据能够反映货运船舶的实时运营状态, 为本文构建港口尺度的全球LPG运输网络并开展更加精细时刻尺度的研究提供了数据支撑。在船舶轨迹数据的支撑下, 学者们针对集装箱、石油等运输网络, 围绕着网络结构特征分析^[20,21]、健壮性评估^[22-24]、网络演化分析^[25-27]等方面开展的研究也为本文的开展提供了理论和实证分析支撑。因此, 本文基于2013—2017年海洋货运船舶轨迹大数据构建全球LPG运输网络, 采用复杂网络社区探测方法对其贸易社区特征及其演化趋势开展分析, 旨在全面掌握全球LPG运输网络港口之间的局部聚集特征。

1 研究方法与数据来源

1.1 实验数据及网络构建

本文基于2013—2017年全球LPG运输船舶轨迹数据识别船舶进出港记录(数据由上海迈利船舶科技有限公司提供), 并以此构建无向加权网络 $G=(V, E, W)$ 来表征全球LPG贸易, 其中 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示网络中所有港口; $E=\{e_{ij}\}$ 表示港口之间的所有贸易航线, 其中 e_{ij} 表示港口 i 与 j 之间的关系, 当存在航线时, $e_{ij}=1$, 否则, $e_{ij}=0$; $W=\{w_{ij}\}$ 表示所有航线的权重值, 其中 w_{ij} 表示 e_{ij} 的权重值, 由于当前数据无法准确反映出LPG船舶运输量, 因此, 本文采用船舶在港口 i 与 j 之间运输次数来表征航线的权重值。

1.2 贸易社区探测

本文使用Blondel等^[28]提出的经典的社区探测算法, 通过两个阶段进行迭代计算识别全球LPG贸易社区。

在第一阶段, LPG运输网络中的每个港口均被视为单一贸易社区; 然后, 将港口 i 依次放入其相连接的贸易社区 j , 并计算模块度值 ΔQ 。当 ΔQ 值大于0时, 将港口 i 合并至 ΔQ 值最大的贸易社区, 否则, i 保持不变。并对网络中所有港口(初始贸易社区)进行迭代执行此过程。

$$\Delta Q = \left[\frac{\sum C^{in} + 2k_i^{in}}{2m} - \left(\frac{\sum C^{tot} + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\sum C^{in}}{2m} - \left(\frac{\sum C^{tot}}{2m} \right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $\sum C^{in}$ 是贸易社区 C 中所有的边权重总和; $\sum C^{tot}$ 是 C 中节点所有的边权重之和; k_i 表示节点 i 的权重综合; k_i^{in} 是从港口 i 到社区 C 中节点的边权重之和; m 表示网络中所有边权重之和。

在第二阶段, 算法构建一个新网络, 其中节点为第一阶段所划分的贸易社区, 边为各个节点(贸易社区)之间的联系, 边的权重则表示两个对应社区之间边的权重之和。在此基础上, 对新的网络执行算法的第一阶段进行计算, 从而得到另外一个新网络, 并对新网络进行进一步迭代。在每次完成迭代, 贸易社区数量会呈现出不断减少趋势, 而当社区数量不再发生改变, 并且当模块度值 Q 达到最大时, 所有迭代终止。需要注意的是: 除第1阶段节点表示的是港口外, 后续计算的各个阶段, 节点表示的均为上一阶段所划分的贸易社区。

模块度值 Q 表示的是贸易社区划分的质量, 范围在-1~1之间变化^[29,30], 值越大则表

明贸易社区划分的质量越好，即社区内的港口联系非常紧密，而社区之间的港口则联系相对稀疏，公式如下：

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[E_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (2)$$

式中： E_{ij} 表示节点*i*与节点*j*之间的加权边； $k_i = \sum_j E_{ij}$ 表示与节点*i*相连的加权边总和； $m = \frac{1}{2} \sum_{ij} E_{ij}$ ； c_i 表示包含节点*i*的社区，当 $c_i = c_j$ 时， $\delta(c_i, c_j) = 1$ ，否则 $\delta(c_i, c_j) = 0$ 。

2 结果分析

本文根据所述方法将全球LPG运输网络划分为若干贸易社区，表1所示为2013—2017年全球LPG运输网络所包含的贸易社区数量及其对应的模块度值。

表1 2013—2017年贸易社区数量和模块度值

年份	2013	2014	2015	2016	2017
社区数量/个	9	9	10	9	8
模块度值	0.719	0.729	0.748	0.754	0.756

不同年份贸易网络的社区数量保持相对稳定，在8~10个之间波动。模块度值均大于0.7，且从0.719增加到0.756，这意味着同一贸易社区内的港口之间的贸易关系联系十分紧密且变得更紧密，而不同贸易社区之间的港口连接相对稀疏。

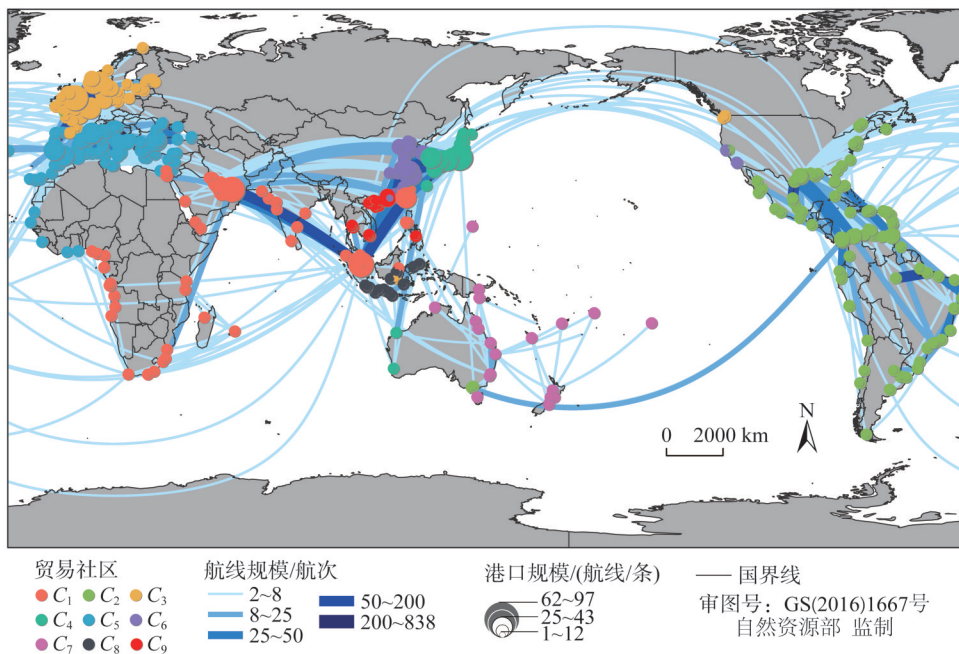
为掌握全球LPG贸易社区的变化趋势，结合贸易社区划分结果和港口之间的贸易关系对社区港口空间分布进行可视化，选择2013年（图1）和2017年（图2）开展分析。图中，港口节点的大小表示港口所涵盖航线的数量，而港口之间航线的粗细及颜色深浅则表示航线连接的港口之间的航次数量，航线越粗和颜色越深，则表明航次数量越多。表2表示是不同贸易社区所涵盖港口的数量。

从表2中可以看出，相较于其他贸易社区， C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和 C_5 规模相对较大，并且随着时间的推移，这5个贸易社区的规模均呈现出增长趋势。此外，在2013年， C_6 社区也具有一定规模，涵盖了54个港口。

通过对比观察2013年和2017年社区内港口的地理分布整体变化趋势，发现除 C_6 社区外，其他社区的整体空间分布并未发现明显变化，且呈现出一定的地域分布特征。因此，本文根据不同贸易社区的主要集聚地域或贸易主导地将其分别进行相应的地理命名（表3）。

2.1 2013年贸易社区演化趋势

由图1可知， C_1 贸易社区内的港口地理位置相对较为分散在东亚、东南亚、南亚、中东、东非等区域，其中中东地区、东非地区为LPG贸易的主要生产区域，东亚和东南亚地区为主要的消费区域，共涵盖117个港口。而从航线的密集程度可以看出， C_1 与其他贸易社区之间联系十分紧密，且主要通过关键枢纽港口进行联系。新加坡港、摩尔费坎港和高雄港是社区中航线规模最大的三个港口，与社区内其他港口联系十分紧密，起到了联系 C_1 社区的作用，而社区内其他港口之间的航线相对较为稀疏。同时，这三个港口也在整个LPG贸易中扮演着中转港口的角色，联系尤为紧密的是 C_4 、 C_6 和 C_5 社区。新加坡港是LPG贸易极为重要的中转港口，共有97条航线（航线数量排名第1，下文排名均指航线数量排名）。新加坡港与其所属 C_1 贸易社区内的港口存在45条航线，表明其在所属社区中扮演着极为重要的中转港口（中转包括进行转运、补给、金融保险服务等）角色。与此同时，其还有17条和20条航线分别连接着 C_4 、 C_6 社区中的港口。摩尔费坎港位于阿联酋，是主要



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 2013年贸易社区中港口的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of ports in different communities in 2013

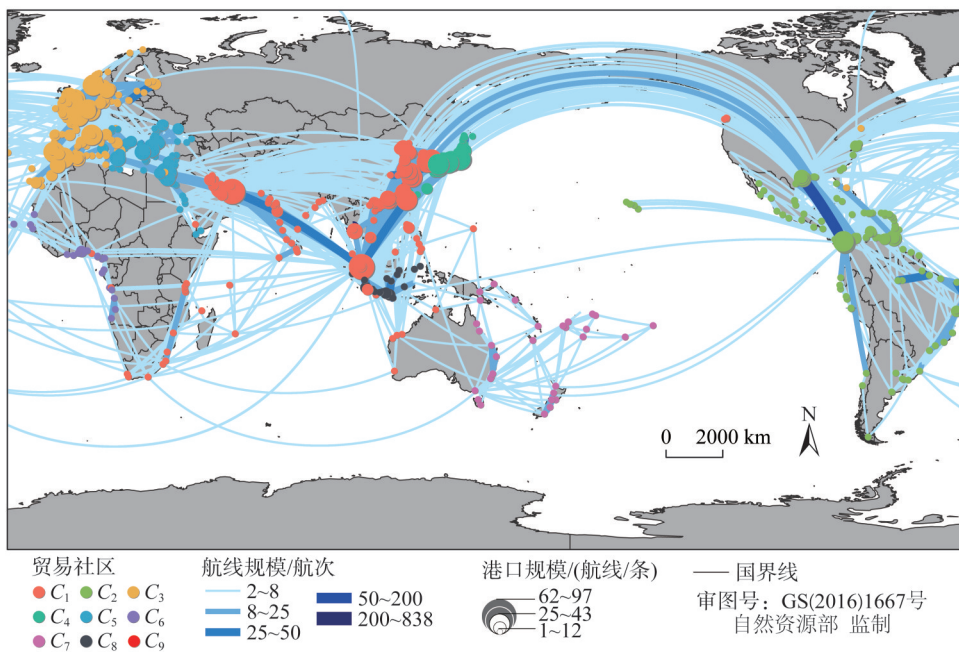


图2 2017年贸易社区中港口的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of ports in different communities in 2017

表2 2013年和2017年不同贸易社区的港口数量

Table 2 Numbers of ports in different communities, 2013 and 2017 (个)

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
2013年	117	156	134	89	151	54	28	20	27
2017年	205	162	228	109	115	28	33	29	—

表3 2013年和2017年不同贸易社区的地理命名

Table 3 The geographic names of different communities,

2013 and 2017

	2013年	2017年
C ₁	东南亚—印度洋沿岸社区	东亚—东南亚—印度洋沿岸社区
C ₂	美洲社区	美洲社区
C ₃	北欧社区	西北欧—地中海社区
C ₄	日本—澳大利亚社区	日本社区
C ₅	地中海—西欧社区	地中海—黑海—红海社区
C ₆	东北亚社区	西非社区
C ₇	大洋洲社区	大洋洲社区
C ₈	东南亚社区	东南亚社区
C ₉	中国南部—越南社区	

出口国及重要中转枢纽港口, 共涵盖77条航线, 作为主要出口地区的主要中转港口, 与C₁、C₄和C₆社区分别有49条、8条和10条航线。但它与主要位于西北欧的C₃社区内只有1条航线(与安特卫普), 而在地中海地区只有两条航线(重要的转运枢纽港口: 直布罗陀港和穆罕默迪亚港), 与地中海地区的C₅社区都是主要的消费领域。高雄港位于中国台湾, 同样具备重要的中转功能, 分别与C₁、C₄、C₆和C₉社区有18条、10条、19条和10条航线。C₄贸易社区共89个港口, 主要由日本(83个)和少量澳大利亚的港口(3个)组成。在此期间, 日本是全球最大的LPG进口国, 其主要进口来源为中东地区, 表现出跟中东地区的港口存在较强的贸易关系; 同时, 澳大利亚也是其进口来源之一, 但是进口

量相对较小(社区中包含了3个澳大利亚港口)。这一社区内港口地理空间较为集聚, 进口主要是通过大型船舶从出口国的枢纽港口运输到社区内的枢纽港口, 并通过小型船舶进行转运到目的港口。具体表现为: 千叶港和川崎港(排名并列第2)均涵盖88条航线, 分别与国内港口存在49条和54条航线。与C₄贸易社区类似, C₆贸易社区由主要的进口国——中国的港口组成, 涵盖了47个港口。此外, 还包括了韩国的6个港口和日本的1个港口。C₉贸易社区则主要由中国南部、越南等东南亚地区港口组成, 共涵盖了27个港口。

欧洲地区也是LPG主要消费区域, 欧洲地区的港口主要分属于C₃和C₅社区, 但两个社区内的港口之间的贸易联系非常紧密。例如, 位于C₃社区的弗利辛恩港(荷兰)不仅与本社区内的港口存在49条航线, 同时也和C₅社区存在9条航线。C₃社区主要由西北欧港口群组成。其中挪威港口承担了部分的LPG出口功能, 但是出口量相对较少, 社区内港口主要为消费港口, 包括提兹港(英国, 航线数量72条, 排名第5)等航线数量较多的港口。C₅社区主要涵盖地中海地区、西欧和西北非部分港口组成, 规模仅次于C₂社区, 共有151个港口。其中, 西北非部分港口承担着出口功能, 而地中海区域部分港口承担着中转功能, 与整个社区的港口紧密联系。但这个社区内主要由消费港口组成, 社区内部分港口同时还承担了从中东到西北欧的出口贸易的中转功能。例如, 直布罗陀港与C₁、C₃和C₅社区之间分别有9条、13条和32条航线。

C₂贸易社区内的港口较为集中在美洲地区, 是当前全球最大的贸易社区, 共涵盖156个港口。其中, 美国是全球最主要的LPG出口国, 在这一阶段, 美国主要将LPG出口到巴西等中南美国家和欧洲地区, 相对而言, 其与亚太地区港口的贸易关系较为稀疏。在这一阶段, 社区内港口与其他贸易社区之间的贸易关系联系并不紧密。

与上述社区相比, C₇和C₈贸易社区的规模相对较小, 分别涵盖28个和20个港口。其中, C₇贸易社区主要由大洋洲港口组成, C₈贸易社区则由位于东南亚的印度尼西亚和

菲律宾的港口组成。

2.2 2017年贸易社区演化趋势

随着中东地区和美国新产能的不断释放,东亚等地区快速增长的消费量,导致涉及LPG贸易的港口数量呈现出较为迅速的增长趋势,从776个增加到909个,增长较为明显的国家主要为生产和消费量极大的国家,如:日本(增加29个)、挪威(增加17个)、美国(增加16个)。港口之间贸易量也呈现出了快速增长的趋势,全球LPG运输网络的贸易社区也发生较为显著的变化,尤为突出的是 C_1 贸易社区。由图2可知, C_1 贸易社区内的港口在地理空间上呈现出更加聚集的特征,主要位于东亚、东南亚、南亚、中东地区和东非地区,且已发展成为全球港口数量第2大的贸易社区,共涵盖了205个港口。主要原因在于:亚太地区LPG消费量的快速增长加速了 C_1 贸易社区的扩张。2017年,中国、印度、日本和韩国的消费量占全球比例高达1/3。中国、韩国和越南进一步增加从中东地区的进口量,港口可停靠大型LPG船舶的能力随着泊位等基础设施的不断建设而进一步增强,通过大型运输船舶从中东港口运输到上述国家不同目的港口的直达航线数量呈现出进一步增长。从图2也可看出,中东地区港口原本仅与部分港口存在较为密集的贸易关系(2013年),但到2017年,与中东地区港口的贸易航次数量变得相对较为均匀分散在不同港口,这些港口与原属于 C_1 社区港口的贸易关系进一步紧密,导致在2013年大部分原属于 C_6 和 C_9 贸易社区的港口融入到 C_1 贸易社区;因此, C_1 贸易社区内的港口在地理空间上变得更加集中。贸易社区内的新加坡港和霍尔费坎港仍然保持着航线数量排名前2,分别增加到125条和104条。新加坡港承担着 C_1 和 C_4 社区的中转功能,具体表现为:其与 C_1 和 C_4 贸易社区的航线数量分别为80条和18条。此外,新加坡港与 C_2 社区的航线也从0条增加到11条,反映出它与美洲地区的贸易关系变得更为紧密。霍尔费坎港与 C_1 社区有81条航线,而与 C_3 社区的航线数量则从2条增加到11条,表明中东地区与地中海地区港口的贸易联系更加紧密。然而, C_1 社区中的舟山港和其他枢纽港口仍主要充当 C_1 和 C_4 社区的国内港口和主要贸易进口国的中转功能。例如,舟山港与中国、日本和韩国港口之间的航线数量分别为40条、16条和5条。其中, C_4 社区仍然由主要的消费国——日本的港口群(107个港口)组成(社区共109个港口)。在此期间,日本保持着大量的LPG消费量,不仅包括从中东地区大量进口LPG,而且大大增加了从美国的进口量,从而巩固了其作为一个独立社区的地位。与此同时, C_4 社区中涵盖了6个航线数量排名前20的港口,这些港口仍主要为其国内LPG贸易提供中转。例如千叶港(排名第4)共84条航线,54条是国内航线。

C_2 社区主要由美洲地区的港口聚集形成,港口数量和地理空间分布并未发生显著变化,其中,涵盖41个美国港口、18个巴西港口、13个委内瑞拉和墨西哥港口。根据国际能源署的统计数据,2017年,美国是全球最大的LPG出口国。从图2所示的港口之间贸易关系来看,美国向中美洲和南美洲出口的液化石油气数量呈现出显著增长趋势。此外,巴拿马运河的扩建保证了所有超大型油气运输船舶的通过,从而大大缩短了美国与亚太地区之间的航行时间,而航线距离的缩短导致了货运成本的降低,促使美国的LPG在亚洲市场具有较大的价格优势,进一步增加了从美国到亚太地区的LPG出口量。图2还显示,从美国到亚太地区和西北欧的直接出口以及通过巴拿马运河的转运量均呈现出显著增长趋势。此外, C_2 社区中关键枢纽港口—巴尔博亚港和克里斯托瓦尔港航线数量排名分别上升至第9位和第14位。其中,巴尔博亚港与 C_1 、 C_2 和 C_4 社区之间的航线数量分别为18条、34条和13条,其中9条航线连接中国港口,3条航线连接韩国港口,这也

说明, C_2 社区与 C_1 社区以及 C_4 社区之间的贸易关系越发紧密。

C_3 和 C_5 社区所包含港口的规模变化也较为明显, 2013年属于 C_3 社区一部分的地中海地区的某些港口已并入 C_5 社区, 导致 C_3 社区扩张成为全球最大的贸易社区, 涵盖228个港口。 C_3 社区扩张的主要原因是: 西北欧地区的鹿特丹港和安特卫普港是最重要的石化贸易港口, 且拥有世界上最大的石油精炼基地, Peng等^[1]通过研究发现, 这些港口的影响力正在不断增强, 这些优势有利于贸易社区规模的进一步扩大。此外, 挪威、英国的北海地区和阿尔及利亚是该社区内重要的出口地区, 这些地区的出口量呈现增长趋势。从图2可以发现, 这些出口地区的港口与西欧和地中海地区部分港口的贸易量也呈现增长趋势。随着部分港口并入 C_3 社区, C_5 社区的规模相应地减少到115个港口, 主要位于地中海地区、黑海地区和红海地区。它包括了主要生产国——沙特阿拉伯的5个港口, 而其他大多数港口都位于主要的消费国, 包括31个土耳其港口、16个希腊港口、10个埃及港口和9个意大利港口。

C_6 贸易社区涵盖28个港口, 主要位于LPG出口地区——西非地区。 C_7 和 C_8 贸易社区内港口的地理分布并未发生明显变化, 但数量分别增加至33个和29个。

3 结论

本文基于2013—2017年全球海洋运输船舶轨迹大数据, 采用复杂网络社区探测的方法从港口尺度上对全球LPG运输网络的贸易社区特征及其演化趋势开展量化研究, 得到以下结论: (1) LPG贸易社区内的港口之间的联系更加紧密, 不同社区之间也通过枢纽港口呈现出联系日益紧密的特征; (2) 各个贸易社区的规模呈现增长趋势, 且同一社区内的港口在地理空间上变得更为集聚; (3) 亚太地区、中东、西北欧和地中海地区形成的社区在全球LPG贸易中一直保持着重要地位, 而随着时间的推移, 美洲地区的社区已逐渐从一个相对孤立的社区发展成为与其他社区存在紧密联系的社区。

本文从港口尺度研究了全球LPG贸易社区特征及其演化趋势, 研究结果可服务于优化LPG运输贸易航线、优化对外港口投资以及进出口贸易策略, 从而为保障我国能源进口安全提供实证支撑。

当前, 美国和中东地区仍然是全球LPG贸易的主要出口地区, 而随着新的LPG项目不断建设, 到2020年, 美国出口能力将超过每天100万桶(约3200万t), 约占未来五年全球LPG出口增长量的65%。同时, 伊朗和中东卡塔尔原油和天然气产量的增加促进了液化石油气产量的增长。出口贸易的激增将导致全球液化石油气海上运输的加速增长。当前LPG消费的增长是由新兴经济体驱动, 尤其亚太地区的国家, 如中国、印度, 这些国家的需求增长快于全球供应增长, 而不断变化的供需关系将在很大程度上影响着全球LPG贸易社区的变化。从本文结果分析可知, 随着时间推移, 亚太地区港口与中东地区港口呈现出紧密联系, 而与美国的港口逐渐在建立紧密联系。随着亚太地区与这两大主要生产区域之间贸易量的不断增加, 贸易关系将呈现出进一步加强的趋势, 贸易社区也将呈现出更为集中的特征。未来, 东亚地区大部分港口可能会融入美洲社区, 形成紧密联系的贸易社区。我国是一个LPG消费大国, 当前进口来源较为集中于中东地区和美国, 过于集中的贸易关系容易受到国际地缘政治关系的影响而产生贸易风险, 比如中美贸易战会给我国LPG进口带来极大的风险。因此, 合理利用好“一带一路”倡议, 打造我国与中东地区LPG合作共同体, 构建长期友好的双边或多边战略合作关系, 确保这一

稳定的进口来源安全,并不断扩大进口比例;同时,不断增加新的进口来源,提高进口来源的多元化,比如利用好北极航道,加强从挪威等欧洲地区的进口来源;此外,加强枢纽港口建设,提升我国港口对大型船舶的承载能力,有助于降低转运次数,从而实现提升运输效率和降低运输风险。这些措施的实行将在一定程度上降低贸易进口风险程度。

参考文献(References):

- [1] NARULA K. Energy Trade: The Backbone of Sustainable Energy Security/The Maritime Dimension of Sustainable Energy Security. Springer, Singapore, 2019: 73-93.
- [2] BARIHA N, SRIVASTAVA V C, MISHRA I M. Theoretical and experimental studies on hazard analysis of LPG/LNG release: A review. *Reviews in Chemical Engineering*, 2017, 33(4): 387-432.
- [3] MCDADE S. Fueling development: The role of LPG in poverty reduction and growth. *Energy for Sustainable Development*, 2004, 8(3): 74-81.
- [4] BOULT M. Risk management of LPG transport activities in Hong Kong. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 71(1-3): 85-100.
- [5] GUERSOLA M, ARNS STEINER M T, SCARPIN C T. A methodology for minimizing LPG transportation impact. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2017, 28(6): 807-820.
- [6] BAI X W, LAM J S L. An integrated analysis of interrelationships within the very large gas carrier (VLGC) shipping market. *Maritime Economics & Logistics*, 2019, 21(3): 372-389.
- [7] 张远,施圣瑜.解析北美LPG定价机制.中国石化,2016,(6):67-69.[ZHANG Y, SHI S Y. Analysis of North American LPG pricing mechanism. *China Petroleum and Chemical Industry*, 2016, (6): 67-69.]
- [8] LUCON O, COELHO S T, GOLDEMBERG J. LPG in Brazil: Lessons and challenges. *Energy for Sustainable Development*, 2004, 8(3): 82-90.
- [9] TAN S H, BARTON P I. Optimal shale oil and gas investments in the United States. *Energy*, 2017, 141: 398-422.
- [10] 刘延青.页岩气开发改变液化石油气(LPG)需求和贸易模式:随着美国致密油和页岩气产量的不断增长,美国从LPG净进口国转变为净出口国,全球LPG贸易格局也随之发生巨大变化.世界石油工业,2014,(6):22-26.[LIU Y Q. Shale gas development changes Liquefied Petroleum Gas (LPG) demand and trade patterns: With the continuous increase of U. S. tight oil and shale gas production, the United States has changed from a net importer of LPG to a net exporter, and the global LPG trade pattern has followed Great changes. *World Petroleum Industry*, 2014, (6): 22-26.]
- [11] BAI X, LAM J S L. A copula-GARCH approach for analyzing dynamic conditional dependency structure between liquefied petroleum gas freight rate, product price arbitrage and crude oil price. *Energy Economics*, 2019, 78: 412-427.
- [12] YANG Y, POON J P H, LIU Y, et al. Small and flat worlds: A complex network analysis of international trade in crude oil. *Energy*, 2015, 93: 534-543.
- [13] 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.资源科学,2017,39(8):1431-1443.[LIU L T, CHEN L, LIU X J, et al. Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1431-1443.]
- [14] YANG Y, DONG W. Global energy networks: Insights from headquarter subsidiary data of transnational petroleum corporations. *Applied Geography*, 2016, 72: 36-46.
- [15] GUAN Q, AN H, GAO X, et al. Estimating potential trade links in the international crude oil trade: A link prediction approach. *Energy*, 2016, 102: 406-415.
- [16] FENG S, LI H, QI Y, et al. Who will build new trade relations? Finding potential relations in international liquefied natural gas trade. *Energy*, 2017, 141: 1226-1238.
- [17] CHEN B, LI J S, WU X F, et al. Global energy flows embodied in international trade: A combination of environmentally extended input-output analysis and complex network analysis. *Applied Energy*, 2018, 210: 98-107.
- [18] ZHONG W, AN H, SHEN L, et al. The roles of countries in the international fossil fuel trade: An emergy and network analysis. *Energy Policy*, 2017, 100: 365-376.
- [19] PENG P, YANG Y, LU F, et al. Modelling the competitiveness of the ports along the Maritime Silk Road with big data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 118: 852-867.
- [20] 王列辉,林羽珊.1895—2016年全球海运网络中的海峡两岸港口运输联系变化.地理学报,2018,73(12):2282-2296.[WANG L H, LIN Y S. Changes of ports' connection across the Taiwan Straits in the global maritime network (1895-2016). *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2282-2296.]
- [21] KALUZA P, KÖLZSCH A, GASTNER M T, et al. The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface*, 2010, 7(48): 1093-1103.
- [22] 彭澎,程诗奋,刘希亮,等.全球海洋运输网络健壮性评估.地理学报,2017,72(12):2241-2251.[PENG P, CHENG S

- F, LIU X L, et al. The robustness evaluation of global maritime transportation networks. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(12): 2241-2251.]
- [23] PENG P, CHENG S F, CHEN J H, et al. A fine-grained perspective on the robustness of global cargo ship transportation networks. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 881-889.
- [24] 陈闪闪, 彭澎, 陆锋, 等. 海洋主航道对全球集装箱运输网络的影响分析. *地理研究*, 2019, 38(9): 2273-2287. [CHEN S S, PENG P, LU F, et al. Influence of the main channels on global container ship network. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2273-2287.]
- [25] 余红楚, 方志祥, 陆锋, 等. 重要经济发展区域间海运网络时空演变特性分析. *地球信息科学学报*, 2018, 20(5): 582-592. [YU H C, FANG Z X, LU F, et al. Spatial-temporal evolution patterns of maritime networks between important economic developing zones revealed. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(5): 582-592.]
- [26] PENG P, YANG Y, CHENG S F, et al. Hub-and-spoke structure: Characterizing the global crude oil transport network with mass vessel trajectories. *Energy*, 2019, 168: 966-974.
- [27] YU H C, FANG Z X, LU F, et al. Impact of oil price fluctuations on tanker maritime network structure and traffic flow changes. *Applied Energy*, 2019, 237: 390-403.
- [28] BLONDEL V D, GUILLAUME J L, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, 2008(10): P10008, DOI: 10.1088/1742-5468/2008/10/p10008.
- [29] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E*, 2004, 69 (2): 026113. <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.69.026113>.
- [30] NEWMAN M E J. Modularity and community structure in networks. *PNAS*, 2006, 103(23): 8577-8582.
- [31] PENG P, POON J P H, YANG Y, et al. Global oil traffic network and diffusion of influence among ports using real time data. *Energy*, 2019, 172: 333-342.

Global liquefied petroleum gas trading communities: An analysis from the perspective of maritime transportation network

PENG Peng^{1,2}, CHENG Shi-fen^{1,2}, CHEN Shan-shan³, LU Feng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China; 3. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Liquefied petroleum gas (LPG) plays a very important role in the global clean energy consumption market. It is transported by vessel between ports, and the ports have formed a series of extremely close-knit trading communities through local dense trade relations. In this study, we build transportation networks based on the global LPG vessel trajectories data from 2013 to 2017, and adopt a community detection method to analyze the characteristics of this type of trading community and evolution trend. The results show that: (1) The ports in the LPG trading community are more closely connected, and the hub ports in different communities are becoming closer over time. (2) The number of ports in each trading community shows an increasing trend, and the ports in the same community are becoming more geographically agglomerated. (3) Communities formed in the Asia-Pacific region, the Middle East, North and West Europe and the Mediterranean region have maintained an important position in the global LPG trade, while those in the Americas have gradually evolved from a relatively isolated community to one that has close ties with other communities over time.

Keywords: liquefied petroleum gas; vessel trajectory data; community detection; trade characteristics