

中国铁矿石海运输入格局解析及通道风险评估

谢永顺, 何廷堃, 易文, 彭鑫, 刘欢

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 针对目前贸易统计数据粒度粗、无法精准解析战略物资海运格局及风险的瓶颈, 本文基于AIS大数据和贸易数据的细粒度耦合, 刻画了中国铁矿石海运输入高分辨率空间特征; 结合多源异构数据, 利用空间多标准分析量化了风险水平。结果表明: (1) 输入格局在始发和终到两端均高度集聚, 澳大利亚和巴西是一主一次的双寡头供应国, 并主要流入环渤海地区港口群。(2) 输入风险呈显著空间分异, 且主导因素不同, 故而对风险的判断应兼蓄多重外部因素与自身暴露程度。(3) 基于高分辨率的通道细分纠正了既有认知的错判, 并通过通道层级的风险水平映射, 平衡了科学研究的精确性与分析决策的直观性。研究结果可为全球范围内战略物资海运格局的细粒度解析及风险评估提供借鉴。

关键词: 铁矿石; 海运通道; 输入格局; 风险评估; 空间多标准分析; AIS数据

世界百年未有之大变局与全球价值链结构性调整叠加震荡, 对全球战略性资源供需安全带来严峻风险和挑战。铁矿石作为重要战略资源, 其空间流动态势对于国际经济安全和地缘政治风险的影响极大, 尤其是对铁矿石进口依赖度高达80%的中国更是如此。而铁矿石国际贸易流动基本集中于海运, 海运贸易量占铁矿石总贸易量的比例超过90%。因此, 全面审视中国铁矿石海运输入格局及通道风险, 对于进一步摸清国际供需形势、制定入局与破局策略、提升海上通道控制力, 具有重要意义。

铁矿石海运的格局解析及风险评估既是面向中国战略需求的重大课题, 也是一项融合多学科、横跨多领域的科学难题。在资源科学领域, 资源禀赋的约束造成供需关系与进口依赖, 从而带来对资源安全内涵及其过程、主体与类别的关注研究^[1], 学者们以铁矿石等关键矿产资源的可持续供给为出发点, 以系统把握国家矿产资源安全动态变化和中国矿产资源的安全环境^[2,3]。在经济地理领域, 全球铁矿石资源利用的空间格局与过程是核心科学问题, 学者们从供需结构^[4-6]、贸易网络^[7-11]等方面出发开展了一系列研究: 基于“场”理论刻画了世界铁矿石资源的流动形态及位势演变^[5], 进而发现过去30年来铁矿石的消费中心由欧洲转移至亚洲, 而中国是最主要的“汇流场”^[6]; 基于复杂网络方法揭示了全球铁矿石贸易网络的低韧性结构及演化特征^[7], 并认为供需不平衡正持续加剧^[11]。在交通运输领域, 一部分学者聚焦于铁矿石的港航格局演化, 揭示了铁矿石运输的地域间

收稿日期: 2023-04-03; 修订日期: 2023-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3704200); 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XBZD-27)

作者简介: 谢永顺(1994-), 男, 河北石家庄人, 博士, 助理研究员, 研究方向为交通地理与全球海运。

E-mail: xieys@mail.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 刘欢(1983-), 女, 河北宁晋人, 博士, 教授, 研究方向为交通源排放与大气环境效应。

E-mail: liu_env@tsinghua.edu.cn

组织模式与规律^[12-15]；另一部分学者聚焦于铁矿石的航运网络模型搭建及抗毁性仿真，以解决航运网络的系统优化问题^[16-18]。在地缘政治领域，海运通道安全及其受地缘政治等因素影响的脆弱程度是学者们长期以来所关注的重点，学者们通过对海上通道的界定划分，结合定性评价与指标分析，对海外矿产等战略资源的供应安全进行分析^[19-22]。

整体来看，这些跨学科的研究都力图揭示铁矿石的全球流动格局，进而分析其依存度、脆弱性乃至风险水平。然而，面对跨学科的共性科学难题，上述研究在时空精度和评价方法上均存在瓶颈：首先，依赖于联合国商品贸易统计数据库（UN Comtrade）、钢铁统计年鉴等宏观统计数据，致使既有研究对铁矿石流动格局的刻画多停留在虚拟的国家贸易联系层面，缺乏对于海上运输过程的关注。少数对于海上运输通道或航线的解析也是基于全球航线网络的经验判断^[6,22]，在准确性上有待核实。其次，缺乏高精度的风险评估手段，致使既有研究对航运通道风险的评估要么是以网络失效的风险结果为导向，忽视了现实中的风险因素与风险点位；要么囿于定性分析或指标评价，时空精度普遍较低。因此，从上述交叉学科领域的共性痛点来看，当前亟需解决两个关键科学问题：（1）铁矿石海运格局的细粒度解析；（2）通道风险的精准评估。

综上所述，面向中国战略物资安全保障重大需求，本文基于船舶AIS大数据和贸易数据的细粒度耦合，刻画中国铁矿石海运输格局的高分辨率空间特征；结合自然本底、社会经济等多源异构数据，利用空间多标准分析法（SMCA）量化铁矿石海运输入通道的风险水平。研究结果可以为中国铁矿石海运输入行为的可信推断提供科学支撑，并为全球范围内战略物资海运格局的细粒度解析及风险评估提供方法借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 技术路线

技术路线如图1所示。首先，基于船舶AIS大数据和铁矿石进出港贸易数据，利用

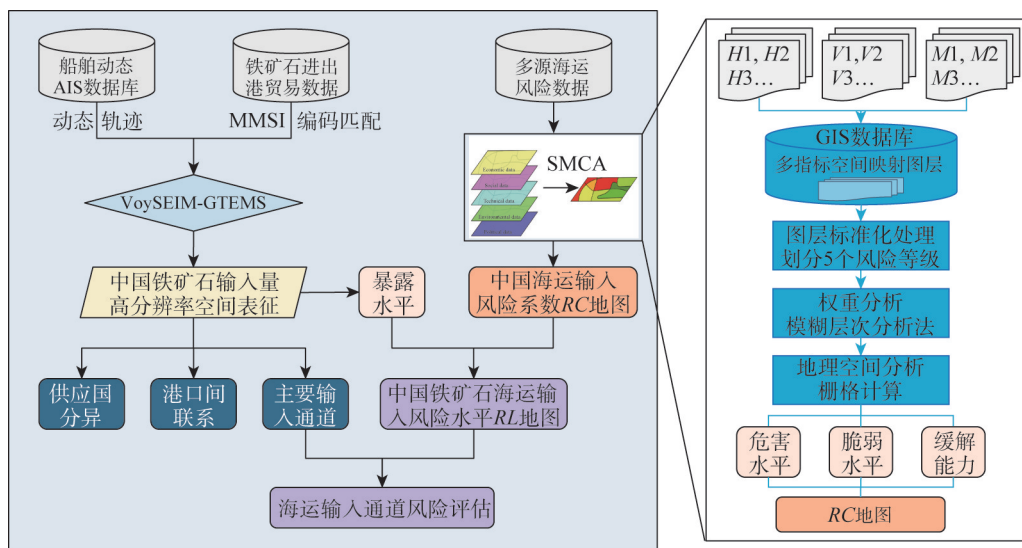


图1 技术框架

Fig. 1 Technical framework

研究团队在前期构建的 VoySEIM-GTEMS 耦合模型体系^[23]，实现船舶 AIS 大数据和贸易数据的细粒度耦合，从而对中国铁矿石海运输格局进行精细刻画。其中，输出结果还作为暴露水平应用于风险评估模型。其次，基于多源异构的海运风险数据，利用空间多标准分析法（SMCA）量化中国海运输风险系数（*RC*），进而结合铁矿石输入量的暴露水平，绘制中国铁矿石海运输风险（*RL*）地图。最后，将风险水平映射至各输入通道之上，识别需要重点关注的输入通道。具体模型及方法如下文所述。

1.2 研究方法

1.2.1 风险评估模型

联合国国际减灾战略（United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR）从危害、脆弱性、暴露、缓解能力提出了对风险概念的基本理解^[24]。在本文中，中国铁矿石海运输风险被定义为铁矿石运输船舶在海上航行期间发生危险事故或异常事件的可能性。基于此，可以将海运输风险系数（*RC*）视为由危害水平（*H*）、脆弱水平（*V*）和缓解能力（*M*）所组成的函数，进一步结合铁矿石海运量的暴露水平（*E*）可以构成中国铁矿石海运输风险指数（*RL*），计算如下：

$$RC = \frac{H \times V}{M}$$
(1)

$$RL = RC \times E$$
(2)

1.2.2 空间多标准分析

空间多标准分析（Spatial Multi-Criteria Analysis, SMCA）是将多标准决策分析（Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA）和地理信息系统（GIS）相结合从而进行空间决策的技术方法。国际上 SMCA 已经在土地利用规划^[25]、社会空间结构^[26]、能源发展规划^[27,28]、安全风险^[29]等决策研究上获得广泛应用。近年来，少数学者将该方法应用到海上运输风险的评价^[30,31]，但均以小尺度局部海域为主，尚未关注全球海域范围，也并未考虑具体航运主体及运输货物种类及货量。

本文借助 SMCA 方法，利用其空间评价优势，以量化中国铁矿石海运输风险系数（*RC*）。具体而言：（1）指标体系构建。指标的选取充分考虑包括自然和人文在内的多源异构数据，如表 1 所示，从危害水平、脆弱水平及缓解能力三个维度出发各选取三个代

表 1 评价指标选取、等级划分及权重
Table 1 The selection, ranking and weighting of indicators

系统层	指标层	等级					权重
		低	较低	中等	较高	高	
危害水平 <i>H</i>	水深/m	>250	150~250	50~150	10~50	<10	0.36
	风速/(m/s)	<5.4	5.4~8	8~10.8	10.8~13.8	>13.8	0.23
	海盗及武装抢劫/年均频次	<2	2~4	4~6	6~8	>8	0.41
脆弱水平 <i>V</i>	国家稳定性 (十分制)	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	0.43
	政府腐败度 (百分制)	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20	0.30
	军事基地距离/km	>3000	2200~3000	1500~2200	760~1500	<760	0.27
缓解能力 <i>M</i>	与主要航线的距离/km	>560	350~560	180~350	80~180	<80	0.29
	与主要港口的距离/km	>400	300~400	200~300	100~200	<100	0.33
	与中国港口的距离/km	>15000	10000~15000	5400~10000	1200~5400	<1200	0.38

表性的空间指标。受数据制约,暂未将海浪、降水、能见度等纳入指标体系,但不会对研究结果造成显著影响。(2) GIS数据库构建。利用缓冲区、克里金法、路径分析与重采样等系列GIS空间分析技术,将各个指标映射至格网像元为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的栅格图层。其中,国家稳定性和政府腐败度均为国家属性数据,通过专属经济区(Exclusive Economic Zone, EEZ)的范围进行空间映射。(3) 图层标准化处理。通过分析各指标数据分布、大小和风险系数之间的关系,依照既有文献的参数或自然断列法、等分法等划分方法,将全部指标划分为“低”“较低”“中等”“较高”和“高”5个等级,并按数字1~5进行赋值。等级划分如表1所示。(4) 权重分析。本文采用模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)对各指标进行加权,该方法是一种定性 with 定量相结合的系统分析方法,决策者通过语言变量(Linguistic Variable)来判断两个变量间的重要性程度,再将语言变量转化为三角模糊函数(Triangular Fuzzy Numbers, TFNs),进而对权重进行量化,具体方法详见文献[32]。本文邀请了5位海洋及交通运输地理领域的专家进行决策判断,最终权重结果如表1所示。(5) 地理空间计算。利用栅格计算器分别输出危害水平、脆弱水平及缓解能力三个维度的空间图层,并根据式(1)求解海运输入风险系数(RC)地图。

1.3 数据来源

铁矿石海运方面,船舶AIS数据选取2020年1月1日至12月31日的全部数据;铁矿石进出港贸易数据来源于GoGo-TRADE的商业数据。受疫情影响,2020年初铁矿石的供应受到了一定阻碍,但随着中国及贸易伙伴在很大程度上控制住疫情,铁矿石的国际贸易并未受到明显冲击。中国海关总署数据显示2020年中国铁矿石进口量为11.7亿t,创纪录高位,且高于随后的2021年和2022年全年进口量。因此,可以说明本文选取的2020年铁矿石的海运数据具有代表性。

此外,水深数据来源于美国国家地球物理数据中心NGDC (<https://www.ncei.noaa.gov/>); 风速数据来源于欧洲气象中心ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>); 海盗及武装抢劫数据来源于国际海事组织IMO (<https://gisis.imo.org/>); 国家稳定性用和平基金会FFP (<https://fragilestatesindex.org/data/>) 发布的外部干预指数来表示; 政府腐败度用透明国际TI (<https://tradingeconomics.com/>) 发布的腐败感知指数来表示,该组织为国际非政府组织,不代表作者及任何国家的立场; 军事基地数据来源于全球安全应急基金会(GSCF) (<https://www.globalsecurity.org/military/>); 海运航线是基于AIS自主构建的全球航线网络^[23]; 港口数据来源于世界港口指数WPI (<https://data.humdata.org/dataset/world-port-index>)。其中,海盗及武装抢劫数据截取2010—2020年,其他全部数据以2020年为主,缺失数据以2019年为补充。

2 结果分析

2.1 中国铁矿石海运输入格局解析

2.1.1 供应国分异

基于国家尺度解析中国铁矿石海运输入格局,发现以海运形式向中国供应铁矿石的国家共有33个,输入渠道较为丰富。但从年度供应量和船舶航次来看,其呈现显著的分异格局(图2)。就铁矿石输入量而言:澳大利亚和巴西是唯二输入总量达到亿吨

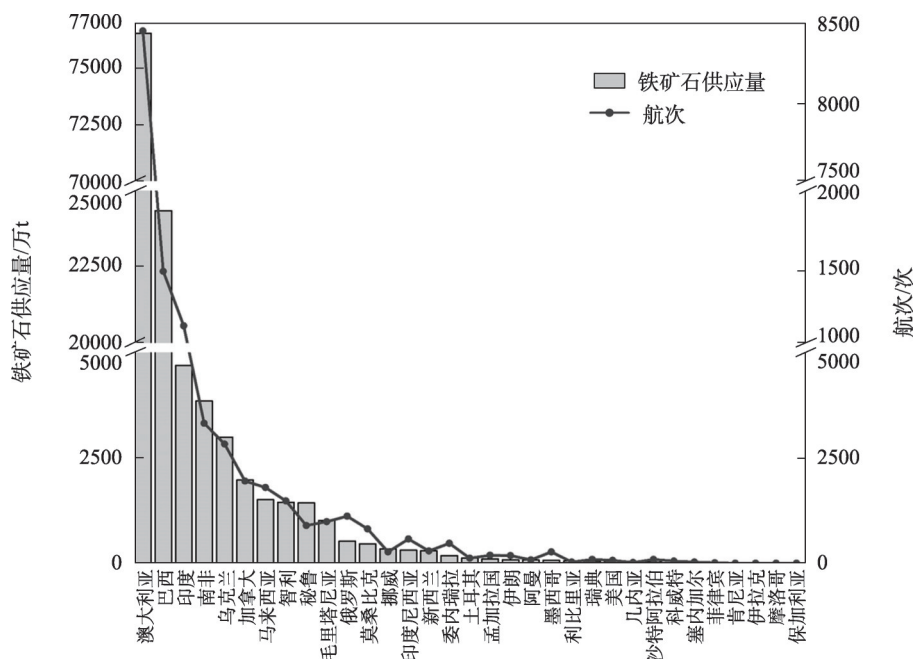


图2 中国铁矿石海运输入国家分异

Fig. 2 Differentiation of China's iron ore shipping import countries

的国家，分别为7.2亿t和2.3亿t，占全部输入量的62.7%和19.6%，远超其他国家；印度和南非为第二梯队，年输入总量均超过2500万t，占全部输入量的3%以上；乌克兰、加拿大、马来西亚、智利和秘鲁的年输入总量均超过1000万t；其他国家的输入量均较少，低于总量的1%。就船舶航次而言：澳大利亚最为突出，2020年共有8456个航次，达到中国全部铁矿石输入航次的65.7%，远高于其他国家；巴西和印度均超过1000个航次，分别占全部航次的11.4%和8.7%；其余国家航次均较少，均不足总量的3%。整体而言，中国铁矿石海运输入国家数量较多，但输入量的分配并不均衡，呈现极高的进口集中度。

可以看出，在国家尺度上，澳大利亚和巴西组成了一主一次的双寡头垄断格局，这使得中国在铁矿石供应端处于“资源卡脖子”的被动地位，一旦澳大利亚或者巴西发生突发状况，将会威胁中国整个钢铁产业链条乃至国家经济与地缘安全。例如，近年来澳大利亚政府频繁声称要对中国断供铁矿石，2019年巴西淡水河谷发生矿难导致铁矿石价格大涨。因此，尽管挪威、瑞典、塞内加尔、摩洛哥等众多供应国家的供应量极少，但其重要程度不可忽视。这些非主流供应国使得中国的铁矿石输入渠道趋向于多元化，从而降低中国对澳大利亚和巴西铁矿石资源进口的依赖程度。

2.1.2 港口间联系

基于港口尺度解析中国铁矿石海运输格局，发现33个供应国家共有92个港口向中国运输铁矿石。其中，澳大利亚、印度和巴西的供应港口数量最多，分别为14个、14个和12个；其余国家供应港口数量较少，均不超过5个。中国铁矿石输入港口共有58个，按照其空间集聚特征可以划分为环渤海、长三角、东南沿海和西南沿海共4个港口群（表2）。其中广州港应属珠三角港口，但因其铁矿石运量较少，故本文将其并入西南沿

表2 中国铁矿石海运接卸港口划分
Table 2 Classification of China's iron ore shipping ports

港口群	包含港口	数量/个
环渤海	鲅鱼圈, 曹妃甸, 大连, 丹东, 董家口, 和平, 黄骅, 锦州, 京唐, 莱州, 岚北, 岚桥, 岚山, 连云港, 龙口, 秦皇岛, 青岛, 日照, 天津新港, 威海, 潍坊, 烟台, 燕尾	23
长三角	北仑, 常熟, 常州, 大丰, 江阴, 罗泾, 马迹山, 南京, 南通, 宁波, 如皋, 上海, 鼠浪湖, 台州, 太仓, 泰州, 扬州, 张家港, 镇江, 舟山老塘山, 舟山武港	21
东南沿海	福州港, 宁德港, 莆田港, 泉州港, 厦门港, 秀屿港	6
西南沿海	北海, 防城, 高栏港, 广州, 茂名, 钦州, 阳江, 湛江	8

海港口群。

基于铁矿石海运量构建海外供应港口与国内接卸港口间的联系,并提取主要联系(港间运输量大于50万t)进行可视化分析,如图3所示,其中黄色连线代表澳大利亚港口的铁矿石输入量,蓝色代表巴西港口的铁矿石输入量。从海外供应港口来看:澳大利亚的黑德兰港占绝对主导地位,发往中国的铁矿石年度运量超过4.4亿t,占澳大利亚输入中国总量的60.9%,占中国全部进口总量的37.8%,远高于其他港口;丹皮尔港、沃尔科特港以及巴西的马德拉港的铁矿石供应量均超过1.2亿t,分别占中国总进口量的10.6%、10.5%和11.2%;除此之外,印度—帕拉迪普港、毛里塔尼亚—努瓦迪布港、秘鲁—圣尼古拉斯港、乌克兰—尤日内港和赞比亚—萨尔达尼亚港也是中国输入铁矿石的重要港口。从国内接卸港口来看:以曹妃甸港、京唐港、天津新港等为代表的环渤海港口群是中国铁矿石海运输入格局中最重要门户,年度输入铁矿石总量超过6.5亿t,约占中国输入总量的60%;以北仑港、江阴港、张家港等为代表的长三角港口群是次重要的门户,年度输入量达到3.4亿t,占总量的30%;以防城港、湛江港等为代表的西南沿海港口群的输入量达到1亿t,占总量的8.7%;东南沿海港口群输入量合计不足0.5亿t,占比最小。

港口尺度的输入格局与铁矿石全产业链的国际、国内空间布局结构具有密切关联。在产业链上游,矿山开采与运输的协同是发货港格局形成的社会经济内因,例如澳大利亚的必和必拓、力拓、FMG等铁矿石矿山大多分布于澳大利亚西部,故而位于澳大利亚西北海岸的黑德兰港、丹皮尔港等成为向中国发货的重要港口。在产业链下游,钢厂企业的原材料需求与物流成本的控制是中国铁矿石接卸港格局形成的社会经济内因,例如

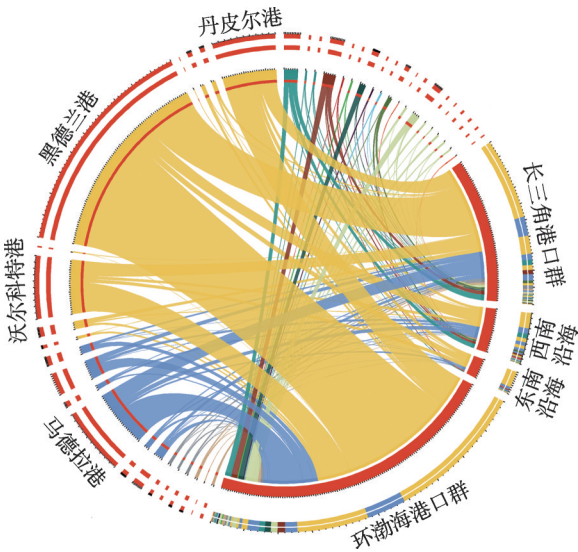


图3 中国铁矿石海运输入的港间联系格局
Fig. 3 The pattern of port-to-port linkage in China's iron ore shipping import

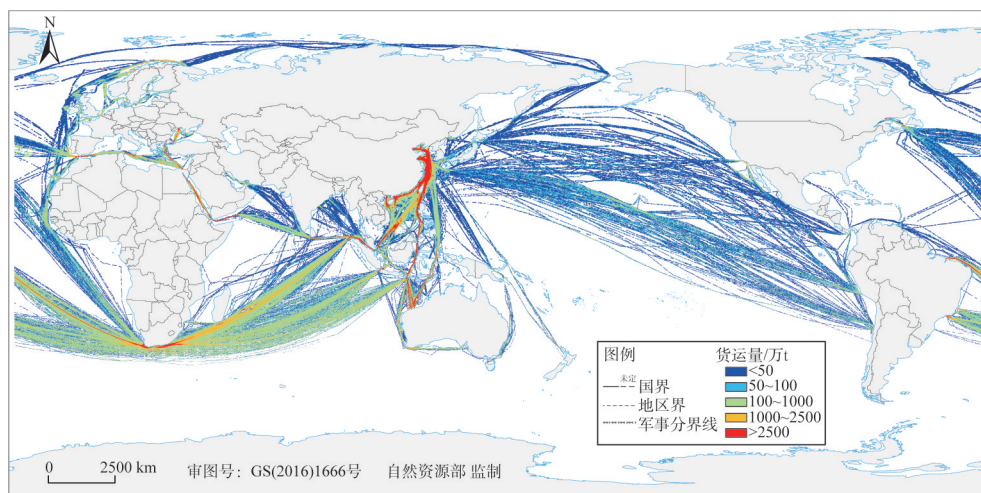
首钢京唐钢铁厂、鞍钢鲅鱼圈钢铁厂、山钢日照钢铁厂等千万吨级的钢铁厂围绕环渤海的深水良港而建，使得环渤海港口群成为中国铁矿石输入的重要门户。

结合国家与港口尺度来看，中国铁矿石的海运输格局具有发货和到货两端集聚的特征。在发货端，澳大利亚和巴西是一主一次的双寡头，尤其是澳大利亚的西北海岸是中国铁矿石供应的最大货源地；在到货端，环渤海港口群承接了绝大多数铁矿石进口。考虑到主要发货地与主要到货地的地理区位及航运经济行为，如此两端集聚的输入格局定将造成特定海上航线的高度集聚和过度依赖。例如，由澳大利亚出港的船舶必经东南亚海域的关键海峡，而所有到港铁矿石资源都将汇集于中国南海、东海及黄海。进而，中国铁矿石海运输的过程将构成局部海域的高暴露，最终导致海运输的高风险。因此，十分有必要从空间视角出发对中国铁矿石海运输行为进行细致剖析。

2.2 中国铁矿石海运输通道划分

2.2.1 输入量的高分辨率空间特征

根据船舶 AIS 轨迹数据和铁矿石进出港数据的细粒度耦合结果，核算 2020 年全时段格网像元为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的中国铁矿石海运输输入量，结合分位数统计的划分标准，以 50 万 t、100 万 t、1000 万 t 和 2500 万 t 为阈值将其划分为 5 个等级，并进行空间可视化（图 4）。整体来看，中国铁矿石海运输格局几乎覆盖了全球所有主流航线，具有良好的空间多样性；但货运量在空间上具有显著差异，极度依赖于少数航线。这与上述供应国家及港口层面的解析相契合。具体而言，铁矿石货运量超过 2500 万 t 的格网仅占 1.31%，超过 1000 万 t 的仅占 3.11%，除中国沿海地区以外，主要分布于东南亚、好望角及地中海—红海地区的航线；铁矿石货运量低于 50 万 t 的格网占 66.42%，主要由跨太平洋、跨大西洋及跨北极地区的航线所组成。形成该格局的内在原因如下：（1）发货量的差异。例如，由澳大利亚西北海岸港口向北输入中国的铁矿石较多，这



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 4 中国铁矿石海运输输入量的高分辨率空间特征

Fig. 4 High resolution spatial characteristics of China's iron ore shipping import quantities

造成东南亚航线的货运量十分突出；而由北欧向中国输入的铁矿石则较少，故而跨北极航线的货运量较低。(2) 航道宽度及航线可替代性的差异。例如，马六甲海峡和地中海—红海是全球海运的重要咽喉，是欧洲、非洲、西亚地区向中国输入货物的必经之地，且其通道狭窄，因此集聚了极高的铁矿石货运量；而跨太平洋航线的实际自由度较高，不受航道宽度限制，因此在空间上较为分散，造成单个格网内铁矿石货运量普遍较低。

2.2.2 输入通道的识别及层级划分

基于中国铁矿石海运输入轨迹的高分辨率空间特征，充分考虑航线的连贯性与海上关键节点的分割性，按照先后关系划分三个层级的中国铁矿石海运输入通道(图5)。(1) 一级输入通道表示铁矿石海上运输的最后一段航程，直接衔接中国南海、东海或黄海等中国海域：南部由马来群岛的马六甲海峡、巽他海峡和龙目—望加锡海峡共三个细分通道所组成，囊括了中国南海及东南亚地区的重要海域；东部由菲律宾海的a、b、c和d共4个细分通道所组成，并依据输入量的高分辨率特征，将宫古水道等台湾岛周边重要海域所涵盖；北部为朝鲜海峡通道，充分考虑了中国与日韩毗邻的关键海域。(2) 二级输入通道主要是直接衔接一级输入通道的航线：地中海—红海和孟加拉湾两个通道直接衔接马六甲海峡；印度洋的a、b和c共三个细分通道分别衔接马六甲海峡、巽他海峡和龙目—望加锡海峡三个重要一级通道；澳新输入通道更是可细分为a、b、c、d和e共5个二级通道，分别与菲律宾海a、b、c及龙目—望加锡海峡共4个一级通道相衔接；太平洋输入通道亦可划分为a、b和c共3个细分通道，其中北美西部地区主要与朝鲜海峡通道相衔接，而拉美西部主要与菲律宾海d通道相衔接；北极通道是近年来欧洲与东亚地区实现货物运输的新路线，与朝鲜海峡通道相衔接。(3) 三级输入通道距中国的路径距离最远，在部分全球战略支点处与二级通道相衔接：西北欧、大西洋a、黑海和波斯湾4个三级输入通道分别在直布罗陀海峡、苏伊士运河和拉克代夫海与地中海—红海通道相衔接；大西洋b、c和d共3个三级输入通道均

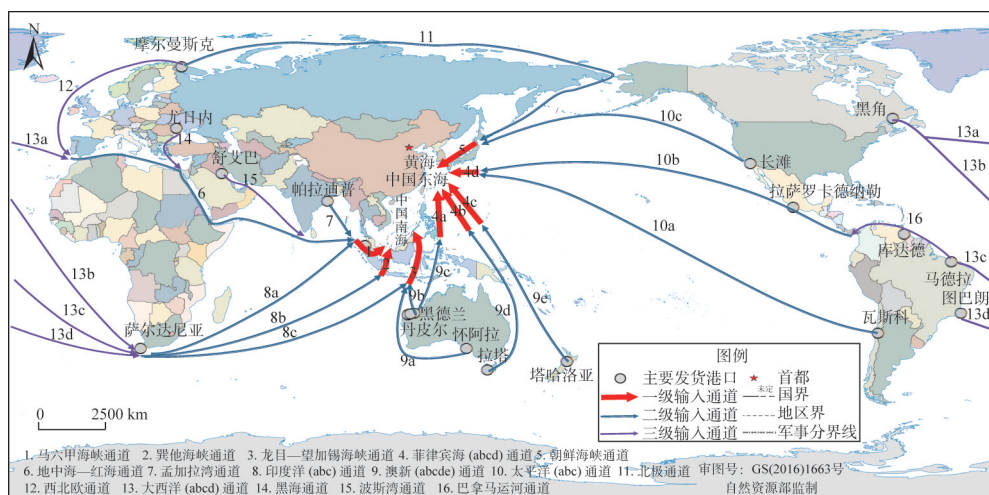


图5 中国铁矿石海运主要输入通道及层级划分

Fig. 5 Hierarchy of China's iron ore shipping main import channels

经好望角连接印度洋通道；巴拿马运河主要是委内瑞拉和美国南部港口的输入通道，与太平洋b通道相连。

相比既有研究，本文对铁矿石海运输输入通道的识别与划分具有两处改进。(1)修正了宏观统计研究对输入航线的错误估计。多数既有研究在刻画铁矿石或战略性矿产海运主要航线之时，仅依赖双边贸易量的宏观统计与全球航线网络的经验判断，导致部分航线的错误认定。例如，部分研究认为巴西（尤其是淡水河谷的铁矿石主要发货港——马德拉港）输入中国的航线主要经过巴拿马运河和太平洋通道^[19,22]，而通过AIS轨迹数据和铁矿石进出港数据的细粒度耦合，揭示了真实的输入路径应为南大西洋—好望角—印度洋—马六甲海峡。(2)相比既有经验航道的划分更为精细。首先，本文突出了海运输输入通道的层级性。例如，马六甲海峡通道汇集了多个方向的货运量，若与其他通道一并讨论极易将重要程度混淆，而通过分层级解析则有利于运量与风险的精准评估。其次，对当前研究普遍泛指的通道进行了细化。例如，澳新通道、印度洋通道、太平洋通道以及大西洋通道均被解构为多个细分通道，如此有利于横向比较可替代性通道之间的差异，对风险水平的精准评估与未来的预警分析及路径优化具有重要意义。

对输入通道的识别与划分是一次在科学研究精确性与分析决策直观性之间寻求平衡的有益尝试，也是量化中国铁矿石海运通道风险的前置工作。需要说明的是，本文并未将中国南海、东海及黄海等中国近海海域进行通道划分，主要因为这部分海域基本等同于中国海运输输入的终到地，且汇集了“来自不同产地、途径与航线”的大量铁矿石，因此在全球海运输输入通道的横向比较分析中意义不大。但并不表示这些地区的风险水平较低，后文中基于高分辨率的输入风险地图仍将对其着重分析。

2.3 中国铁矿石海运输输入风险评估

2.3.1 输入风险地图

根据SMCA方法量化中国海运输输入风险系数(RC)，并依据自然断裂法划分5个等级(图6)。整体而言，高风险区主要由以下6个地区所组成：亚丁湾及非洲东部沿岸、几内亚湾及非洲西部沿岸、俄罗斯北极地区、南极地区、东南亚地区与加勒比海地区。这代表中国海运输输入船舶在以上区域发生危险事故或异常事件的可能性最高。而从各评价指标的系统层分解来看，其风险内涵各不相同：(1)亚丁湾及非洲东部沿岸、几内亚湾及非洲西部沿岸和东南亚地区受大风、海盗及恐怖事件、国家稳定性等自然与人文多重因素作用，危害水平、脆弱水平均较为突出，而其中东南亚的缓解能力更高，使其最终的风险系数略低于前两者。(2)加勒比地区和俄罗斯北极地区的高风险主要源于其脆弱水平，国家稳定和腐败程度是致使其脆弱水平高的主要原因。(3)南极地区远离全球海运的主要航线、主要港口及中国港口，致使其缓解能力等级最低，进而导致其风险系数较高。(4)此外，关岛及太平洋中部岛屿的中高风险系数则主要源于美国军事基地集聚的影响。

以2.2.1节中国铁矿石海运输输入量的高分辨率空间特征作为暴露水平(E)，进一步量化最终的中国铁矿石海运输输入风险水平RL，并根据自然断裂法划分为5个等级(图7)。整体来看，东南亚地区与中国近海地区构成了面积最大的高风险区。作为中国铁矿石海运输输入的最后一段航程，这部分区域的风险因素值得高度关注。对于东南亚而言，高风

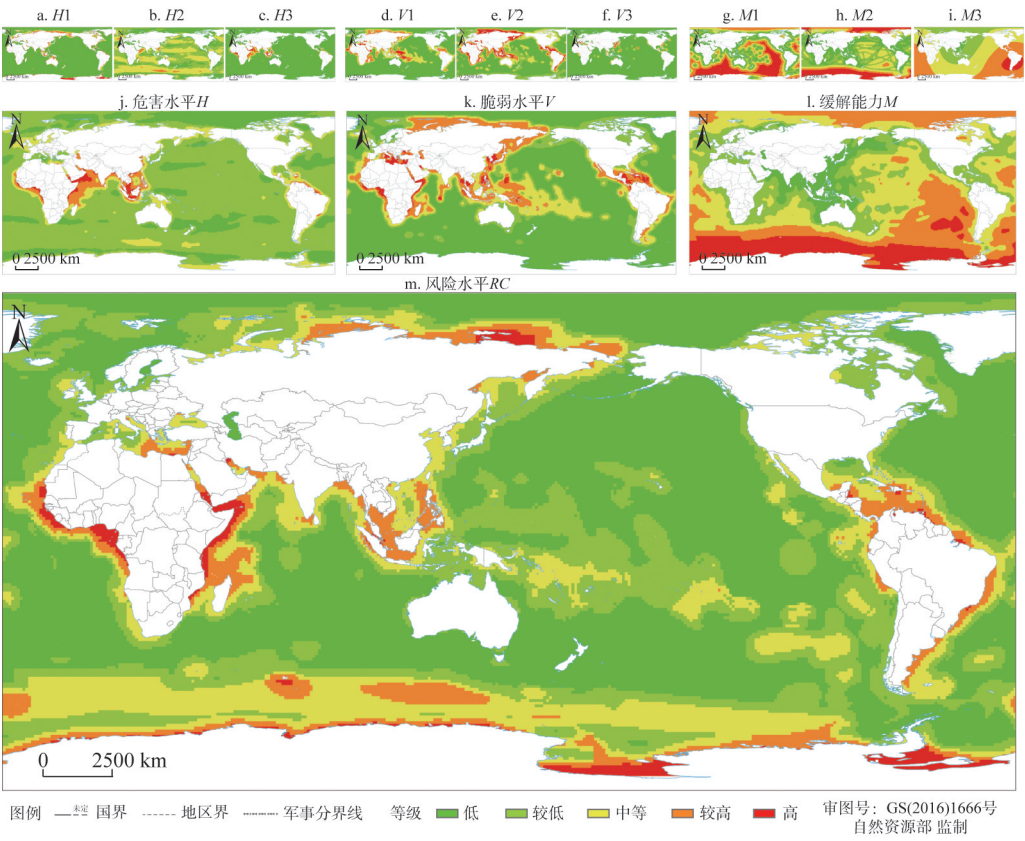


图6 中国海运输入风险系数RC

Fig. 6 China's maritime shipping import risk coefficient

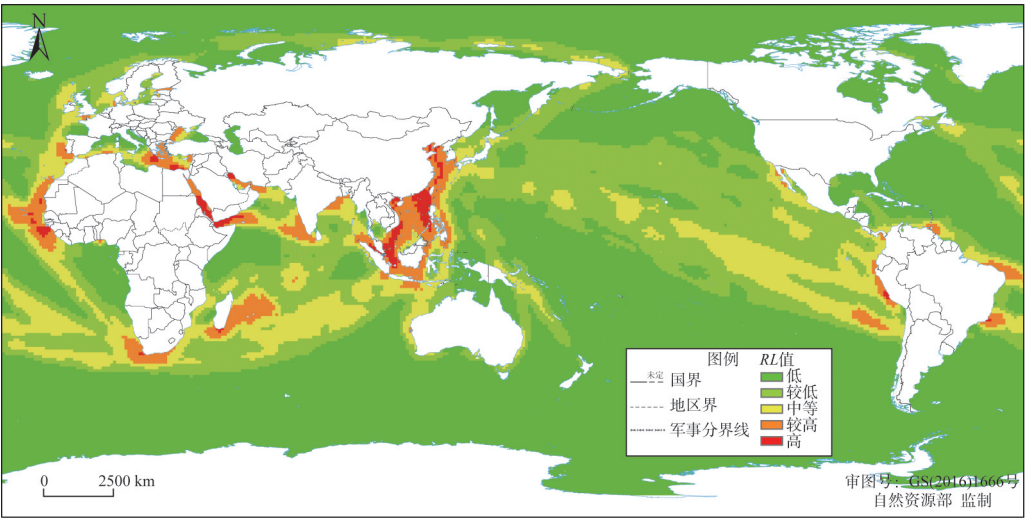


图7 中国铁矿石海运输入风险水平RL

Fig. 7 China's iron ore shipping import risk level

险系数与高暴露水平决定了该区域的高风险特征,以马六甲海峡、新加坡海峡以及越南的南部海域最为突出;对于中国近海而言,尽管在RC地图中仅属于中等或较低风险水平,但极高的暴露水平令该区域的海运风险不容忽视,尤其是中国南海与菲律宾毗邻的部分,及中国东海、黄海与日本、韩国的海域分界。但正如2.2.2小节所述,汇集其他所有通道货运量的中国近海区域必然将呈现最高的暴露水平与风险等级,故而在后续通道风险的横向对比中进行排除。

对于其他地区而言:(1)亚丁湾—地中海地区构成一条高风险廊道,尽管该廊道的铁矿石总货运量并非最多,但囿于实际航运通道狭长,单位通道面积及通道截面的暴露水平较高,再叠加RC地图中的高风险系数,致使其成为欧洲向中国海运输的重要风险廊道。(2)非洲西部沿岸亦属于高风险地区,一方面该区域集聚了毛里塔尼亚、塞内加尔、利比里亚和几内亚等众多西非铁矿石出口国家的发货港口;另一方面该区域是西北欧和加拿大向中国输入铁矿石的重要途经地,并且从RC地图来看该地区的风险系数亦较高。然而,当前鲜有研究曾揭示此区域的重要风险地位,因此值得重点关注。(3)好望角周围区域亦具有较高风险水平,因为该区域既是南非萨尔达尼亚港的重要发货源头,又是巴西向中国输入铁矿石的重要途经地。(4)南美的部分沿岸区域风险水平较高,与RC地图中的高风险区相符,且源于这些区域集聚了大量铁矿石发货港。但相较而言,加勒比地区的风险水平并不突出,因为中国铁矿石的输入格局并不以加勒比海和巴拿马运河为主。

2.3.2 通道风险量化

将中国铁矿石海运输风险评价的各项指标映射到所划分的主要输入通道之上,并以百分制形式进行表示(表3)。整体而言:(1)输入通道的风险水平在层级之间、层级内部均具有显著差异。一级输入通道的平均风险水平最高(40.06),三级输入通道次之(34.35),最后为二级输入通道(30.93),这表明中国铁矿石海运输通道的风险主要体现在海运的始发和终到两端,而航程中段的风险则相对较低;从标准差来看,一级输入通道(15.79)明显高于二级(7.95)和三级通道(7.34),说明风险水平在终到端通道之间具有十分显著的差异,而在始发和中段的通道较为平均。(2)通道风险的主导因素在层级之间、层级内部均具有显著分异。风险系数和暴露水平在部分通道上具有错配关系,并主要体现在二级、三级输入通道之中,这说明决策者在关注航运始发和中段的风险之时,尤其需要同步考虑货物的暴露水平和通道的综合风险,单一维度的风险评价则容易造成风险形势的错误估计。

从各层级输入通道来看:(1)马六甲海峡、巽他海峡、龙目—望加锡海峡是风险水平最高的三个一级输入通道,也是全部通道中风险等级最高的。这三个通道均属于马来群岛的重要咽喉,横亘于印度洋和中国南海之间,是西澳、中东、非洲、欧洲乃至南北美西部地区向中国输入铁矿石的最后一道关卡,在危害水平、脆弱水平、缓解能力方面均较高。尽管彼此间的替代作用分散了铁矿石的输入量,但其暴露水平仍高于大部分通道。(2)在二级输入通道中,地中海—红海的风险等级最高,这源于其相对较高的危害水平、脆弱水平;从暴露水平来看,澳新b通道远超其他通道,印度洋的三条通道也较高,但这些通道的缓解能力强,危害水平和脆弱水平低,因此整体风险水平处于中等地

表3 中国铁矿石海运输入通道风险评估

Table 3 Assessment of China's iron ore shipping import channel risk

代码	通道层级	通道名称	危害水平	脆弱水平	缓解能力	风险系数	暴露水平	风险水平
1	一级输入通道	马六甲海峡	92.62	68.29	99.18	63.77	63.18	63.47
2		巽他海峡	90.16	60.97	100.00	54.97	61.27	58.04
3		龙目一望加锡海峡	76.10	62.81	100.00	47.80	63.99	55.30
4a		菲律宾海 a	50.54	52.46	99.58	26.63	57.95	39.28
4b		菲律宾海 b	40.04	38.72	91.55	16.94	27.18	21.46
4c		菲律宾海 c	40.00	43.24	92.05	18.79	22.49	20.56
4d		菲律宾海 d	39.00	45.95	94.00	19.06	45.42	29.43
5	二级输入通道	朝鲜海峡	43.70	68.22	100.00	29.81	36.44	32.96
6		地中海—红海	66.64	60.13	84.86	47.22	52.88	49.97
7		孟加拉湾	54.46	51.95	99.90	28.32	42.82	34.83
8a		印度洋 a	38.09	37.03	81.84	17.23	83.95	38.04
8b		印度洋 b	35.95	23.13	69.29	12.00	81.50	31.27
8c		印度洋 c	38.27	20.88	62.66	12.75	70.29	29.94
9a		澳新 a	37.23	33.30	87.09	14.23	42.61	24.63
9b		澳新 b	43.92	40.08	100.00	17.60	89.07	39.60
9c		澳新 c	38.68	54.61	100.00	21.12	58.91	35.27
9d		澳新 d	40.76	48.40	89.86	21.95	36.78	28.42
9e		澳新 e	34.65	48.72	79.72	21.18	29.50	25.00
10a	三级输入通道	太平洋 a	39.64	24.52	52.44	18.53	46.87	29.47
10b		太平洋 b	35.76	28.26	62.92	16.06	38.06	24.72
10c		太平洋 c	38.50	25.88	77.59	12.84	21.25	16.52
11		北极	42.44	61.77	70.98	36.94	17.31	25.28
12		西北欧	48.23	34.58	79.17	21.06	41.98	29.74
13a		大西洋 a	33.76	28.67	77.76	12.45	50.93	25.18
13b		大西洋 b	38.03	27.77	55.73	18.95	52.98	31.69
13c	三级输入通道	大西洋 c	38.4	25.81	58.30	17.04	70.64	34.69
13d		大西洋 d	33.11	22.59	52.57	14.23	68.24	31.16
14		黑海	45.34	69.26	80.00	39.26	67.83	51.60
15		波斯湾	76.32	52.55	98.57	40.69	34.35	37.38
16		巴拿马运河	62.65	57.61	73.75	48.94	22.72	33.34

位。(3) 在三级输入通道中, 尽管大西洋c通道和d通道的暴露水平均较高, 但其危害水平和脆弱水平均较低, 因此风险水平并不突出; 尽管黑海的暴露水平尚且略低于二者, 但其脆弱水平极高, 导致风险水平较高, 是最需重视的三级通道; 波斯湾和巴拿马运河的风险系数较高, 但暴露水平低, 因此风险水平较低。

3 结论与讨论

3.1 结论

当前主流研究对全球战略物资贸易流动态势及海上运输行为的认识受限于宏观统计

数据与历史经验推断, 因此难以实现海运格局的精细刻画与输入风险水平的量化评估, 并容易造成诸如输入通道误判等不实的结论。本文以船舶AIS大数据和SMCA方法为驱动, 构建了一套海洋运输高分辨率空间标识的技术方法, 以解决资源科学、经济地理、交通运输、地缘政治等交叉学科领域在分析精度和评价方法上面临的共性科学难题。并以重要战略性矿产资源以及“大宗货物之王”——铁矿石为例, 刻画了中国铁矿石海运输格局的高分辨率空间特征, 量化了中国铁矿石海运输的通道风险。通过研究得到了以下结论及启示:

(1) 拓展多元供应渠道。研究发现, 澳大利亚和巴西组成了一主一次的双寡头垄断格局, 但众多非主流供应国使输入渠道趋向于多元化。因此, 中国应进一步在境外寻求稳定、可靠的铁矿石供应基地, 以铁矿石资源丰富的“一带一路”周边、拉美、非洲等国家为重点, 储备境外矿山资源, 开展产业链共生合作模式, 从而拓展铁矿石资源的供应渠道, 以降低对少数国家、企业的进口依赖程度, 提升应对突发事件的调度能力。

(2) 谋划替代输入通道。研究发现, 马六甲海峡、巽他海峡和龙目—望加锡海峡等东南亚海域的海运风险系数和铁矿石暴露水平均较高, 成为多数船舶必经的高风险输入通道。因此, 中国应积极谋划其他替代输入通道, 加强跨境水铁联运通道建设, 例如充分利用中巴经济走廊, 借助巴基斯坦瓜达尔港的战略区位与接卸转运能力, 打通由中国向西衔接印度洋的新通道, 从而降低对当前高风险通道的依赖程度, 提升整体输入格局的可靠性与抗毁性。

(3) 构建多维感知系统。研究构建了战略物资海洋运输高分辨率空间标识的技术方法, 并结合自然本底、社会经济等多源异构数据, 揭示了风险水平的空间分异及其主导因素差异。基于此, 管理部门除了在对铁矿石等战略物资进出口进行实时监管之外, 也应充分考虑海洋环境、地缘政治、市场经济等多维要素的扰动及其对海运风险的影响, 积极构建多维度的感知系统, 从而提高铁矿石等战略物资海运输风险的源头感知能力。

3.2 展望

面向中国战略物资安全保障重大需求, 本文构建的高分辨率空间标识技术方法弥补了目前贸易统计数据粒度粗、无法精准获取全球物资流动与贸易状态的瓶颈, 突破了海洋运输关键通道风险量化评估的技术。该方法不仅适用于铁矿石, 还可以推广到其他重要物资海运格局的细粒度解析及风险评估, 从而为全球战略物资贸易、海洋运输安全等提供宏观决策支撑。

此外, 本文所构建的技术方法还可以在时间分辨率上进行提升。船舶AIS大数据的高频信号能够达到分钟级别甚至秒级; SMCA方法所综合的多源自然人文数据亦能体现较高时间精度, 例如风速等体现自然风险的指标, 以及GDELT数据等反映国际关系与地缘政治风险的指标^[33]。基于此, 能进一步突破全球范围内战略物资海洋运输时空标识与运输行为的可信推断、海洋运输关键通道的实时监测与风险预警等关键技术, 这也将成为下一步研究的重点。

致谢: 感谢王光谦院士、邵安林院士等在项目执行过程中的方向引导。

参考文献(References):

- [1] 谷树忠, 姚予龙, 沈镭, 等. 资源安全及其基本属性与研究框架. 自然资源学报, 2002, 17(3): 280-285. [GU S Z, YAO Y L, SHEN L, et al. Conceptual framework and research focus of resource security. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 280-285.]
- [2] 范松梅, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铁矿石资源供应风险评价与治理研究. 资源科学, 2018, 40(3): 507-515. [FAN S M, SHA J H, YAN J J, et al. Risk assessment and management of iron ore resource supply in China. *Resources Science*, 2018, 40(3): 507-515.]
- [3] 沈镭, 钟帅, 胡纾寒. 新时代中国自然资源研究的机遇与挑战. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1773-1788. [SHEN L, ZHONG S, HU S H. Opportunities and challenges of natural resources research of China in the New Era. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1773-1788.]
- [4] 张进, 王诺. 基于“场”理论的世界铁矿石资源分布与流动形态. 经济地理, 2017, 37(11): 109-116. [ZHANG J, WANG N. Distribution and flow pattern of world iron ore resources based on "field" theory. *Economic Geography*, 2017, 37(11): 109-116.]
- [5] 王诺, 张进, 卢毅可, 等. 1971—2015年世界铁矿石资源供需与流动格局及其演变. 地理研究, 2019, 38(5): 1253-1264. [WANG N, ZHANG J, LU Y K, et al. The supply-demand and flow pattern of iron ore and its evolution in the world from 1971 to 2015. *Geographical Research*, 2019, 38(5): 1253-1264.]
- [6] SONG Y, WANG N, YU A. Temporal and spatial evolution of global iron ore supply-demand and trade structure. *Resources Policy*, 2019, 64: 101506, Doi: 10.1016/j.resourpol.2019.101506.
- [7] 王文宇, 贺灿飞, 任卓然. 中国矿产资源贸易网络演化. 自然资源学报, 2021, 36(7): 1893-1908. [WANG W Y, HE C F, REN Z R. Evolution of mineral resources trade network in China. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(7): 1893-1908.]
- [8] HAO X, AN H, SUN X, et al. The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: From network perspective. *Resources Policy*, 2018, 57: 45-54.
- [9] 徐斌. 国际铁矿石贸易格局的社会网络分析. 经济地理, 2015, 35(10): 123-129. [XU B. Social network analysis of the international iron ore trade pattern. *Economic Geography*, 2015, 35(10): 123-129.]
- [10] 郝晓晴, 安海忠, 陈玉蓉, 等. 基于复杂网络的国际铁矿石贸易演变规律研究. 经济地理, 2013, 33(1): 92-97. [HAO X Q, AN H Z, CHEN Y R, et al. Research on evolution of international iron ore trade based on complex network theory. *Economic Geography*, 2013, 33(1): 92-97.]
- [11] 于娱, 马代鹏, 王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性. 资源科学, 2022, 44(10): 2006-2021. [YU Y, MA D P, WANG X M. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2006-2021.]
- [12] ZHAO P, HE Z, YIN L, et al. Changes in the geographical distribution of global iron ore shipping flows, 2000-2019. *Journal of Transport Geography*, 2022, 99: 103277, Doi: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103277.
- [13] YANG D, WANG S. Analysis of the development potential of bulk shipping network on the Yangtze River. *Maritime Policy & Management*, 2017, 44(4): 512-523.
- [14] 片峰, 栾维新, 孙战秀, 等. 基于铁路距离的环渤海铁矿石中转腹地划分. 经济地理, 2015, 35(4): 99-107. [PIAN F, LUAN W X, SUN Z X, et al. A rail distance based measurement for urban hinterland area of the iron ore transshipment port in the Bohai Rim Region. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 99-107.]
- [15] 张梦天, 王成金, 王成龙. 中国港口铁矿石运输的空间格局及演化. 经济地理, 2016, 36(8): 99-105. [ZHANG M T, WANG C J, WANG C L. Distribution characteristics and evolution of port's iron ore transport in China. *Economic Geography*, 2016, 36(8): 99-105.]
- [16] 吴迪, 王诺, 于安琪, 等. “丝路”海运网络的脆弱性及风险控制研究. 地理学报, 2018, 73(6): 1133-1148. [WU D, WANG N, YU A Q, et al. Vulnerability and risk management in the Maritime Silk Road container shipping network. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1133-1148.]
- [17] 邵斐, 张永锋, 真虹. 中国进口铁矿石海运网络抗毁性仿真. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 311-321.

- [SHAO F, ZHANG Y F, ZHEN H. Invulnerability simulation analysis of Chinese iron ore imports shipping network. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(1): 311-321.]
- [18] 邵斐, 真虹. 准班轮模式下干散货船枢纽港转运及联营优化. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(4): 21-27. [SHAO F, ZHEN H. An optimization method of bulk carriers in transshipping network and pooling operation based on quasi-linear mode. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(4): 21-27.]
- [19] 杜德斌, 马亚华, 范斐, 等. 中国海上通道安全及保障思路研究. *世界地理研究*, 2015, 24(2): 1-10. [DU D B, MA Y H, FAN F, et al. China's maritime transportation security and its measures of safeguard. *World Regional Studies*, 2015, 24(2): 1-10.]
- [20] 李晶, 吕靖, 蒋永雷, 等. 我国海上通道安全评价及政策建议. *中国软科学*, 2017, (11): 8-17. [LI J, LYU J, JIANG Y L, et al. Safety evaluation of China's sea lines of communication. *China Soft Science*, 2017, (11): 8-17.]
- [21] 马晓雪. 中国海上运输通道安全脆弱性演化机理理论析. *世界经济与政治*, 2017, (11): 108-129, 159. [MA X X. Analysis of the evolution mechanism about safety vulnerability of China's marine transport lanes. *World Economics and Politics*, 2017, (11): 108-129, 159.]
- [22] 李颖, 陈其慎, 柳群义, 等. 中国海外矿产资源供应安全评价与形势分析. *资源科学*, 2015, 37(5): 900-907. [LI Y, CHEN Q S, LIU Q Y, et al. An indicator system for overseas mineral resource supply security and analysis of the security situation for China's overseas resource supply. *Resources Science*, 2015, 37(5): 900-907.]
- [23] WANG X, LIU H, LYU Z, et al. Trade-linked shipping CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 945-951.
- [24] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction, <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>, 2023-07-03.
- [25] MOSADEGHI R, WARNKEN J, TOMLINSON R, et al. Comparison of fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Computers Environment and Urban Systems*, 2015, 49: 54-65.
- [26] ROSA A, MOTA C, FIGUEIREDO C. A spatial multi-criteria decision analysis framework to reveal vulnerabilities of areas to incidences of street robberies. *Applied Geography*, 2023, 151: 102840, Doi: 10.1016/j.apgeog.2022.102840.
- [27] HAAREN R, FTHENAKIS V. GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(7): 3332-3340.
- [28] SCHILLINGS C, WANDERER T, CAMERON L, et al. A decision support system for assessing offshore wind energy potential in the North Sea. *Energy Policy*, 2012, 49: 541-551.
- [29] WANG Y, LI Z, TANG Z, et al. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resour Manage*, 2011, 25: 3465-3484.
- [30] XIAO L, CHEN S, XIONG S, et al. Security risk assessment and visualization study of key nodes of sea lanes: Case studies on the Tsugaru Strait and the Makassar Strait. *Natural Hazards*, 2022, 114: 2657-2681.
- [31] ZHOU X, CHENG L, LI M. Assessing and mapping maritime transportation risk based on spatial fuzzy multi-criteria decision making: A case study in the South China Sea. *Ocean Engineering*, 2020, 208: 107403, Doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107403.
- [32] CHANG D. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 1996, 95(3): 649-655.
- [33] HAMMOND J, WEIDMANN N B. Using machine-coded event data for the micro-level study of political violence. *Research & Politics*, 2014, 1(2): 2053168014539924, Doi: 10.1177/2053168014539924.

China's iron ore shipping import pattern and risk assessment

XIE Yong-shun, HE Ting-kun, YI Wen, PENG Xin, LIU Huan

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The current research on the global flow pattern of iron ore has two bottlenecks: one is relying on coarse-grained trade statistics, and the other is lacking high-precision risk assessment methods. Based on the fine-grained coupling of AIS and trade data, this paper depicts high-resolution spatial characteristics of China's iron ore shipping import pattern. This research quantifies the risk of sea lanes by combining multi-source heterogeneous data with spatial multi-criteria analysis. The main conclusions are as follows: (1) The import pattern of China's iron ore shipping is concentrated at both the loading and the discharge stages. Australia and Brazil are primary and secondary duopoly suppliers, supplying more than 82.3% of China's iron ore, and most of them flow to China's Bohai-Rim port clusters. (2) This paper depicts a risk coefficient (*RC*) map of China's maritime shipping import by analyzing nine indicators and three dimensions (hazard level, vulnerability level, and mitigation capability). The paper also portrays a risk level (*RL*) map of China's iron ore shipping import, by combining the exposure levels of iron ore imports. The two maps clearly demonstrate that the risk of China's iron ore shipping shows significant spatial differentiation. The dominant factors are diverse, which suggests that the judgment of risk level should comprehensively consider the exposure level of shipping materials and other external factors. (3) In this paper, the import shipping lanes were divided based on a high-resolution import pattern. Therefore, correcting existing cognitive misjudgments and balancing the accuracy of scientific research with the intuitiveness of decision-making through risk level mapping at the lane level. Our research has shown that, the Strait of Sunda, and the Strait of Lombok-the Strait of Makassar Strait are the riskiest shipping lanes in the first tier, the Mediterranean-the Red Sea is the riskiest shipping lanes in the second tier, and the Black Sea is the riskiest shipping lanes in the third tier. The high-resolution spatial identification method built in this paper can solve the current inaccuracy of identifying global material flow status and improve the technology of quantitative risk assessment for key shipping lanes. This method is not only applicable to iron ore shipping, but also to the fine-grained analysis and risk assessment of other important material shipping patterns.

Keywords: iron ore; shipping lanes; import pattern; risk assessment; spatial multi-criteria analysis; AIS data