

基于复杂网络和改进引力模型的精炼铜全球贸易格局演进与中国角色分析

徐水太^{1,2}, 刘美玲^{1,2}, 朱文兴^{1,2*}

1. 江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州 341000;
2. 江西理工大学有色金属产业发展研究院, 江西 赣州 341000



摘要:以2004—2023年精炼铜贸易额作为数据基础,运用复杂网络建立随机网络和加权网络,从精炼铜贸易整体格局、贸易社团化和主要贸易国家地位3个方面对全球精炼铜贸易格局进行分析;进一步利用改进引力模型分析中国对10个主要贸易伙伴的精炼铜贸易潜力。结果表明:(1)精炼铜贸易存在小世界特性,具有多核心的贸易社团结构,从最初的以欧美国家为主,到后来包括亚洲、非洲和中东地区的国家在内;(2)在精炼铜贸易网络中,中国和美国为精炼铜进口大国,智利、秘鲁、日本和澳大利亚为精炼铜出口大国,美国和印度扮演精炼铜贸易的桥梁角色,德国和意大利扮演贸易的枢纽角色;(3)在10个主要贸易伙伴中,智利和澳大利亚为潜力再造型,韩国、美国和赞比亚为潜力巨大型,日本、菲律宾、哈萨克斯坦、秘鲁和波兰为潜力开拓型。根据研究结果,建议采取与贸易潜力国家建立多元化进口渠道,提升精炼铜贸易定价权和产业链话语权,构建精炼铜风险预警体系等措施。研究结果可为我国精炼铜贸易提供决策依据。

关键词:复杂网络;贸易社团;贸易格局;改进引力模型;精炼铜

中图分类号:F746.18 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-1112-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.023

引用格式:徐水太,刘美玲,朱文兴.基于复杂网络和改进引力模型的精炼铜全球贸易格局演进与中国角色分析[J].黄金科学技术,2025,33(5):1112-1123.XU Shuitai,LIU Meiling,ZHU Wenxing.Evolution of Global Trade Patterns of Refined Copper and Analysis of China's Role Based on Complex Networks and Improved Gravity Model[J].Gold Science and Technology,2025,33(5):1112-1123.

铜被广泛应用于电子设备、交通运输和空调制冷等领域,对国民经济发展具有重要作用,是重要的战略性矿产资源。随着全球能源结构的调整,特别是新能源汽车和清洁能源发电端(风电、光伏)的发展,铜的需求量显著增长,进一步凸显了铜的战略地位。2023年全球精炼铜需求量达到2 655万t,同比增长2.8%,其中中国和印度是主要增长引擎,而欧美地区则呈现负增长(张楠,2024)。全球精炼铜资源分布相对集中,主要分布在智利、秘鲁和澳大利亚等国家(陈秀法等,2025)。我国虽为精炼铜生产国,

但面临资源禀赋不佳(贫矿多、富矿少)、国内产能增长有限等问题,同时我国精炼铜消费量占全球很大比重,使得我国精炼铜对外依存度持续攀升(梁姗姗等,2025)。随着“双碳”目标的提出和新能源产业的快速发展,精炼铜的需求预期将保持稳定增长,精炼铜全球贸易格局的演变直接关乎供应链安全。近年来,我国虽然通过“走出去”战略在海外布局精炼铜资源项目,但是国内供需缺口仍持续存在,因此,系统解析精炼铜全球贸易网络演进规律并精准评估贸易潜力具有重要现实意义(计启迪等,2021)。

收稿日期:2024-12-24;修订日期:2025-04-30

基金项目:国家社会科学基金项目“产品空间视角下中国稀有矿产资源产业升级路径及政策选择研究”(编号:20XGL016)资助

作者简介:徐水太(1978—),男,江西贵溪人,博士,副教授,从事资源经济与管理研究工作。E-mail:xushuitai@163.com

*通信作者:朱文兴(1975—),男,江西余江人,博士,教授,从事资源经济与管理研究工作。E-mail:81536597@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

复杂网络因具有小世界特性(Watts et al, 1998)、无标度特性(Barabási et al, 1999)和模块化(王娟等, 2011)等特征,常被用于分析贸易网络问题(Xi et al, 2019)。梳理现有文献发现,复杂网络在矿产贸易领域的研究主要聚焦于3个方面:网络结构分析层面,探讨了铜矿石贸易的整体结构、社团化特征及主要贸易国地位(董迪等, 2016);产业链演化方面,构建了锡矿产业链时空演变模型(徐斌等, 2023),揭示了价格波动与产业链的传导机制(付晶等, 2024);风险评估领域,通过贸易网络模拟关键矿产资源风险传导路径(沈曦等, 2022),并针对稀有矿产品贸易网络开展多维度供应安全评估(朱文兴等, 2022)。上述研究成果系统展现了复杂网络理论在解析贸易格局动态、产业关联机制及风险预警等方面的理论价值与实践效能。

此外,引力模型最早被应用于国际贸易问题研究时,主要是用来分析双边贸易流量(Poyhonen, 1963)。在分析国际贸易问题时建立了引力模型,以解释多国贸易流量不对称现象(Bergstrand, 1989)。此后,研究人员通过多维度拓展深化该模型在矿产贸易研究中的应用:引入资源场理论分析铝土矿流动轨迹及其潜力(吴迪等, 2023);结合GDP和地理距离等要素揭示矿产资源进出口贸易格局演化规律(王文字等, 2021);针对精炼铜贸易流量进行实证分析,提出生产优化政策(帅竞等, 2015);通过改进引力模型构建空间交互模型,支撑铁矿石进口策略制定(朱永光等, 2017)。研究表明,引力模型不仅适用于分析矿产贸易流动和网络结构,而且能够为政策制定提供科学依据。然而,既有研究对贸易网络的动态拓扑演化特征及其与贸易潜力的关联机制缺乏整合式探讨,难以为资源优化配置提供完整决策依据(周文韬等, 2022)。

为此,本文基于2004—2023年全球精炼铜贸易数据,运用复杂网络理论和改进引力模型对精炼铜全球贸易格局和中国所处的贸易地位进行研究,旨在为我国精炼铜供应和贸易提供决策参考。

1 数据来源与理论方法

1.1 数据来源

本文基于联合国贸易数据库UNComtrade公布

的2004—2023年精炼铜贸易数据,构建精炼铜有向加权网络和随机网络,以便分析研究精炼铜的国际贸易格局和中国所处的贸易地位。其中,复杂网络模型可视为是由参与贸易的国家(节点)和这些国家之间的贸易往来(边)组成的一系列矩阵。本文将参与精炼铜贸易的国家作为节点,以国家间贸易关系为边,贸易额作为贸易网络边的权重,构建2004—2023年全球精炼铜有向加权网络和有向随机网络。

1.2 研究方法

(1) 复杂网络分析

根据复杂网络理论,构建精炼铜贸易有向加权网络和随机网络。首先,将每年参与全球精炼铜贸易的国家组成网络中的节点集 Y ,并设 $Y_i = [y_i]$ ($i = 1, 2, 3, \dots$)为精炼铜的进口国, $Y_j = [y_j]$ ($j = 1, 2, 3, \dots$)为精炼铜的出口国,用邻接矩阵 $X = [a_{ij}]$ 表示全球精炼铜贸易往来(边),当存在贸易关系时 a_{ij} 为1,否则为0。然后,以精炼铜的贸易额作为贸易网络边的权重构建有向加权网络, $W = [w_{ij}]$ 为权重矩阵,用精炼铜出口贸易额表示,则得到精炼铜贸易无权和加权贸易网络。

本文对精炼铜贸易网络格局进行以下2个部分分析:一是网络整体性指标,主要包括网络密度、网络节点度、聚类系数和平均路径长度;二是国家地位分析指标,主要包括社团模块度、紧密程度中心性、特征向量中心性和中介中心度。各测度指标计算公式及具体含义见表1。

(2) 改进引力模型分析

传统的引力模型解释了2个物体之间的引力与它们的质量成正比,与它们的距离成反比(李英杰等, 2024)。

$$X_{ij} = A(GDP_i \times GDP_j) / DIST_{ij} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 为国家 i 从国家 j 的进口额; A 为常数; GDP_i 为 i 国的国内生产总值; GDP_j 为 j 国的国内生产总值; $DIST_{ij}$ 为 i 国与 j 国之间的距离,一般用两国首都距离表示。

为了满足线性估计需要,对式(1)两边取对数:

$$\ln X_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_i + \beta_2 \ln GDP_j - \beta_3 \ln DIST_{ij} \quad (2)$$

式中: β_0 为常数项; β_1 、 β_2 和 β_3 为各个变量的回归系数。

表1 指标计算公式及其含义

Table 1 Formulas and meanings of metrics

指标分类	指标名称	计算公式	含义
整体特征指标	网络密度	$\rho = \frac{N_E}{N*(N-1)}$	网络密度用于量化评估贸易网络中各经济体间联系的紧密程度。其中, N_E 代表连边数, N 代表精炼铜贸易国家(地区)总数
	平均度	$k_i = \sum_{j=1}^N k(j, i)$	平均度用于量化节点间连接的平均强度, 反映了网络的规模特征。其中, k_i 为与该经济体直接存在贸易关系的其他经济体的总数量
	平均路径长度	$L = \frac{\sum_{i>j} d_{ij}}{N(N+1)/2}$	平均路径长度是衡量贸易传输效能的一个重要指标。其中, d_{ij} 为连接节点 i 和节点 j 最短路径上的边数
	平均聚类系数	$M = \sum_i \frac{E_i}{\frac{1}{2} k_i (k_i - 1)}$	平均聚类系数衡量复杂网络的集团化程度, 聚类系数越高, 网络的集团化越明显, 节点之间的联系越紧密。其中, E_i 为 i 与相邻节点的实际连边数
国家地位分析指标	紧密程度中心性	$C(u) = \frac{1}{\sum_{v=1}^{n-1} d(u, v)}$	紧密程度中心性衡量网络中一个节点与所有其他节点之间的平均距离, $d(u, v)$ 为节点 u 到节点 v 的最短路径距离
	特征向量中心性	$X_i = \gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j$	特征向量中心性是衡量网络中节点的重要性, 其不仅考虑节点的直接连接, 还考虑节点对邻居节点的重要性。 a_{ij} 为邻接矩阵 A 的元素
	中介中心度	$BC_i = \frac{\sum_{a \neq b \neq i} g_{ab}(i)}{(N-1)(N-2)}$	中介中心度表示节点在网络中的中介作用。值越大表示对精炼铜的周转能力和控制能力越强。其中, g_{ab} 为经济体 a 与经济体 b 间最短路径总数
	出入度	$K_i^{in/out} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$	出入度值表示国家间贸易关系的规模, 包括出度和入度。 a_{ji} 和 a_{ij} 表示无权矩阵中的数值, 当存在贸易关系时数值为 1, 否则为 0
社团划分指标	模块度	$Q = \frac{1}{2L} \sum_{ij} \left(D_{ij} - \frac{K_i K_j}{2L} \right)$	模块度是衡量网络社团划分程度的指标, 模块度越大, 网络分化程度越高, 其中, D_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间边的权重

精炼铜作为战略性矿产资源,其需求与工业化进程及制造业结构升级高度相关。根据全球产业经济学理论,在后发国家工业化梯次推进过程中,高端制造业对精炼铜的单位消耗强度显著高于传统制造业。因此,进口国的制造业占比反映了其需求结构,制造业发达的进口国对中间品的需求更高,从而可以拉动进口,故在模型中引入制造业占GDP比值这一指标。有学者指出人均GDP和精炼铜产量等对中国精炼铜进口额产生积极影响,再加上 β_3 前面的减号可认为距离变量对出口额的阻碍(帅竞等,2015),由此得出改进引力模型:

$$\ln X_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_i + \beta_2 \ln GDP_j + \beta_3 \ln DIST_{ij} + \beta_4 \ln x_i + \beta_5 \ln XCHN_j + \beta_6 \ln PRO_i + \beta_7 MFR_j \quad (3)$$

式中: $\ln x_i$ 和 $\ln XCHN_j$ 分别为出口国和中国的人均GDP; PRO_i 为 i 国的精炼铜产量; MFR_j 为 j 国的制造业占GDP的比值。本文采用改进引力模型、面板数据的混合效应模型、固定效应模型和随机效应模型,对中国及其10个主要贸易伙伴的精炼铜贸易流量和潜力进行测算。

2 精炼铜贸易格局演化分析

2.1 整体格局演化分析

整体特征指标能够衡量贸易网络的整体发展趋势,主要包括网络密度、网络节点度、聚类系数和平均路径长度。本文基于收集的精炼铜贸易数据,绘制得到网络密度和平均度变化趋势(图1),并参考董迪等(2016)的做法对精炼铜贸易做加权网络和随机网络分布,绘制得到精炼铜加权网络和随机网络的平均路径长度和聚类系数变化趋势(图2)。

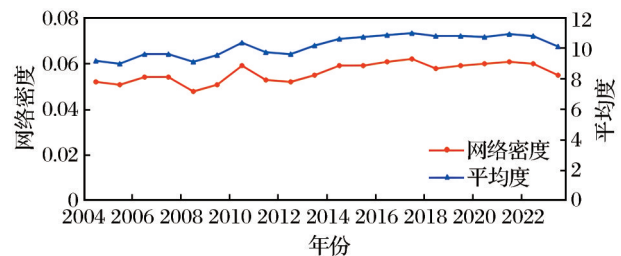


图1 全球精炼铜贸易网络密度与平均度变化趋势

Fig. 1 Change trend of network density and average degree of global refined copper trade

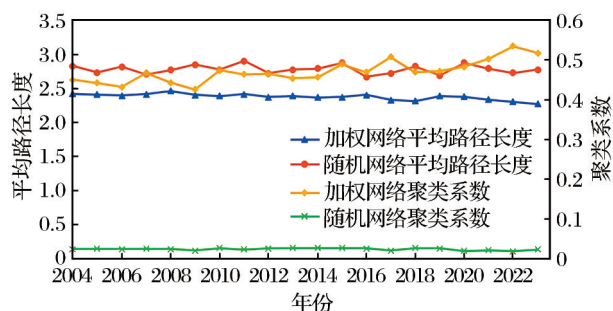


图2 全球精炼铜贸易网络平均路径长度和聚类系数变化趋势

Fig. 2 Change trend of average path length and clustering coefficient of global refined copper trade network

由图1可知,网络密度和平均度的变化趋势相对一致。这2项指标在2017年达到最大值,网络密度为0.062,平均度为11.034,而网络密度的最小值为0.048,出现在2008年,平均度的最小值为9.034,出现在2005年。在2004—2010年,网络密度和平均度总体呈上升趋势,至2008年开始下降,这是因为金融危机的影响使得全球经济衰退,铜价震荡回落;2010—2016年网络密度和平均度先缓降后上升,表明各个国家精炼铜贸易联系越来越紧密,贸易规模在扩大;2016—2023年网络密度和平均度高位趋稳后微降,表明全球精炼铜贸易网络已接近当前市场结构下的“饱和状态”。总体而言,网络密度和平均度均呈上升趋势,本质上是全球精炼铜产业链重构与资源要素在配置的拓扑映射。

小世界特性是指在同等规模的随机网络中,加权贸易网络的平均聚类系数更大,平均路径长度更短(徐水太等,2022)。由图2可知,精炼铜贸易加权网络的平均路径长度均小于随机网络的平均路径长度,而加权网络的聚类系数均大于随机网络的聚类系数,表明精炼铜贸易网络具有小世界性。

总之,网络密度和平均度的增大和小世界特性的强化共同构成了贸易格局重构的复杂性。网络密度的增大降低了节点间的连接成本,而短路径长度和高聚类系数加速了核心贸易枢纽的形成,为分析社团结构重组提供了拓扑结构。

2.2 网络社团化分析

模块度和社团个数是衡量网络社团结构划分质量的2个重要指标,模块度反映了网络中社团内部连接的紧密程度以及社团之间的分离程度

(Newman et al, 2006),社团个数则直接表明了网络被划分为多少个社团。根据模块度和社团个数理论,得到2004—2023年全球精炼铜贸易模块度和社团个数变化趋势如图3所示。

由图3可知,2004—2023年模块度值为0.106~0.168,呈现波动趋势,在全球贸易体系中存在着贸易社团化的特点;2004—2008年,模块度值总体呈现先下降后上升的变化趋势,2008年由于美国爆发金融危机,网络密度下降导致模块度短暂上升,社团分化加剧;2010年全球经济开始复苏,精炼铜贸易出现了新的分化,2011—2014年模块度呈现下降趋势,全球精炼铜贸易发展较为缓慢,2014—2017年模块度呈现上升趋势,说明全球精炼铜贸易的社团化现象变弱,贸易趋向全球化;2017—2023年,模块度值呈下降趋势,导致全球精炼铜贸易发生重组,结构发生变化。2004—2023年社团个数为3~8个,社团变化呈现波动趋势,但总体呈现下降趋势,2008年达到最大值8个,2023年达到最小值3个。社团个数的减少反映了全球精炼铜贸易格局的重组,一些边缘的贸易社团可能由于各种原因而减少或解散,而较大的贸易社团则可能通过合并或扩张来增强其市场地位。

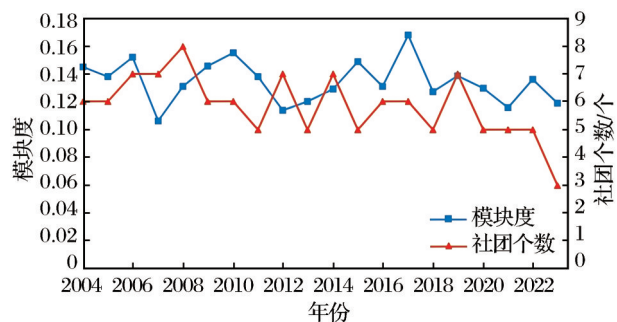


图3 全球精炼铜贸易模块度和社团个数变化趋势

Fig. 3 Change trend of modularity and community count of global refined copper trade

为了进一步明确全球精炼铜贸易区域分布及演变特征,对2004年、2008年、2012年、2016年和2020年全球精炼铜贸易网络社团结构进行可视化分析,得到全球精炼铜贸易社团分布如图4所示。由图4可知,在精炼铜贸易中,存在多核心的贸易社团结构。

进一步分析可知,2004年全球精炼铜贸易可划

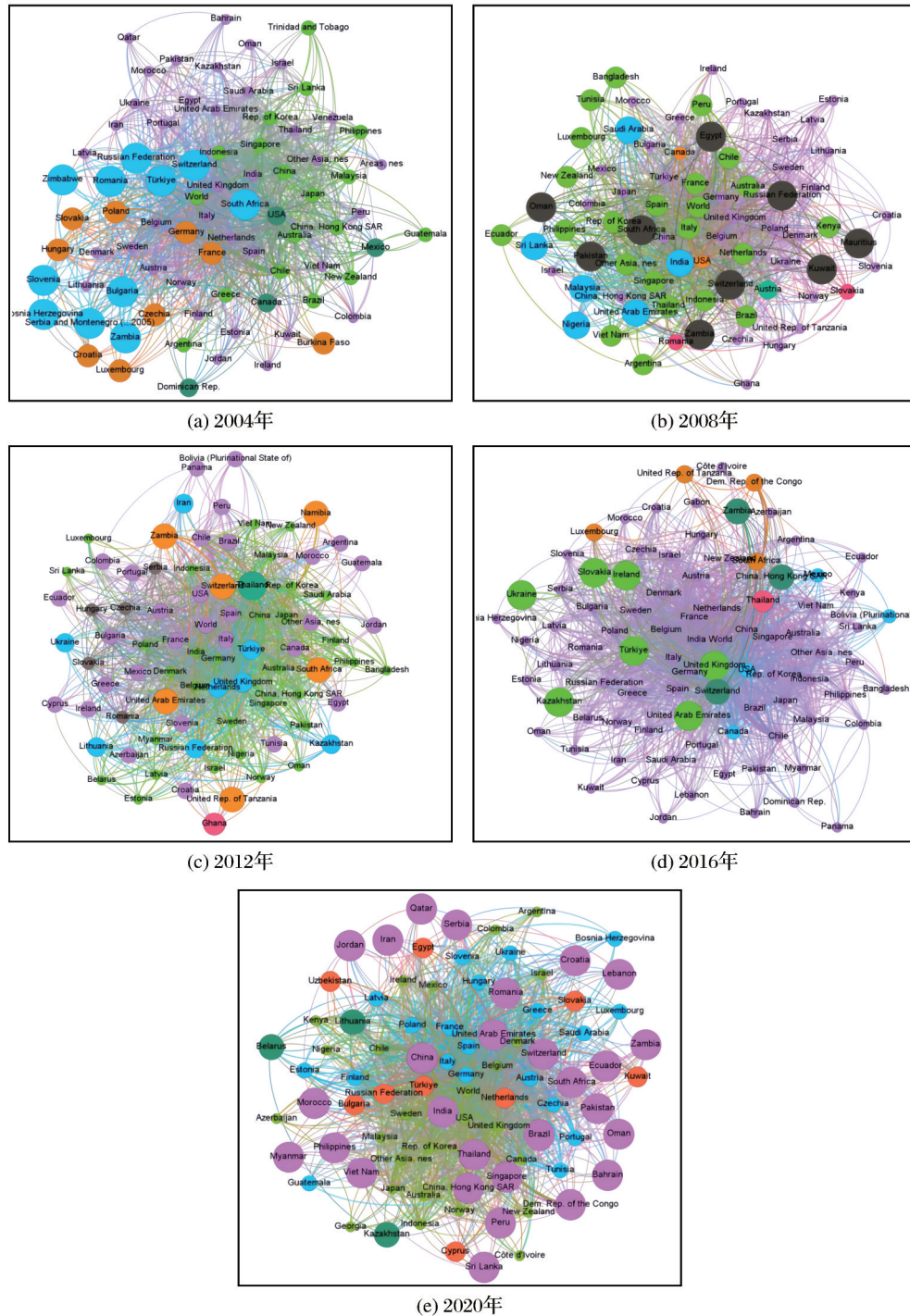


图4 全球精炼铜贸易社团结构网络图

Fig. 4 Network diagram of global refined copper trade community structure

分为6个模块。其中,社团1是以欧洲国家为主导(图4紫色区域),以意大利、荷兰、英国和西班牙等欧洲国家为核心的社团,涉及74个国家和地区(如非洲地区、拉丁美洲和中东等),也是贸易规模最

大、贸易关系最多的社团。社团2(图4绿色区域)是以亚洲国家以及地理位置临近的国家为主导的社团,涉及中国、澳大利亚、印度尼西亚、马来西亚和智利等35个国家。其中,中国为精炼铜进口大

国,智利为精炼铜出口大国。社团3(图4青色区域)是以赞比亚、土耳其、南非和俄罗斯等为核心,包括非洲和欧洲35个国家。社团4(图4橙色区域)是以波兰、德国和法国等欧洲国家为核心,包括非洲和欧洲20个国家。社团5(图4蓝色部分)是以美国、加拿大和墨西哥为核心,涉及北美洲11个国家。社团6是由斐济与瓦利斯和富图纳2个国家组成,与其他国家贸易联系较少,比较边缘化。与2004年相比,2008年社团个数增加了3个,社团1不再单纯以欧洲国家为核心,而是加入中国和日本等一些亚洲国家,社团2则是以一些精炼铜资源国为核心,如智利、秘鲁和荷兰等,新增了2个边缘化国家,如阿根廷和斯洛伐克。与2008年相比,2012年的社团1以美国、智利和秘鲁为核心,表明美国精炼铜贸易越来越倾向于距离其地理位置相近的国家。与2012年相比,2016年的社团1以欧洲国家为核心,社团在逐渐扩大,增加至120个国家,表明精炼铜贸易更为集中。中国、秘鲁和智利在同一个社团群,表明三者精炼铜贸易往来密切。与2016年相比,2020年社团1是以中国、秘鲁和南非等为核心,表明中国在2020年的精炼铜贸易中占据了核心地位,且2020年精炼铜贸易网络实际更为集中。

总之,2004—2023年全球精炼铜贸易网络社团

数量和成员国发生了变化,社团成员国的地理分布也有所变化,从最初的以欧美国家为主,到后来包括亚洲、非洲和中东地区的国家在内,其中中国扮演了越来越重要的角色,这表明精炼铜贸易的重心在逐渐转移,精炼铜贸易的社团化现象弱化,向更加全球化的趋势发展。社团核心国家的更迭也直接关联到主要贸易国的角色变化,例如,随着时间的推移,中国的地位由原先的社团2成员到2020年社团1的核心,必然伴随节点度和中介中心性指标的变化。下文将通过贸易国角色和影响力指标的定量分析,揭示这种地位变迁的微观机制。

2.3 主要贸易国家地位分析

(1) 精炼铜贸易国角色变化

网络密度的提升为贸易国角色的分化提供了基础。一方面,核心国家通过扩大贸易伙伴的数量增强影响力;另一方面,中介国家利用网络路径缩短来强化自身的枢纽作用。在精炼铜贸易网络中,节点度表示国家间精炼铜贸易的关系强度。精炼铜进出口量表示国家间的贸易强度。中介中心度表示节点在网络中的中介作用(Freeman, 1979)。本文根据各国出入度数统计出精炼铜贸易排名前5位的国家(表2),统计出主要贸易国的精炼铜进出口量(表3和表4),并根据中介中心度数统计出排名前5位贸易国(表5)。

表2 2004—2023全球精炼铜贸易排名前5位的国家

Table 2 Top 5 countries of global refined copper trading from 2004 to 2023

年份	精炼铜出度前5位	精炼铜入度前5位
2004	智利、秘鲁、哈萨克斯坦、澳大利亚、俄罗斯	中国、意大利、美国、法国、韩国
2008	智利、日本、秘鲁、哈萨克斯坦、澳大利亚	中国、美国、意大利、韩国、德国
2012	智利、赞比亚、日本、哈萨克斯坦、澳大利亚	中国、美国、德国、瑞士、意大利
2016	智利、刚果、日本、赞比亚、俄罗斯	中国、美国、韩国、南非、德国
2020	智利、刚果、日本、俄罗斯、澳大利亚	中国、美国、德国、荷兰、韩国

表3 2004—2023全球精炼铜贸易排名前5位国家的进口量

Table 3 Imports from the top 5 countries in global refined copper trade from 2004 to 2023 ($\times 10^4$ t)

国家	2004年	2008年	2012年	2016年	2020年
中国	119.6	152.65	293.34	323.37	437.11
美国	76.24	54.01	68.35	60.9	60.7
韩国	44.5	50.24	44.41	56.1	32.88
意大利	82.15	64.48	45.44	37.05	32.91
德国	32.49	47.45	48.12	43.28	49.57

表4 2004—2023全球精炼铜贸易排名前5位国家的出口量

Table 4 Outports from the top 5 countries in global refined copper trade from 2004 to 2023 ($\times 10^4$ t)

国家	2004年	2008年	2012年	2016年	2020年
智利	596.12	604.59	561.4	517.31	462.06
秘鲁	89.53	78.19	49.63	56.67	58.81
日本	43.83	91.12	113.71	127.38	154.94
澳大利亚	65.39	73.13	75.29	90.6	80.51
俄罗斯	67.57	40.63	50.86	102.27	155.17

表5 精炼铜全球贸易中介中心度排名
Table 5 Ranking of global trade centrality for refined copper

排名	2004年	2008年	2012年	2016年	2020年
1	意大利	意大利	德国	美国	印度
2	美国	美国	美国	意大利	美国
3	德国	印度	印度	印度	中国
4	英国	德国	意大利	中国	意大利
5	法国	法国	法国	法国	比利时

由表2~4可知:智利、秘鲁、澳大利亚和日本等国出口贸易范围最广,虽然智利精炼铜出口量从2004年的596.12万t下降至2020年的462.06万t,但是智利仍旧位列全球精炼铜出口国之首,2008年智利出口精炼铜达到最大值(604.59万t)。随着中国等新兴市场国家人均收入的增加,全球对精炼铜的消耗量也随之增长,智利作为全球最大的铜出口国,其精炼铜出口量因此增加。此外,智利的政治环境动荡,劳资纠纷频发,对精炼铜贸易产生了直接影响。日本精炼铜出口量也在逐年增加,表明其全球精炼铜市场中的重要性日益增强;2016—2020年俄罗斯精炼铜出口量年均增长12.4%,主要受益于Udokan铜矿投产,但2022年后受国际制裁的影响其出口渠道收窄;中国、美国、意大利和德国等贸易国进口贸易规模较大,中国是第一大精炼铜进口国,中国精炼铜进口量从2004年的119.06万t增加至2020年的437.11万t,中国精炼铜进口量的增长,印证了Rostow经济增长阶段理论与Chenery工业化

阶段理论的耦合作用。在工业化后期铜消费结构向消费社会转型的过程中,基于投资边际效应递减与新能源产业爆发式增长的叠加效应,形成了独特的“精炼铜消费弹性系数悖论”。美国精炼铜进口量从2004年的76.24万t减少至2020年的60.7万t,但是相比于其他国家,进口量占比仍较大。中国和美国精炼铜进口国地位比较稳定,是精炼铜进口大国。

由表5可知,意大利、美国和印度的精炼铜贸易中介中心度排名靠前,中国、德国和法国精炼铜贸易地位不稳定,2012年起意大利的地位开始下降,美国、印度和中国地位开始上升,结合图2的小世界特性,可以得出中介中心度高的国家可通过控制关键贸易路径来增强其贸易地位。德国和意大利主要扮演着精炼铜贸易的枢纽角色。美国凭借其消费市场体量形成需求枢纽,而印度则通过转口贸易发挥区域中转功能。

(2)精炼铜贸易国影响力分析

紧密程度中心性和特征向量中心性是社会网络分析中用来衡量国家在贸易网络中的影响力的2个重要指标(钮潇雨等,2023)。本文根据精炼铜贸易数据,统计出贸易国家的紧密程度中心性排名数据(表6)和贸易国家的特征向量中心性排名数据(表7)。在精炼铜贸易领域,一些国家因其铜矿资源丰富、精炼铜产量、出口量以及全球铜市场上的影响力具有代表性,因此选取表6和表7中的10个代表性国家作为分析对象。

表6 全球精炼铜贸易国家紧密程度中心性排名
Table 6 Ranking of global trade countries by closeness centrality

年份	智利	秘鲁	中国	美国	澳大利亚	加拿大	刚果	赞比亚	俄罗斯	印度尼西亚
2004	16	26	21	9	23	27	115	46	22	14
2008	24	41	21	9	31	25	73	48	40	17
2012	17	37	18	6	21	30	112	55	46	23
2016	18	33	21	5	17	25	76	56	42	15
2020	19	61	30	9	15	24	66	56	27	40

排名靠前表明国家位于中心位置,与其他国家的贸易距离较短,表明在精炼铜贸易中处于优势地位。由表6可知,美国的排名一直靠前,此外中国、智利、加拿大和澳大利亚在精炼铜贸易中也活跃,中国是精炼铜进口大国,且进口来源比较广泛。加

拿大和澳大利亚起着贸易枢纽作用,因此也处在贸易体系中的中心位置。

由表7可知,中国精炼铜贸易特征向量中心性排名一直靠前,不仅说明中国是精炼铜进口大国,也说明中国的贸易伙伴数量较多,且多为精炼铜主

表7 全球精炼铜贸易国家特征向量中心性排名
Table 7 Ranking of global trade countries by eigenvector centrality

年份	智利	秘鲁	中国	美国	澳大利亚	加拿大	刚果	赞比亚	俄罗斯	印度尼西亚
2004	51	67	1	3	17	31	132	150	27	18
2008	73	61	2	5	18	32	112	171	37	22
2012	65	61	1	5	16	29	102	74	24	17
2016	55	69	1	3	19	22	101	159	35	23
2020	68	70	1	4	18	25	90	166	30	29

要生产国,如资源禀赋突出的智利和澳大利亚;美国、印度尼西亚、加拿大、秘鲁和澳大利亚排名相对靠前,并且地位稳定。总之,中国的中心性优势不仅体现在贸易规模上,而且在贸易网络中的枢纽位置也很突出,在贸易网络中枢纽效应可能受到地理位置和资源禀赋等引力因素的制约。

3 国际背景下中国精炼铜贸易及影响因素

3.1 中国精炼铜贸易

为了进一步验证中国在国际精炼铜贸易网络中的地位,通过改进引力模型,量化并验证中国的地位是否受到地理位置邻近性和经济规模等变量的显著影响。

本文运用改进引力模型进行实证研究,采用Stata17.0软件,计算得到回归结果如图7所示。由图7可知,各出口国人均GDP不显著,因此将人均GDP以及对应的中国人均GDP从模型中剔除。一般而言,面板数据有混合效应模型、固定效应模型和随机效应模型,不同的模型类型具有不同的回归结果,具体选取哪种模型进行回归,需要对样本数据进行检验。在检验中,首先对数据进行混合效应模型分析(POLS),再进行固定效应分析(FE),最后进行随机效应分析(RE)。在POLS和FE效应分析

中,FE检验结果强烈拒绝零假设,说明FE优于POLS;在FE和RE效应中,豪斯曼检验中 $p < 0.001$, p 值非常小,远低于常用的显著性水平,因此拒绝零假设,这意味着固定效应和随机效应模型的系数存在显著差异,且固定效应模型更优。

根据表8的回归结果,选出最佳模型4作为最终解释模型。在最佳模型中,中国的GDP总量、双边国家的距离、铜矿产量和制造业占GDP比值均会影响精炼铜出口的贸易潜力,但影响因素之间存在差异。其中,中国GDP总量、出口国精炼铜产量、双边国家距离和制造业占GDP比值在1%的显著性水平上为正;出口国GDP存在正向影响,但不显著。双边国家距离变量的影响显著,原因可能是精炼铜贸易具有高度资源依赖性,加之精炼铜资源国的地理位置集中,导致中国不得不突破距离位置约束,来建立强连接,进一步印证了前文社团分析中“中国—智利—秘鲁”社团的形成。制造业占GDP比重的提升,主要通过传统产业规模扩张、新兴领域需求增长、资源保障压力传导及金融属性强化等多重机制,显著推动了精炼铜的消费与贸易活动。

3.2 中国精炼铜贸易潜力测算

为了进一步验证中国精炼铜贸易网络地位,基于改进引力模型,测算中国与资源国的贸易潜力空间。根据改进引力模型回归结果(表8中的FE模型中的模型4),构建理论回归方程为

$$\ln X_{ij} = -17.0631 + 0.0064 \ln GDP_i + 0.4067 \ln GDP_j + 0.5164 \ln DIST_{ij} + 0.9317 \ln PRO_i + 4.1153 MFR_j \quad (4)$$

根据实际贸易额与理论贸易额的比值,将贸易伙伴划分为3类(刘青峰等,2002)。当比值小于0.8时,为潜力巨大型;当比值为0.8~1.2时,为潜力开拓型;当比值大于1.2时,为潜力再造型。

根据2023年的数据测算出中国对主要精炼铜

贸易伙伴的贸易潜力,结果见表9。由表9可知,在10个样本国家中,智利和澳大利亚为潜力再造型,这2个国家的精炼铜出口潜力已充分释放;美国和赞比亚为潜力巨大型,贸易潜力未得到充分释放,需要进一步加大这些国家对精炼铜的出口;韩国、

表8 FE和RE效应的回归结果
Table 8 Regression results of FE, RE effects

指标	POLS		FE		RE	
	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
$\ln GDP_i$	-0.2791*** (-3.9796)	0.0053 (1.2254)	0.0765 (0.4160)	0.0064 (0.1681)	0.0228 (0.1628)	0.0053 (0.6571)
$\ln GDP_j$	1.0931*** (10.6964)	0.6821*** (6.5249)	0.6220*** (6.2242)	0.4067*** (8.1489)	0.6478*** (7.2108)	0.6821*** (16.2018)
$\ln DIST_{ij}$	-0.3616*** (-3.3910)	0.0194** (2.1142)	0.7370*** (4.4313)	0.5164*** (9.7973)	0.6065*** (3.9667)	0.0194 (1.3991)
$\ln PRO_i$		0.9779*** (82.5167)		0.9317*** (60.7683)		0.9779*** (94.1515)
MFR_j		13.5153*** (5.6271)		4.1153*** (2.8256)		13.5153*** (11.0121)
_cons	0.2111*** (10.6114)	-22.4142*** (-6.1969)	-9.7704** (-2.5542)	-17.0631*** (-11.6637)	-7.3911** (-2.0886)	-22.4142*** (-15.0888)
N	200	200	200	200	200	200
adj. R2	0.2973	0.9845	0.338	0.971	0.3758	0.9589

注:括号内为t统计数据,*表示 $p < 0.1$,**表示 $p < 0.05$,***表示 $p < 0.01$

表9 2023年中国对主要精炼铜贸易伙伴的贸易潜力
Table 9 China's refined copper trade potential with major trading partners in 2023

国家	实际贸易额与理论贸易额比值	贸易类型
智利	1.25	潜力再造型
日本	1.03	潜力开拓型
韩国	1.05	潜力开拓性
菲律宾	1.01	潜力开拓型
哈萨克斯坦	1.02	潜力开拓型
澳大利亚	1.33	潜力再造型
秘鲁	0.98	潜力开拓型
美国	0.65	潜力巨大型
赞比亚	0.78	潜力巨大型
波兰	1.00	潜力开拓型

日本、菲律宾、哈萨克斯坦、秘鲁和波兰为潜力开拓型,这些国家的精炼铜出口已接近饱和,但仍有一定空间积极开拓新的贸易要素。

综合上述分析可知,贸易潜力类型划分与网络结构特征高度吻合:潜力再造型国家均为前文社团分析中的核心枢纽节点,其高中介中心性使其贸易规模接近理论上限;而潜力巨大型国家,虽具备高中介中心性,但因地理距离等因素影响而未能充分发挥作用。这表明贸易网络的结构特性与改进引力模型的贸易潜力之间存在动态机制。

4 结论及政策建议

4.1 结论

(1)全球精炼铜贸易网络在2004—2023年呈现为网络密度与平均度的持续增长,其小世界特性的强化,揭示了全球化逻辑下资源配置效率提升与地缘风险驱动的网络韧性需求之间存在深层张力。

(2)在全球精炼铜贸易中,存在多核心的贸易社团结构。区域重心从欧美国家逐渐向亚洲、非洲及中东地区转移,中国贸易地位持续提升,精炼铜贸易网络的社团化特征弱化并呈现全球化发展趋势。

(3)全球精炼铜贸易格局的演进呈现出资源禀赋与市场需求的单向重构。智利等资源禀赋型国家维持以出口为主导的模式,而中国通过工业化与新能源产业扩张驱动精炼铜进口规模的扩张,依托需求规模重塑定价权和话语权;中国网络中心性指标跃升反映出战略投资重构贸易路径,弱化传统枢纽的中介优势。

(4)在中国精炼铜贸易中,中国GDP总量、出口国精炼铜产量、双边距离和制造业占比对精炼铜贸易潜力具有显著的正向影响。其中,距离变量的显

著性凸显了资源导向型贸易的地理集聚特征,而制造业占比的提升通过产业关联效应激发进口需求。然而,制造业占比指标对工业化后期铜消费结构性变迁的解释存在局限,需引入铜消费密集型产业增加值占比等细分指标,以增强需求演变动因的解析精度。

(5)基于2023年贸易数据分析发现,中国与主要精炼铜贸易伙伴的贸易潜力呈现梯度分化特征。其中,智利和澳大利亚为潜力再造型,这2个国家的精炼铜出口潜力已得到充分释放;美国和赞比亚为潜力巨大型,贸易潜力未得到充分释放,需要进一步加大这些国家对精炼铜的出口;韩国、日本、菲律宾、哈萨克斯坦、秘鲁和波兰为潜力开拓型,这些国家的精炼铜出口已接近饱和,但仍有一定空间可以积极开拓新的贸易要素。

4.2 政策建议

面对日益激烈的战略性矿产资源竞争,中国需要采取相应的贸易政策,以优化精炼铜贸易,本文提出以下对策建议:

(1)保障中国精炼铜供应安全。在用好用国内铜精矿资源的同时,实施“走出去”战略,强化铜精矿资源外交,与智利、澳大利亚等主要供应国及波兰、哈萨克斯坦和菲律宾等贸易潜力国家建立多元化进口渠道,保障精炼铜供应安全。

(2)提升精炼铜贸易定价权和产业链话语权。扩大上海期货交易所精炼铜期货合约影响力,吸引全球交易者参与,推动人民币结算,削弱美元计价体系的影响。此外,扶持国内龙头企业“走出去”战略,通过长期协议、联合开发项目或股权投资等方式整合国外铜矿开采—冶炼—加工全链条,形成“资源控制+冶炼产能+市场渠道”的闭环优势,从而在贸易网络中强化“中国中心”节点的枢纽作用,破解“核心—边缘”结构下的被动依赖。

(3)构建精炼铜风险预警体系。中国在参与全球精炼铜贸易的基础上,围绕“全链条监测、多维度分析、智能化响应”的核心目标,从资源供应、市场波动、产业链韧性和地缘政治等关键风险点切入,构建覆盖“数据采集—分析预警—决策支持—应急响应”的闭环风险预警体系,实现从被动应对向主动防控的转变。

参考文献(References):

- Barabási A L, Albert R, 1999. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 286(5439): 509-512.
- Bergstrand J H, 1989. The generalized gravity equation, monopolistic competition, and the factor-proportions theory in international trade[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1): 143.
- Freeman L C, 1979. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Social Networks*, 1(3): 215-239.
- Newman M J, 2006. Modularity and community structure in networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(23): 8577-8582.
- Poyhonen P A, 1963. A Tentative model for the volume of trade between countries[J]. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 90: 93-100.
- Watts D J, Strogatz S H, 1998. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 393(6684): 440-442.
- Xi X, Zhou J S, Gao X Y, et al, 2019. Impact of changes in crude oil trade network patterns on national economy[J]. *Energy Economics*, 84: 104490.
- 陈秀法,何学洲,张振芳,等,2025.全球铜矿资源分布特征、勘查开发格局与展望[J]. *中国矿业*, 34(2): 314-323.
- Chen Xiufa, He Xuezhou, Zhang Zhenfang, et al, 2025. Distribution characteristics and exploration & development pattern of global copper resources and its prospect[J]. *China Mining Magazine*, 34(2): 314-323.
- 董迪,安海忠,郝晓晴,等,2016.基于复杂网络的国际铜矿石贸易格局[J]. *经济地理*, 36(10): 93-101.
- Dong Di, An Haizhong, Hao Xiaoping, et al, 2016. International copper ore trade pattern based on complex network theory[J]. *Economic Geography*, 36(10): 93-101.
- 付晶,张海亮,宋明媚,2024.价格波动对战略性关键矿产资源产业链安全的影响:以铁、锰、铬为例[J]. *学术探索*, (5): 101-110.
- Fu Jing, Zhang Hailiang, Song Mingmei, 2024. The impact of price fluctuation on the industrial chain security of strategic key mineral resources: take iron, manganese and chromium as examples[J]. *Academic Exploration*, (5): 101-110.
- 计启迪,刘卫东,陈伟,等,2021.基于产业链的全球铜贸易网络结构研究[J]. *地理科学*, 41(1): 44-54.
- Ji Qidi, Liu Weidong, Chen Wei, et al, 2021. Structure of global copper-containing products trade network based on industrial chain perspective[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 41(1): 44-54.
- 李英杰,潘天际,2024.“逆全球化”还是“去中国化”——基

- 于美欧日中贸易投资数据的分析[J].江西理工大学学报,45(5):51-58.Li Yingjie, Pan Tianji, 2024. Anti-globalization or de-China Based on the analysis of trade and investment data of the United States, Europe, Japan and China[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 45(5):51-58.
- 梁姗姗, 吕星琪, 2025. 全球铜资源供给与消费格局演变及中国铜消费影响因素研究[J]. 中国矿业, 34(2):324-332. Liang Shanshan, Lü Xingqi, 2025. Research on the evolution of supply and consumption patterns of copper resources around the world and the influencing factors of copper consumption in China[J]. China Mining Magazine, 34(2):324-332.
- 刘青峰, 姜书竹, 2002. 从贸易引力模型看中国双边贸易安排[J]. 浙江社会科学, (6): 17-20. Liu Qingfeng, Jiang Shuzhu, 2002. On China's bilateral trade arrangement from the perspective of trade gravity model[J]. Zhejiang Social Sciences, (6):17-20.
- 钮潇雨, 陈伟, 俞肇元, 2023. “一带一路”贸易网络连通性演化[J]. 地理科学进展, 42(6): 1069-1081. Niu Xiaoyu, Chen Wei, Yu Zhaoyuan, 2023. Evolution of “the Belt and Road” trade network connectivity[J]. Progress in Geography, 42(6): 1069-1081.
- 沈曦, 郭海湘, 成金华, 2022. 突发风险下关键矿产供应链网络节点韧性评估: 以镍矿产品为例[J]. 资源科学, 44(1): 85-96. Shen Xi, Guo Haixiang, Cheng Jinhua, 2022. The resilience of nodes in critical mineral resources supply chain networks under emergent risk: Take nickel products as an example [J]. Resources Science, 44(1): 85-96.
- 帅竞, 郭晴, 严良, 2015. 基于引力模型的中国精炼铜贸易潜力的实证研究[J]. 宏观经济研究, (6): 135-143. Shuai Jing, Guo Qing, Yan Liang, 2015. An empirical study on the trade potential of refined copper in China based on gravity model[J]. Macroeconomics, (6):135-143.
- 王娟, 秦志光, 刘峤, 等, 2011. 基于网络模块化结构的异常发现[J]. 电子与信息学报, 33(1): 180-184. Wang Juan, Qin Zhiguang, Liu Qiao, et al, 2011. Anomaly detection based on network module structure[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 33(1): 180-184.
- 王文字, 贺灿飞, 任卓然, 2021. 中国矿产资源贸易网络演化[J]. 自然资源学报, 36(7): 1893-1908. Wang Wenyu, He Canfei, Ren Zhuoran, 2021. Evolution of mineral resources trade network in China [J]. Journal of Natural Resources, 36(7): 1893-1908.
- 吴迪, 王宇鹏, 王诺, 2023. 基于资源场引力模型的世界铝土矿流动格局演变分析[J]. 世界地理研究, 32(3): 52-63. Wu Di, Wang Yupeng, Wang Nuo, 2023. Analysis on the evolution of bauxite flow pattern in the world based on the gravity model of resource field [J]. World Regional Studies, 32(3):52-63.
- 徐斌, 刘杨倩宇, 叶利莹, 等, 2023. 全球锡矿典型产品网络贸易格局演变与中国地位[J]. 经济地理, 43(12): 113-125. Xu Bin, Liu Yangqianyu, Ye Liying, et al, 2023. Evolution and China's status of global network trade pattern in typical tin products [J]. Economic Geography, 43(12): 113-125.
- 徐水太, 马彩薇, 朱文兴, 2022. “一带一路”稀土贸易网络结构及演化研究[J]. 黄金科学技术, 30(2): 196-208. Xu Shuitai, Ma Caiwei, Zhu Wenxing, 2022. Study on the structure and evolution of rare earth trade network along the Belt and Road [J]. Gold Science and Technology, 30(2): 196-208.
- 张楠, 2024. 2023年中国铜工业供需形势分析[J]. 中国矿业, 33(02): 20-28. Zhang Nan, 2024. Supply and demand situation of China's copper industry in 2023 [J]. China Mining, 33(2):20-28.
- 周文韬, 杨汝岱, 2022. 贸易网络与企业出口动态[J]. 国际贸易问题, (1): 55-74. Zhou Wentao, Yang Rudai, 2022. Trade network and firm export dynamics [J]. Journal of International Trade, (1):55-74.
- 朱文兴, 胡恒祺, 徐水太, 2022. 全球稀有矿产品贸易格局演化及我国供应安全研究[J]. 黄金科学技术, 30(6): 877-890. Zhu Wenxing, Hu Hengqi, Xu Shuitai, 2022. Evolution of global rare minerals trade pattern and China's supply security research [J]. Gold Science and Technology, 30(6):877-890.
- 朱永光, 徐德义, 成金华, 等, 2017. 国际铁矿石贸易空间互动过程及中国进口策略分析[J]. 资源科学, 39(4): 664-677. Zhu Yongguang, Xu Deyi, Cheng Jinhua, et al, 2017. The interactive process of international iron ore trade and analysis of China's importation strategy [J]. Resources Science, 39(4): 664-677.

Evolution of Global Trade Patterns of Refined Copper and Analysis of China's Role Based on Complex Networks and Improved Gravity Model

XU Shuitai^{1,2}, LIU Meiling^{1,2}, ZHU Wenxing^{1,2}

1. *Economic Management College, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;*

2. *Non-ferrous Metal Industry Development Research Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China*

Abstract: Utilizing the global refined copper trade volume data spanning from 2004 to 2023, we employ complex network analysis to construct both random and weighted networks, thereby examining the global refined copper trade patterns from three perspectives: the overall trade structure, trade associations, and the roles of major trading nations. Additionally, we apply an enhanced gravitational model to assess the potential of China's refined copper trade with its top 10 trading partners. The findings reveal that: (1)The global refined copper trade exhibits characteristics of a small-world network, characterized by a multi-core trade association structure, evolving from an initial dominance by European and American countries to later incorporating nations from Asia, Africa, and the Middle East. (2)China and the United States emerge as principal importers of refined copper, while Chile, Peru, Japan, and Australia serve as major exporters. The United States and India function as pivotal intermediaries in the refined copper trade, with Germany and Italy acting as central hubs. (3)Among the top 10 trading partners, Chile and Australia present potential, for restructuring, whereas South Korea, the United States, and Zambia, exhibit significant potential. Additionally, Japan, the Philippines, Kazakhstan, Peru and Poland are potential pioneering. The study provides some policy recommendations for the development of international refined copper trade and China's import of refined copper.

Key words: complex networks; trade associations; trade patterns; improved gravity model; refined copper

自然资源部通报表扬四十六位地质找矿 青年科技人才

8月21日,自然资源部办公厅印发通知,通报表扬在新一轮找矿突破战略行动中取得优秀找矿成果的李鑫等46位青年科技人才。

据悉,此次受到表扬的46位青年科技人才来自2023年入选自然资源部高层次科技创新人才工程(地质找矿方向)的青年科技人才和2024年入选的地质找矿后备青年科技人才。前期,自然资源部科技发展司对这批青年科技人才的培养使用情况组织开展了跟踪调研,在此基础上评选出了先进典型。

通知指出,在新一轮找矿突破战略行动中,自然资源部高层次科技创新人才工程地质找矿青年科技人才和后备青年科技人才增强“为国找矿”使命感,锐意创新、攻坚克难,取得一批优秀找矿成

果。46位青年科技人才在理论创新、技术方法和装备研发、矿产勘查等方面业绩突出,有力支撑了新一轮找矿突破战略行动。

通知提出,希望受到表扬的青年科技人才珍惜荣誉、再接再厉、再立新功。有关用人单位和主管部门要全面落实《中共自然资源部党组关于印发〈关于进一步加强青年科技人才培养使用的具体举措〉的通知》,支持青年科技人才“挑大梁”“当主角”。广大青年科技工作者要以受表扬的先进典型为榜样,深入学习贯彻习近平总书记关于自然资源工作和科技创新的重要论述,不忘初心、踔厉奋发,发扬求真务实、勇于创新的精神,为服务新一轮找矿突破战略行动,推动自然资源事业高质量发展作出新的更大贡献。

(来源:中国自然资源报)