

中国钴供应链风险与控制力评价

袁小晶, 马 哲, 王安建, 李建武*, 钟维琼

中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037

摘 要: 钴是我国极度短缺的矿产资源, 同时也是战略新兴产业必需的原材料, 保证钴的稳定供应是产业发展的关键所在。本文立足钴的供应链, 基于我国进出口情况, 将上游环节的钴精矿和湿法冶炼中间产品定义为短缺产品, 将中游环节的精炼钴、下游环节的锂电池定义为优势产品。基于理论数据对上游产品进行供应风险评价, 发现由于国内一次、二次资源供应能力不足, 进口高度集中等因素导致上游产品供应风险极高。在实际贸易格局中, 虽未出现断供的情况, 但由于进口过于集中, 贸易自由度较低, 易受他国制约。对中、下游产品进行供应控制力评价, 发现我国从生产、出口以及企业表现三个方面均处于全球领先水平, 且下游产品还具有较高的贸易联系能力、与他国的调节能力和资源控制能力。综合考虑当上游产品进口中断会严重制约中、下游发展, 对此提出完善回收体系、优化进口来源、建立供应链安全预警机制等建议。

关键词: 钴; 供应链; 供应风险; 供应控制力

中图分类号: F426.1; F274 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2022.111201

Evaluation of Risk and Control of China's Cobalt Supply Chain

YUAN Xiao-jing, MA Zhe, WANG An-jian, LI Jian-wu*, ZHONG Wei-qiong

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resources Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Cobalt is a strategically important raw material, currently in extreme shortage in China. Ensuring a stable supply of cobalt is key to industrial development. From the perspective of the cobalt supply chain, this study defined the cobalt concentrate and intermediate wet smelting products in the upstream link as shortage products, and refined cobalt in the midstream link and lithium batteries in the downstream link as the desired products, based on the trade situation in China. From the theoretical data we used to evaluate the supply risk of the upstream products, we found that the supply risk of upstream products was extremely high due to factors such as the insufficient domestic supply capacity of primary and secondary resources and the high concentration of imports. In the actual trade pattern, although no break in supply has occurred, freedom of trade is restricted and trade is vulnerable to constraints from other countries due to the over-concentration of imports. From an evaluation of the control of the supply of midstream and downstream products, we found that China is a global leader in three areas: production, exports, and corporate performance; downstream products showed a high capacity for trade linkages, regulation with other countries, and resource controls. As the disruption of imports of upstream products will seriously restrict the development of the upstream and downstream industries, we provide

本文由国家自然科学基金重大研究计划集成项目“中国关键金属矿产清单厘定与风险评估”(编号: 92162321)、国家自然科学基金基础科学中心项目“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”(编号: 72088101)、国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(编号: 71991480)及其课题 5“新时代中国战略性关键矿产资源全球治理体系研究”(编号: 71991485)和中国地质调查局地质调查项目“全球矿产资源战略研究”(编号: DD20221795)联合资助。

收稿日期: 2022-09-23; 改回日期: 2022-11-24; 网络首发日期: 2022-12-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 袁小晶, 女, 1995 年生。博士研究生。主要从事矿产资源经济方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: xjyuan9581@126.com。

*通讯作者: 李建武, 男, 1967 年生。博士, 研究员。主要从事矿产资源经济方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: jwli67@126.com。

suggestions to improve the recycling system, optimize import sources, and establish an early warning mechanism to ensure supply chain security.

Key words: cobalt; supply chain; supply risk; supply control force

钴是新能源汽车、高端装备制造等战略性新兴产业不可或缺的原材料,同时也是欧盟、美国、中国、日本等经济体共同关注的关键矿产之一。全球钴生产集中在刚果(金)、俄罗斯、澳大利亚、菲律宾、古巴(U.S. Geological Survey, 2022),消费却集中在中国、韩国、日本等国家(Cobalt Institute, 2021),随着钴的战略地位不断提高,供需分离的格局使钴成为大国间矿产资源博弈的焦点。我国钴资源极度短缺,本土供应十分有限,储量、产量均在全球仅占比 1%(U.S. Geological Survey, 2022),消费量却占比 56%(徐爱东等, 2020),原矿的获取严重依赖进口,进口来源高度集中在刚果(金),该国政局不稳定且经济发展水平极低,理论上将导致我国钴初级产品的境外获取存在极大风险。在实际贸易中,初级产品的供应风险如何?若存在供应风险,是否会对我国后端产业的发展造成影响?我国后端产业当前在全球市场中的地位如何?为解决以上问题,亟需对我国钴供应链的风险与控制力进行评价。

与控制力评价相比,供应风险评价是较为成熟的研究领域。资源、技术、经济、政治是被多数国外学者认可的、对资源的供应风险起决定性作用的因素(Graedel et al., 2012),在此基础上,2008 年美国科学研究委员会又引入环境与社会因素,对铜、锂、钨、稀土在内的 11 种金属进行供应风险评价(National Academies, 2008)。此后,美、欧等西方国家的政府报告中,大多将上述指标进行耦合,评价本国矿产资源的供应风险,并以此厘定关键矿产种类(U.S. Department of Energy, 2010, 2011; European Commission, 2011, 2014, 2017, 2020a; National Science and Technology Council, 2016)。我国长期存在的资源供需矛盾、对外依存度不断加大、国外资源获取的不确定性增多等问题是导致资源供应存在风险的基本事实(姜在君, 2007),国内学者多认为影响供应风险的因素主要包括资源、政治、经济、运输、军事等五个方面(王礼茂, 2002; 张大超和汪云甲, 2003; 胡小平, 2005),可通过进口国资源禀赋、对外依存度、全球生产集中度、生产国政治稳定性、全球进口集中度等具体指标进行量化评估(李铭, 2011; 马兰, 2012; 李鹏飞等, 2014; 周平等, 2014; 郑人瑞等, 2016)。

在对钴供应风险的研究中,部分学者从资源禀赋、生产、贸易等维度定性分析全球钴的供应格局以及我国钴供应体系中的潜在问题(周艳晶等, 2014;

李颖等, 2014; 刘超和陈甲斌, 2020);部分学者采用定量评价模型,聚焦国内钴的初级产品阶段,从资源、市场、地缘政治等维度选取指标,分析影响钴供应能力的因素并确定供应风险来源,认为资源保障度低、对外依存度高以及进口高度集中在政治不稳定的国家等因素是影响我国钴初级产品供应风险的主要因素(刘全文等, 2018; 余韵和杨建锋, 2020);随着复杂网络方法在资源贸易研究中的应用逐渐成熟,一些学者还构建了钴初级产品的贸易网络,依据加权重度、中介中心度、紧密中心度等复杂网络评价指标,分析全球贸易的空间特征以及贸易网络中的重点国家(徐美娟, 2022),在此基础上对网络中的重点贸易国家进行攻击,以此探究全球贸易的稳定性以及供应中断情景下对需求国的影响(余慧, 2020; 余慧和丁颖辉, 2021; Sun et al., 2022)。而国外学者则将研究范畴延伸至钴资源的供应链,选取指标分析供应链风险的主要来源(Piçarra et al., 2021),或将钴供应链中涉及的主要企业作为节点,构建网络识别关键企业及企业间的合作关系,以此探讨如何分散产能,降低供应风险(Van Den Brink et al., 2020);或从投资及贸易的视角出发,通过统计中国钴的生产和出口情况,分析中国在全球供应市场中的地位以及随时间推移的变化,认为中国在全球钴供应链中的地位逐渐上升(Gulley et al., 2019);或通过设立断供和替代情景,探讨当中国限制精炼钴出口时对美国经济和产业发展产生的影响(Becker, 2021)。此外,欧美等国还发布多份政府报告,强化以钴在内的关键矿产供应链安全问题(White House, 2017, 2020, 2021; European Commission, 2020b)。

综上,国内相比于国外存在两点研究差距。首先,缺少对钴供应链整体风险的综合性评判,研究对象聚焦于前端,而对供应链后端涉及的产品供应安全及产业安全的系统性认识不足。其次,供应风险评价的研究方法缺少传统指标和网络指标的耦合,地质、经济、政治、技术等传统指标可从理论数据角度评估一国是否具有供应风险,而加权重度、中介中心度等复杂网络指标可基于现实贸易格局进一步反映资源短缺的国家是否能获取境外资源,或具有资源优势的国家是否具备较高的控制能力。在当前的供应风险研究中,多数学者仅依据客观数据,从国内资源、全球生产、贸易集中程度等方面论证了我国钴资源具有供应风险,但并未结合实际贸易情况阐述我国是否能稳定、有效地获取境外钴资源,

同时在少数运用复杂网络指标进行风险评估的研究中,也并未对钴供应链的上、中、下游展开讨论。

对此,本文首先梳理我国钴供应链中的贸易产品,以复杂网络的形式呈现各产品的贸易格局,依据产品的进出口状态将其归为我国短缺或优势产品。其次构建评价体系,融合传统评价指标和复杂网络评价指标,对短缺产品的供应风险以及优势产品的供应控制力分别评估,为保证钴供应链的稳定、提高我国在全球钴供应市场中的竞争力提供理论依据。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

首先,统计我国 2012—2020 年钴供应链上、中、下游的贸易产品及贸易量。其次,以贸易国家为节点,国家间贸易量为连边构建网络,分别展示各贸易产品在 2012、2017、2020 年三个时间节点的贸易格局,并依据我国各类钴产品的进出口情况,将净进口、净出口产品分别定义为短缺产品、优势产品。最后,构建评价体系(图 1),依据传统评价指标分析短缺产品的供应风险来源以及优势产品的控制力强度,依据网络评价指标分析我国在全球钴贸易市场中与他国的贸易联系能力以及受他国影响程度,综合传统及网络评价指标,评估我国钴供应链的整体稳定性及竞争力。

1.1.1 贸易网络构建

以国家为节点,国家间贸易关系为连边,建立有向加权网络 $G=(V, W)$ 。其中 $Vn=(V_i: i=1, 2, 3\cdots)$ 为网络中的节点,即贸易国; $W=(w_{ij}: i, j \in Vn)$ 为节点间边的权重,即两国间的贸易量。

1.1.2 供应风险评价

基于矿产资源全生命周期理论并结合现有供

应风险研究中涉及的评价指标(刘全文等, 2018; 李鹏远等, 2019; Yu et al., 2021; 赵怡然, 2021), 本文选取国内钴的对外依存度、资源可供年限、回收能力,以及全球钴的生产与贸易稳定性作为传统评价指标,选取节点的加权入度、紧密中心度作为网络评价指标(表 1)。考虑数据的可得性,传统评价指标中,回收水平进行定性分析,其余指标进行定量评价,并运用风险划分标准将其划分为 3 个风险状态和 9 个风险等级(“宽松”1~3 级,“适中”4~6 级,“紧张”7~9 级),以此识别风险点来源,并结合网络指标评估出的我国短缺产品的贸易能力,综合分析短缺产品的供应风险。

1.1.3 供应控制力评价

全球资源供应市场中,决定一国是否具有控制力的因素主要有五个:生产及出口在全球所占份额、该国企业产能的集中程度、该国与他国的贸易联系能力、以及该国对资源的贸易议价能力(表 2)。产量及出口量决定是否具有资源优势,国内产能集中程度、对外贸易能力以及议价能力决定能否将资源优势转化为资本优势。

1.2 数据来源

钴原矿的储量及产量数据来自美国地质调查局;消费量数据来自世界金属统计年鉴;各国的社会治理指数 WGI 来自世界银行(World Bank, 2021),由自身的话语权和问责、政治稳定性与非暴乱、政府有效性、管制质量、法治程度、腐败控制六个指标几何平均计算得出,指标值范围 1~10,数值越大,该国的政治稳定性越低;环境绩效指数 EPI 来自耶鲁大学环境法与政策中心发布的《Environmental Performance Index 2022》(Yale Center for Environmental Law & Policy, 2022)报告,由保证人类健康和保护生态系统两方面设定的 24 项绩效指标

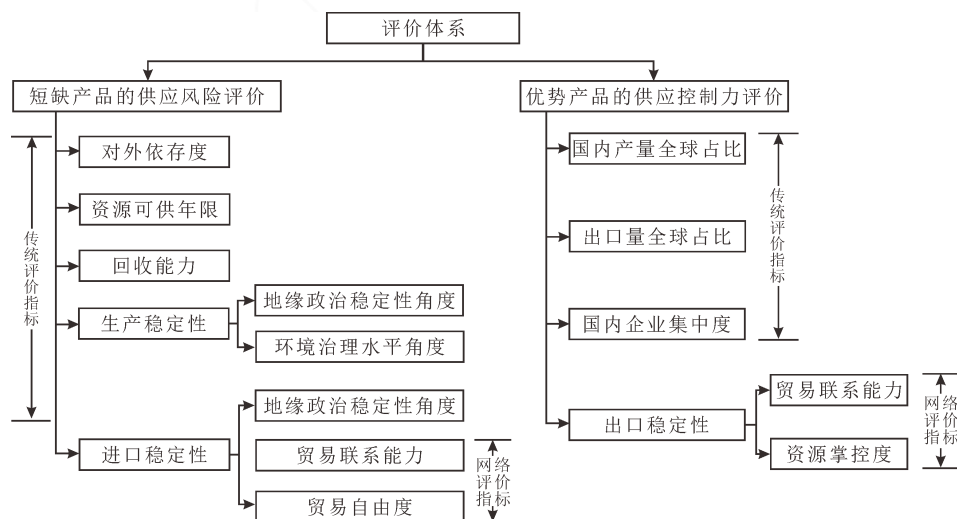


图 1 供应风险及供应控制力评价体系
Fig. 1 System of evaluating supply risk and control

表 1 供应风险评价指标
Table 1 Indicators used for evaluating supply risk

评价指标	评价方法	变量说明	风险等级划分
资源可供年限	$R_S=\frac{R}{C}$	支撑本土资源供应的年限。 R 为我国储量, C 为我国消费量	> 10 年, 宽松; 5~10 年, 适中; < 5 年, 紧张
对外依存度	$IR=\frac{I-E}{I-E+P}$	消费量中净进口量的占比。 I 、 E 为我国进口量、出口量, P 为我国产量	< 30%, 宽松; 30%~70%, 适中; > 70%, 紧张
回收能力	定性分析	缓解对一次资源依赖的程度	-
生产稳定性	地缘政治稳定性角度 $HHI_{PWGI}=\sum P_C^2\times WGI_C$	判断矿产资源的生是否集中在地缘政治不稳定的国家。 HHI 为市场集中度指标, P_C 为生产国产量占全球份额, WGI (World Governance Index)为该国社会治理指数	3~4, 宽松; 4.5~5.5, 适中; 6~7, 紧张
	环境治理水平角度 $P_{EPI}=\sum P_C\times EPI_C$	判断环保要求下的矿产资源生产稳定程度。 P_C 为生产国产量占全球份额, EPI_C (Environment Performance Index)为反映该国的环保政策绩效指数	> 79, 宽松; 57.5~79, 适中; < 57.5, 紧张
进口稳定性	地缘政治稳定性角度 $HHI_{TWGI}=\sum T_C^2\times WGI_C$	判断进口是否集中在地缘政治不稳定的国家。 T_C 为出口国的出口量, WGI 为该国社会治理指数	3~4, 宽松; 4.5~5.5, 适中; 6~7, 紧张
	贸易联系能力-加权入度 $W_i=\sum_{j=1}^n w_{ji}$	一国的加权入度越大, 与他国的贸易联系能力越强。 W_i 为 i 国与别国的贸易量总和, w_{ji} 为 j 国到 i 国的贸易量	-
	贸易自由度-紧密中心度 $d_i=\frac{1}{n-1}\sum_{j\neq i} dist_{ij}$	一国的紧密中心度越大, 代表与他国的贸易路径越短, 对他国的贸易依赖越低, 不易受他国限制。 d_i 为节点 i 到其他节点的平均最短路径, $dist_{ij}$ 为 i 到 j 的最短路径, n 为网络中的节点数。	-

表 2 供应控制力评价指标
Table 2 Indicators used for evaluating supply control

评价指标	评价方法	变量说明
产量占比	$P_P=\frac{P_C}{P_W}\times 100\%$	P_C 为中国产量, P_W 为全球产量
出口量占比	$E_P=\frac{E_C}{E_W}\times 100\%$	E_C 为中国出口量, E_W 为全球出口量
企业集中度	定性分析	-
出口稳定度	贸易联系能力-加权出度 $W_i=\sum_{j=1}^n w_{ij}$	反映一国与他国的贸易能力。一国的加权出度越大, 与他国的贸易联系能力越强。 W_i 为 i 国与他国的贸易量总和, w_{ij} 为 i 国到 j 国的贸易量
	资源掌控度-中介中心度 $C_{(b)i}^{Ab}=\sum_{p=1}^n\sum_{q=1}^n\frac{g_{pq(i)}}{g_{pq}}$	反映一国对资源的议价能力。一国的中介中心度越高, 代表在贸易网络中出现在其他两国间的最短路径次数越多, 即该国中介性越强, 对资源控制能力越高。 g_{pq} 为节点 p 和 q 之间的最短路径, $g_{pq(i)}$ 为经过节点 i 的节点 p 、 q 之间的最短路径

进行综合定量评估, 指标值范围 1~100, 数值越大, 该国的环境治理有效性越高, 生产越不易受环境保护影响; 供应链中各环节产品的贸易数据来自联合国贸易数据库, 综合考虑贸易量和主要消费领域与需求趋势(徐爱东等, 2020), 选取贸易商品: 上游环节为钴精矿(贸易代码: 260500)和湿法冶炼中间产品(贸易代码: 810520); 中游环节为精炼钴, 选择碳酸钴(贸易代码: 283699)、硫酸钴(贸易代码: 283329)、氢氧化钴和氧化钴(贸易代码: 282200); 下游环节为电动汽车用锂电池材料(贸易代码: 850760)、平板和手机用锂电池材料(贸易代码: 850650)。

2 研究结果

2.1 钴供应链产品的贸易格局

2.1.1 上游环节

我国钴资源极度短缺, 上游产品依赖海外进口, 进口来源高度集中在刚果(金)(图 2)。将上游钴精矿(折算系数 0.07)和湿法冶炼中间产品(折算系数 0.26)折合为钴金属(周艳晶等, 2019)并相加, 可知我国和刚果(金)为全球最大的出口国和进口国, 二者间的贸易量在全球总贸易量中的占比从 2012 年的 55% 增长至 2020 年的 95%。除刚果(金)外, 我国上游产品进口来源还包括澳大利亚、刚果(布)、新喀里多

尼亚等国,但贸易量甚微。2012年芬兰和赞比亚与我国构成潜在的贸易竞争关系,2020年我国已成为刚果(金)唯一贸易伙伴,但鉴于刚果(金)经济发展及政治稳定程度较低,资源供应可谓稳定与风险并存。

2.1.2 中游环节

中游环节的精炼钴是动力电池、合金制造等领域的重要原材料,各国因产业发展拉动对精炼钴的需求,从而推动贸易竞争,由此表现为贸易涉及的国家与上游相比更为多元化(图2)。将碳酸钴(折算系数0.50)、硫酸钴(折算系数0.06)、氢氧化钴和氧化钴(折算系数0.64)折合为钴金属(Liu et al., 2022)并相加,可知我国为全球最大的精炼钴出口国,出

口量可占全球总出口量的30%,韩国、美国、印度、日本以及部分欧洲国家为我国主要的出口目标国。此外,欧洲国家为保证自身战略新兴产业的稳定发展,在此环节的贸易活动中表现积极,但贸易流向多局限于欧洲内部,德国为仅次于我国的第二大出口国,贸易合作伙伴为意大利、瑞典、芬兰、英国等。

2.1.3 下游环节

将车用锂电池(折算系数0.06%)和平板手机用锂电池(折算系数0.06%)折合为钴金属(刘立涛等, 2021)并相加,可知我国为全球最大锂电池出口国,出口量在全球总出口量的占比可达50%。2012年主要出口至南非,后随着锂电池的全球普及拉动各国

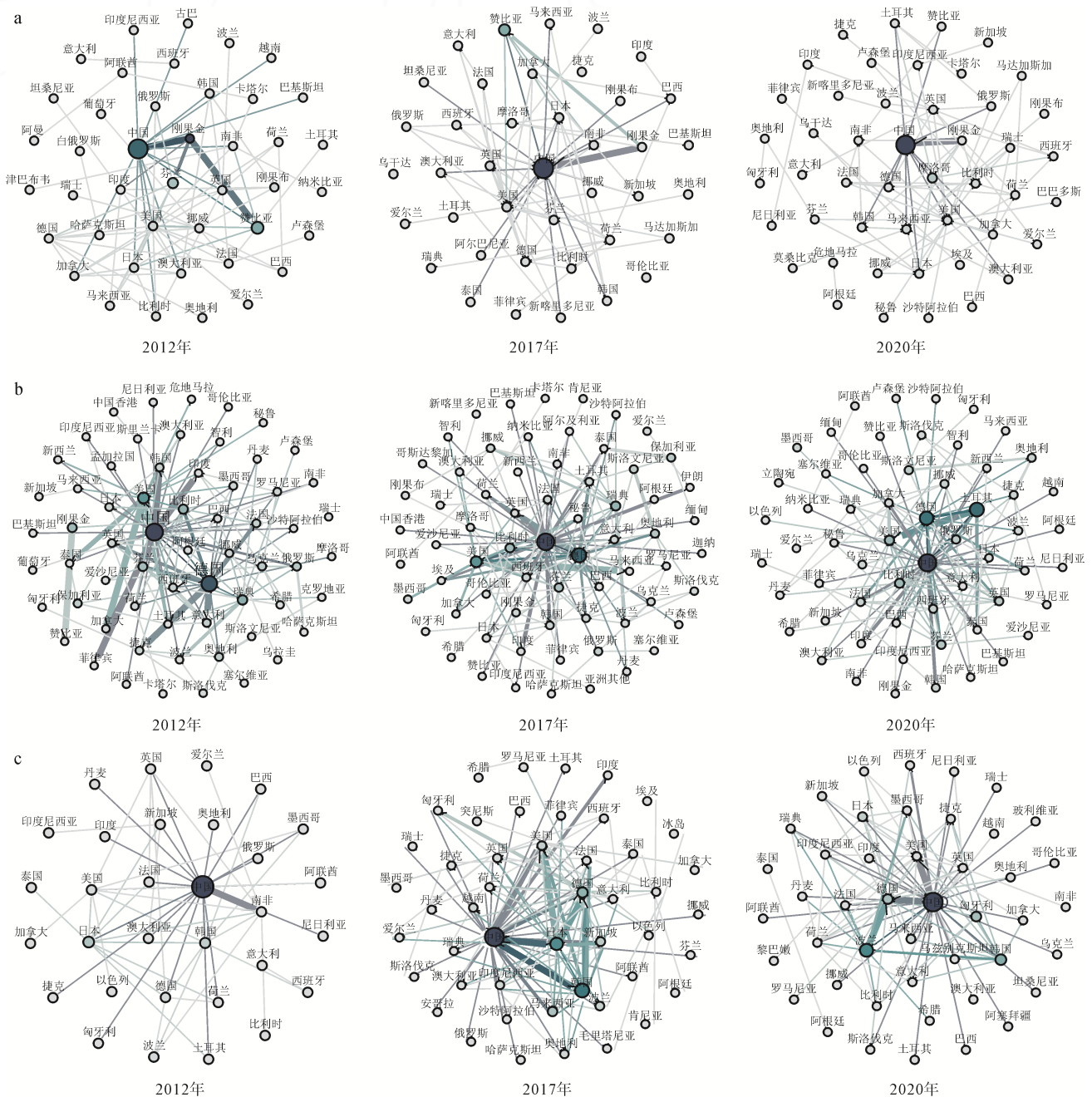


图2 钴上游(a)、中游(b)、下游(c)产品贸易格局

Fig. 2 Trade patterns of upstream(a), midstream(b), and downstream(c) cobalt products

消费,贸易国家数量也随之上升,韩国、美国、日本、德国成为我国主要的出口目标国(图 2)。欧洲国家在此阶段的贸易活动中依旧表现活跃,但贸易流向仍局限在欧洲内部。

2.2 供应风险评价结果

根据钴各类产品的贸易格局,供应风险的评价对象为上游产品,评价结果显示传统指标均处于“紧张”的风险水平(表 3)。其中,对外依存度风险划分标准来自崔荣国和刘树臣(2008);地缘政治加权(HHI_{PWGI})的生产、贸易稳定度风险划分标准来自 Tornow-Rosenau et al.(2009);环保绩效加权(P_{EPI})的生产稳定度风险划分标准来自 Jasiński et al.(2018)。由于国内一次资源可供能力极低,可供年限由 2012 年的可维持三年供应,下降至 2020 年的可维持一年供应,又由于缺乏相应的技术以及完善的法规(杜欢政等, 2013),钴的回收水平尚未突破,导致二次资源也无法有效缓解供应缺口,资源的获取严重依赖进口,对外依存度高达 95%~97%。刚果(金)是我国最大的进口来源国,该国政治稳定性以及环境治理绩效均处于较低的水平,虽然加权入度值显示我国一直是全球最大进口国,且进口量稳定,但我

国紧密中心度值排名靠后(表 4),表现为贸易自由度偏低,进口来源过于集中,即当刚果(金)出现政治波动或出台资源限制出口政策时,我国钴资源将出现断供情况,对中、下游产业的发展造成打击。

2.3 供应控制力评价结果

根据贸易格局,供应控制力评价对象为中、下游产品。

2.3.1 中游环节

与上游产品的生产、贸易格局不同,欧美国家为更好地满足自身产业发展需求以及降低原材料的供应风险,其精炼钴的生产与贸易均在全球市场中占据一定比重,如芬兰、加拿大、挪威、比利时等国的生产,以及德国、土耳其等国的出口在此环节中均位居前列。但由于我国拥有较低的加工成本以及完善的生产体系,始终为全球最大生产国,承担了全球 60%以上的生产(图 3)。同时,我国华友钴业、格林美、金川集团、加纳集团、腾远钴业为全球主要的精炼钴生产商,且共同承担国内 75%的精炼钴产量(徐爱东等, 2020),产能相对集中,表明国内精炼钴市场具有一定的价格控制能力。我国也为全球最大出口国,出口量占比 30%。分解精炼钴的

表 3 风险评价结果汇总
Table 3 Summary of risk assessment results

年份	本土资源 可供年限	对外依存度	生产稳定性		进口稳定性		
			HHI_{PWGI}	P_{EPI}	HHI_{TWGI}	加权入度排名	紧密中心度排名
2012	3	96.18%	2.58	36.54	7.31	1	7
2013	2	96.19%	2.05	34.92	7.40		
2014	2	96.36%	2.14	26.86	7.50		
2015	2	96.93%	2.23	25.03	7.53		
2016	2	84.28%	0.66	24.58	6.00		
2017	2	97.02%	2.93	49.73	7.67	1	10
2018	1	97.77%	3.69	29.82	7.87		
2019	1	97.85%	4.09	29.70	7.76		
2020	1	95.89%	4.15	34.11	7.94	1	3
风险等级	9	8	7	7	8	-	-

表 4 上游环节的复杂网络指标评价结果
Table 4 Complex network indicator evaluation results in upstream link

加权入度($\times 10^3$, 取整数值)						紧密中心度(保留两位小数)					
2012 年		2017 年		2020 年		2012 年		2017 年		2020 年	
国家	值	国家	值	国家	值	国家	值	国家	值	国家	值
中国	89	中国	100	中国	104	美国	0.63	挪威	0.48	美国	0.90
赞比亚	29	赞比亚	23	摩洛哥	10	澳大利亚	0.53	荷兰	0.47	英国	0.63
芬兰	15	日本	3	马来西亚	3	加拿大	0.52	比利时	0.47	中国	0.60
日本	3	美国	3	比利时	2	日本	0.50	芬兰	0.46	法国	0.60
美国	2	英国	2	美国	2	赞比亚	0.49	加拿大	0.45	德国	0.60
韩国	1	德国	1	日本	2	比利时	0.48	美国	0.42	日本	0.59
英国	1	芬兰	1	韩国	1	南非	0.47	南非	0.39	澳大利亚	0.54
挪威	1	摩洛哥	0	英国	1	中国	0.47	赞比亚	0.38	南非	0.53
德国	1	韩国	0	荷兰	0	荷兰	0.46	俄罗斯	0.38	芬兰	0.52
马来西亚	0	马来西亚	0	加拿大	0	刚果布	0.46	中国	0.37	俄罗斯	0.51

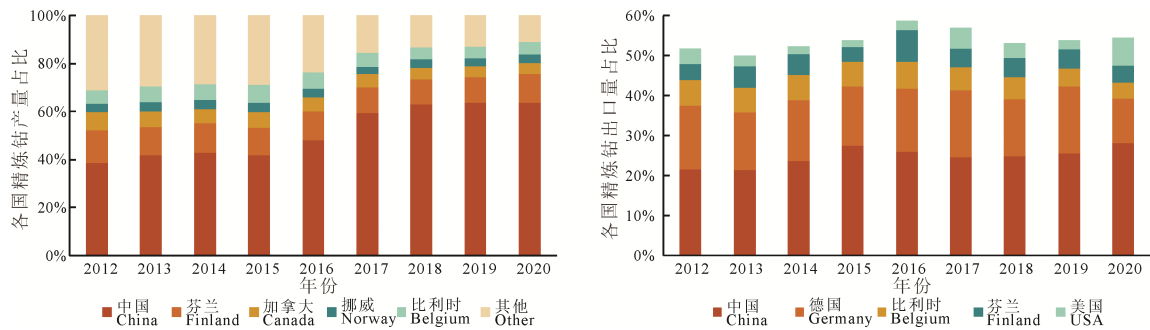


图3 各国精炼钴产量和出口量占比

Fig. 3 Distribution of refined cobalt production and exports by country

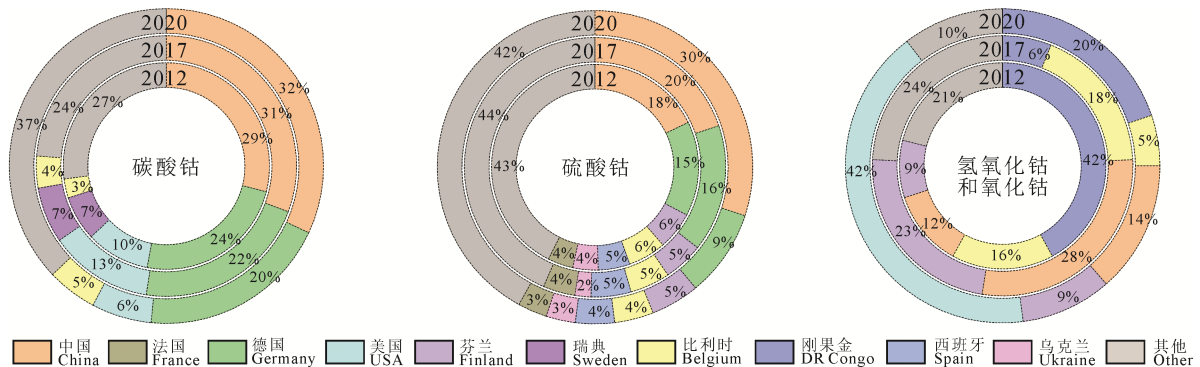


图4 2012、2017、2020年主要国家精炼钴的出口量占比

Fig. 4 Export volume share of refined cobalt by major countries in 2012, 2017, and 2020

详细出口情况，其中，碳酸钴和硫酸钴出口量常年保持领先水平，而氢氧化钴和氧化钴作为制造锂电池正极的重要材料，因满足内需导致出口量明显下降(图4)。欧洲国家精炼钴的出口量仅次于我国，但其出口目标国集中在欧洲内部，我国的出口流向则更为多元，包括欧盟、美国、加拿大、澳大利亚等发达经济体，以及印度、巴西等新兴经济体和部分发展中国家。因此就出口份额及出口惠及国而言，我国在全球供应市场中占据较重要的地位。

而结合网络分析指标来看(表5)，德国精炼钴的出口量虽低于我国，但由于欧洲内部贸易联系紧

密，使其拥有更高的中介中心度值，表明其在全球贸易中与他国间的调节能力更强，从而反映对资源的控制能力和议价能力更强。而我国虽拥有全球最高的精炼钴产量和出口量，但由于出口目标国之间的贸易联系紧密度相对较低，表现为我国的中介中心度不稳定，即无法将原本的资源优势转化为资本优势，不具有一定的控制力和话语权。

2.3.2 下游环节

由于缺乏可靠、长时间尺度的下游锂电池生产数据，该环节的供应控制力分析将结合相关的权威报告以及相关的网络评价指标，对我国在全球供应

表5 中游环节的复杂网络指标评价结果

Table 5 Complex network indicator evaluation results in midstream link

加权出度($\times 10^3$, 取整数)						中介中心度(取整数)					
2012年		2017年		2020年		2012年		2017年		2020年	
国家	值	国家	值	国家	值	国家	值	国家	值	国家	值
中国	93	中国	125	中国	111	德国	794	德国	723	德国	206
德国	79	德国	90	土耳其	71	美国	458	中国	454	美国	89
美国	33	美国	45	德国	66	比利时	403	芬兰	299	比利时	66
瑞典	19	瑞典	23	美国	18	中国	401	法国	268	捷克	44
比利时	17	比利时	18	比利时	17	英国	335	瑞典	256	法国	37
刚果金	15	芬兰	15	芬兰	11	法国	316	比利时	253	波兰	35
芬兰	14	奥地利	12	英国	8	韩国	219	挪威	228	挪威	29
俄罗斯	8	保加利亚	9	俄罗斯	8	西班牙	178	韩国	206	俄罗斯	29
乌克兰	7	斯洛文尼亚	8	斯洛文尼亚	8	日本	161	英国	157	中国	25
奥地利	6	俄罗斯	7	西班牙	5	波兰	140	波兰	128	泰国	23

表 6 全球前十锂电池生产企业
Table 6 Top 10 global lithium battery producers

排名	企业	所属国家	占比	排名	企业	所属国家	占比
1	宁德时代	中国	33%	6	三星	韩国	4%
2	LG 新能源	韩国	20%	7	中创新航	中国	3%
3	松下	日本	12%	8	国轩高科	中国	2%
4	比亚迪	中国	6%	9	远景动力	中国	1%
5	SK ON	韩国	6%	10	蜂巢能源	中国	1%

表 7 下游环节的复杂网络指标评价结果
Table 7 Complex network indicator evaluation results in downstream link

加权出度($\times 10^3$, 取整数值)						中介中心度(取整数值)					
2012 年		2017 年		2020 年		2012 年		2017 年		2020 年	
国家	值	国家	值	国家	值	国家	值	国家	值	国家	值
中国	800	中国	640	中国	3153	美国	11	中国	376	中国	363
日本	85	韩国	355	波兰	1387	韩国	6	美国	251	德国	360
韩国	48	日本	262	韩国	703	德国	4	德国	239	美国	201
波兰	10	德国	125	匈牙利	426	新加坡	2	新加坡	107	马来西亚	61
美国	9	马来西亚	75	德国	407	英国	2	法国	76	英国	53
德国	6	新加坡	47	日本	211	日本	1	英国	66	波兰	48
爱尔兰	3	美国	37	马来西亚	124	-	-	罗马尼亚	40	法国	47
比利时	1	波兰	32	新加坡	60	-	-	日本	27	荷兰	25
印尼	1	越南	19	捷克	41	-	-	泰国	22	日本	25
新加坡	1	中国	640	奥地利	36	-	-	意大利	21	印度	22

市场中的控制力进行综合评价。

我国为全球锂电池最大生产国和出口国, 2020 年产量和出口量分别占比全球 66%(European Commission, 2020b)和 45%。同时, 我国锂电池生产企业在全球市场也占据较高的份额, 2020 年全球前十大锂电池生产企业产量占比全球总产量的 88%, 其中有 6 家为中国企业, 承担 46%的生产(徐爱东等, 2020), 在全球锂电池供应体系中占据绝对优势(表 6)。综合网络评价结果(表 7), 可知我国还具有较强的锂电池贸易联系能力, 以及对产品的控制能力和议价能力, 因此在下游市场中占据绝对控制力。

3 主要认识与结论

(1)基于进出口贸易, 上游环节的钴精矿和湿法冶炼中间产品为我国短缺产品, 中游环节的精炼钴和下游环节的锂电池均为我国优势产品。

(2)我国钴资源上游产品严重依赖进口, 进口来源高度集中在刚果(金), 由于其地缘政治风险大、环保绩效水平低, 导致 2012—2020 年我国钴上游产品始终存在极高的供应风险。贸易格局分析表明, 我国贸易自由度与发达国家相比较弱, 易受他国制约。应进一步加强进口来源多元化, 降低由于他国制约带来的潜在风险。

(3)尽管 2012—2020 年我国钴上游产品始终存在较高的供应风险, 但由于我国拥有较完善的产业链以及较低的生产成本, 在此期间我国钴中、下游产品的产量与出口量份额始终位居全球首位。但中游环节的中介中心度指标值不稳定, 体现为对外议价能力与资本转换能力较弱, 与西方国家相比还处

于较为劣势的地位。而下游环节则具有一定的控制力和话语权, 不仅 2020 年锂电池出口目标国与 2012 年相比更为多元, 且表现出较高的贸易联系能力以及与他国的调节能力。

(4)中、下游产品的控制力是建立在上游产品境外供应稳定的基础上, 倘若上游原材料境外断供, 国内资源无法弥补供需缺口, 中下游产品的生产与出口优势将不复存在, 在大国博弈以及西方试图将全球产业链“去中国化”的背景下, 将严重制约我国战略新兴产业的发展。对此, 应建立钴供应链安全预警协调机制, 结合钴的需求预测完善资源规划利用体系, 通过统筹协调的方式提升下游产业发展的协同性。在此基础上, 加快建立完善的回收体系, 缓解需求压力, 同时优化进口来源, 加强上游产品的海外布局, 分散因进口集中而带来的供应风险。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 92162321, 72088101, 71991480, and 71991485), and China Geological Survey (No. DD20221795).

参考文献:

- 崔荣国, 刘树臣. 2008. 矿产品对外依存度研究及初步测算[J]. 国土资源情报, (8): 39-43.
- 杜欢政, 保积庆, 徐劼. 2013. 钴镍金属二次资源回收利用现状及发展对策研究[J]. 再生资源与循环经济, 6(2): 33-39.
- 胡小平. 2005. 矿产资源供应安全评价[J]. 中国国土资源经济, (7): 6-8, 46.
- 姜在君. 2007. 我国经济发展面临的资源风险及储备[J]. 中国储

运, (6): 70-72.

李铭. 2011. 大宗重要矿产资源安全研究[D]. 北京: 中国地质大学.

李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 张艳芳. 2014. 稀有矿产资源的战略性评估——基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 中国工业经济, (7): 44-57.

李鹏远, 周平, 唐金荣, 李建武. 2019. 中国铜矿资源供应风险识别与评价: 基于长周期历史数据分析预测法[J]. 中国矿业, 28(7): 44-51.

李颖, 周艳晶, 张艳飞. 2014. 未来全球钴资源供应形势分析[J]. 中国矿业, 23(8): 1-4.

刘超, 陈甲斌. 2020. 全球钴资源供需形势分析[J]. 国土资源情报, (10): 27-33.

刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 代涛, 刘刚. 2021. 1995—2015 年美国钴物质流演变[J]. 资源科学, 43(3): 524-534.

刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 周平. 2018. 中国钴资源供应风险评价与治理研究[J]. 中国矿业, 27(1): 50-56.

马兰. 2012. 基于资源安全的中国铜矿进口源地风险分析与控制[D]. 长沙: 中南大学.

王礼茂. 2002. 资源安全的影响因素与评估指标[J]. 自然资源学报, 17(4): 401-408.

徐爱东, 孙永刚, 刘磊, 孔占荣, 周航. 2020. 2020 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科信息股份有限公司.

徐美娟. 2022. 钴资源贸易网络特征对产业国际竞争力的影响研究[D]. 南昌: 江西理工大学.

余慧, 丁颖辉. 2021. 网络视角下全球钴中间产品贸易时空关联关系研究[J]. 中国矿业, 30(1): 40-47.

余慧. 2020. 钴矿石国际贸易网络的空间效应与抗风险性研究[J]. 价值工程, 39(8): 229-231.

余韵, 杨建锋. 2020. 中国战略性矿产地位和作用的变化——以钴为例[J]. 矿业研究与开发, 40(12): 177-183.

张大超, 汪云甲. 2003. 矿产资源安全评价指标体系研究[J]. 地质技术经济管理, 25(5): 20-24.

赵怡然. 2021. 钴产业链贸易依赖网络结构对贸易价格的影响研究[D]. 北京: 中国地质大学.

郑人瑞, 唐金荣, 周平, 杨利亚. 2016. 我国锂资源供应风险评估[J]. 中国矿业, 25(12): 30-37.

周平, 唐金荣, 张涛. 2014. 全球锂资源供需前景与对策建议[J]. 地质通报, 33(10): 1532-1538.

周艳晶, 李建武, 王高尚, 马哲. 2019. 中国钴资源进口安全分析[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 50-55.

周艳晶, 李颖, 柳群义, 张艳飞. 2014. 中国钴需求趋势及供应问题浅析[J]. 中国矿业, 23(12): 16-19, 41.

and Resources Information, (8): 39-43(in Chinese).

DU Huan-zheng, BAO Ji-qing, XU Jie. 2013. Research on the current status of cobalt and nickel recycled from secondary resources and countermeasures for development[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 6(2): 33-39(in Chinese with English abstract).

European Commission. 2011. Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials[R]. Brussels: European Commission.

European Commission. 2014. On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the raw materials initiative[R]. Brussels: European Commission.

European Commission. 2017. Assessment of the methodology for establishing the EU list of critical raw materials[R]. Luxembourg: Publication Office of the European Union.

European Commission. 2020a. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials[R]. Luxembourg: Publication Office of the European Union.

European Commission. 2020b. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU—A foresight study[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

GRAEDEL T E, BARR R, CHANDLER C, CHASE T, CHOI J, CHRISTOFFERSEN L, FRIEDLANDER E, HENLY C, JUN C, NASSAR N T, SCHECHNER D, WARREN S, YANG Man-yu, ZHU C. 2012. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science & Technology, 46: 1063-1070.

GULLEY A L, MCCULLOUGH E A, SHEDD K B. 2019. China's domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain[J]. Resources Policy, 62: 317-323.

HU Xiao-ping. 2005. Evaluation on mineral resource supply security[J]. Natural Resource Economics of China, (7): 6-8, 46(in Chinese with English abstract).

JASIŃSKI D, CINELLI M, DIAS L C, MEREDITH J, KIRWAN K. 2018. Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis[J]. Resources Policy, 58: 150-158.

JIANG Zai-jun. 2007. Resource risks to our economic development and reserves[J]. China Storage & Transport Magazine, (6): 70-72(in Chinese).

LI Ming. 2011. Study on bulk stock mineral resources security[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

LI Peng-fei, YANG Dan-hui, QU Shen-ning, ZHANG Yan-fang. 2014. A strategic assessment of rare minerals—Based on the perspective of strategic emerging industries development[J]. China Industrial Economics, (7): 44-57(in Chinese with English abstract).

LI Peng-yuan, ZHOU Ping, TANG Jin-rong, LI Jian-wu. 2019. Identification and evaluation of copper supply risk for China: using method of long-term historical data analysis[J]. China Mining Magazine, 28(7): 44-51(in Chinese with English abstract).

LI Ying, ZHOU Yan-jing, ZHANG Yan-fei. 2014. The future supply situation analysis of global cobalt resources[J]. China Mining Magazine, 23(8): 1-4(in Chinese with English abstract).

References:

BECKER J M. 2021. General equilibrium impacts on the U.S. economy of a disruption to Chinese cobalt supply[J]. Resources Policy, 71: 102005.

VAN DEN BRINK S, KLEIJN R, SPRECHER B, TUKKER A. 2020. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain[J]. Resources, Conservation and Recycling, 156: 104743.

COBALT INSTITUTE. 2021. Cobalt market report 2021[R]. United Kingdom: Cobalt Institute.

CUI Rong-guo, LIU Shu-chen. 2008. Study on external dependence of mineral products and preliminary estimation[J]. Land

- LIU Chao, CHEN Jia-bin. 2020. Analysis of supply and demand situation of global cobalt resources[J]. Land and Resources Information, (10): 27-33(in Chinese with English abstract).
- LIU Li-tao, ZHAO Hui-lan, LIU Xiao-jie, DAI Tao, LIU Gang. 2021. Cobalt material flow in the United States from 1995 to 2015[J]. Resources Science, 43(3): 524-534(in Chinese with English abstract).
- LIU Meng, LI Hua-jiao, ZHOU Jin-sheng, FENG Si-da, WANG Yan-li, WANG Xing-xing. 2022. Analysis of material flow among multiple phases of cobalt industrial chain based on a complex network[J]. Resources Policy, 77: 102691.
- LIU Quan-wen, SHA Jing-hua, YAN Jing-jing, ZHOU Ping. 2018. Risk assessment and governance of cobalt resources supply in China[J]. China Mining Magazine, 27(1): 50-56(in Chinese with English abstract).
- MA Lan. 2012. Risk analysis and control of the source location of China's copper imports based on resource security[D]. Changsha: Central South University(in Chinese with English abstract).
- NATIONAL ACADEMIES. 2008. Minerals, critical minerals, and the U.S. economy[R]. Washing D.C.: National Academies.
- National Science and Technology Council. 2016. Assessment of critical minerals: Screening methodology and initial application[R]. Washington, D.C.: National Science and Technology Council.
- PIÇARRA A, ANNESLEY I R, OTSUKI A, DE WAARD R. 2021. Market assessment of cobalt: Identification and evaluation of supply risk patterns[J]. Resources Policy, 73: 102206.
- SUN Xiao-qi, SHI Qing, HAO Xiao-qing. 2022. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. Resources, Conservation and Recycling, 179: 106035.
- TORNOW-ROSENAU D, BUCHHOLZ P, RIEMANN A, WAGNER M. 2009. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends[J]. Resources Policy, 34(4): 161-175.
- U.S. Department of Energy. 2010. Critical materials strategy[R]. Washington D.C.: U.S. Department of Energy.
- U.S. Department of Energy. 2011. Critical materials strategy[R]. Washington D.C.: U.S. Department of Energy.
- U.S. Geological Survey. 2022. Mineral commodity summaries 2022[R]. New York: U.S. Geological Survey.
- WANG Li-mao. 2002. Influential factors and index system for appraising resources security[J]. Journal of Natural Resources, 17(4): 401-408(in Chinese with English abstract).
- WHITE HOUSE. 2017. Executive Order 13817: A federal strategy to ensure secure and reliable supplies of critical minerals[EB/OL]. (2017-12-26) [2022-10-14]. <https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals>.
- White House. 2020. Executive Order 13953: Addressing the threat to the domestic supply chain from reliance on critical minerals from foreign adversaries and supporting the domestic mining and processing industries[EB/OL]. [2022-10-14]. <https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-m-reliance-on-critical-minerals-from-foreign>.
- White House. 2021. Executive Order 14017: Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing, and fostering broad-based growth[EB/OL]. [2022-10-14]. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/03/01/2021-04280/americas-supply-chains>.
- World Bank. 2021. Worldwide governance indicators[DB/OL]. [2021-10-14]. <https://databank.worldbank.org/source/worldwide-governance-indicators#>.
- XU Ai-dong, SUN Yong-gang, LIU Lei, KONG Zhan-rong, ZHOU Hang. 2020. Non-ferrous metals market development report 2020(cobalt)[R]. Beijing: Antaika(in Chinese).
- XU Mei-juan. 2022. Research on effects of cobalt resources trade network characteristics and the industry international competitiveness[D]. Nanchang: Jiangxi University of Technology(in Chinese with English abstract).
- WOLF M J, EMERSON J W, ESTY D C, DE SHERBININ A, WENDING Z A. 2022. Environmental performance index 2022: Ranking country performance on sustainability issues[R]. Connecticut: Yale Center for Environmental Law & Policy.
- YU Hui, DING Ying-hui. 2021. Study on the spatial and temporal correlation of global cobalt intermediate products trade network[J]. China Mining Magazine, 30(1): 40-47(in Chinese with English abstract).
- YU Hui. 2020. Study on the spatial effect and risk resistance of cobalt ore international trade network[J]. Value Engineering, 39(8): 229-231(in Chinese with English abstract).
- YU Shi-wei, DUAN Hao-ran, CHENG Jin-hua. 2021. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. Resources Policy, 70: 101891.
- YU Yun, YANG Jian-feng. 2020. Changes in the status and role of strategic minerals in China—a case study of cobalt[J]. Mining Research and Development, 40(12): 177-183(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Da-chao, WANG Yun-jia. 2003. Indicators of assessment for mineral resource security[J]. Geological Technoeconomic Management, 25(5): 20-24(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yi-ran. 2021. Research on the impact analysis of cobalt industry chain trade dependence network structure on trade price[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Ren-rui, TANG Jin-rong, ZHOU Ping, YANG Li-ya. 2016. Risk assessment of lithium resources supply in China[J]. China Mining Magazine, 25(12): 30-37(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Ping, TANG Jin-rong, ZHANG Tao. 2014. Supply and demand prospect of global lithium resources and some suggestions[J]. Geological Bulletin of China, 33(10): 1532-1538(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yan-jing, LI Jian-wu, WANG Gao-shang, MA Zhe. 2019. Analysis on import security of China's cobalt resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(5): 50-55(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yan-jing, LI Ying, LIU Qun-yi, ZHANG Yan-fei. 2014. Analysis of cobalt demand trends and brief supply in China[J]. China Mining Magazine, 23(12):16-19, 41(in Chinese with English abstract).