

引用格式: 朱永光, 张伍丰, 王迪, 等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1761-1777. [Zhu Y G, Zhang W F, Wang D, et al. Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1761-1777.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.05

# 中国铜资源产业链供应链韧性评价

朱永光<sup>1,2</sup>, 张伍丰<sup>1</sup>, 王迪<sup>1</sup>, 窦世权<sup>1,2</sup>, 徐德义<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430078; 2. 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心, 武汉 430078)

**摘要:**【目的】铜在新能源汽车、电力通讯等领域有着广泛的应用,是能源转型过程中无法替代的关键金属。中国是全球最大的铜消费国,其产业链供应链安全问题日益凸显,科学评价中国铜产业链供应链韧性具有重要意义。【方法】本文从韧性的抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力4个维度出发,结合铜资源产业的特性,构建了中国铜资源产业链供应链韧性综合评价指标体系。采用经独立性调整的熵权法对2000—2021年铜资源产业链供应链韧性进行了评价,并运用指标障碍度模型和指标贡献度模型找出影响产业链供应链韧性提升的主要因素。【结果】①2000—2021年,中国铜资源产业链供应链韧性呈现波动上升态势,2012年之后上升趋势更加迅速;②抵御能力不足是导致韧性提升较慢的主要因素,而更新能力与恢复能力提升是中国铜资源产业链供应链韧性提升的主要路径;③抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力的协调度波动上升且在2010年后促使产业链供应链韧性超过了平均水平。【结论】要继续提升更新能力与恢复能力水平,助力铜资源产学研一体化,加快科研成果转化;减少抵御能力的负面影响,甄别断链风险,加强评估预警,提高铜资源二次回收率;产业链、人才链等多链条全方位协作,为产业链供应链注入绿色动能。

**关键词:** 铜资源; 产业链供应链; 韧性; 指标障碍度; 协调度; 中国

DOI: 10.18402/resci.2023.09.05

## 1 引言

战略性矿产资源是国家或地区高新技术产业的关键原材料,对国家经济安全和社会发展具有重要作用<sup>[1]</sup>。金属铜是中国战略性矿产资源清单中的大宗矿产,因其本身良好的导热、导电以及延展性,被广泛应用于新能源汽车、航空航天、电力通讯等领域。党的十八大以来,国家高度关注能源资源和重点产业链供应链安全,注重提高产业链供应链稳定性、竞争力和自主可控能力,要着力提升产业链供应链韧性和安全水平,推动经济实现高质量发展。21世纪以来,中国对铜的需求大幅度增加,由原先的净出口国转变成全球最大的铜消费国。而

中国铜矿区分散,矿床规模较小,再加上品味偏低,伴生矿居多,导致生产和开发成本大而难以自给自足,对外依存度超过70%<sup>[2-4]</sup>。一方面铜的需求猛增,另一方面铜的供给却受到各方限制:受“新冠疫情”、地缘政治冲突等因素的影响,欧美等发达国家开始将高端制造业从中国撤回,“去中国化”和高新技术“卡脖子”等现象频发,增加了中国铜产业链供应链“断链”的风险。产业链供应链韧性作为产业链供应链安全的基础,在抓紧补短板锻长板,推动补链延链升链建链上不可忽视。

有关铜资源的研究主要集中在铜资源的供需形势与预测<sup>[5-9]</sup>、价格波动<sup>[10,11]</sup>以及铜物质流<sup>[4,12]</sup>和供

收稿日期: 2023-06-14 修订日期: 2023-08-17

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21&ZD106); 国家自然科学基金项目(72334001; 72204235); 四川矿产资源研究中心资助项目(SCKCZY2023-YB015)。

作者简介: 朱永光,男,河南封丘人,副教授,研究方向为矿产资源经济。E-mail: zhuyongguang@cug.edu.cn

通讯作者: 张伍丰,男,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为矿产资源经济。E-mail: zhangwufeng2021@163.com

应安全<sup>[13,14]</sup>等方面。中国和印度对于铜等矿产资源的需求随着工业化的发展快速上升,拉动了全球资源需求<sup>[5,6]</sup>。文博杰等<sup>[7]</sup>通过分析铜人均消费“S”型曲线的规律进行预测,发现中国铜在用存量的峰值将在2035年左右出现,达到约2.0亿t<sup>[8]</sup>。针对价格波动的影响,程慧等<sup>[9]</sup>和Su等<sup>[10]</sup>都对国际期铜价格波动中的金融因素进行了研究,发现金融因素对国际期铜价格波动的影响越来越显著。基于物质流的方法,王俊博等<sup>[4]</sup>发现中国铜资源报废量和社会蓄积量在未来会不断增加,再生铜会成为中国铜供给的主要来源。贾冯睿等<sup>[11]</sup>研究了中国铜资源的生态效率,发现在不同情景模拟下中国铜资源生态效率均处在良性发展阶段。徐德义等<sup>[12]</sup>通过构建战略性矿产资源产业链供应链安全评价指标体系,来识别现阶段中国存在的“断链”“短链”等风险。孙传尧等<sup>[13]</sup>通过分析中国铜的现状和需求以及国内外资源和二次资源对消费需求的保障力度,提出了铜的安全供应战略。Kang等<sup>[14]</sup>构建铜的多层网络风险传播模型模拟中国等国家的供应冲击对全产业链的影响和传播路径。

有关产业链供应链的研究主要集中在产业链供应链的界定与内涵上。部分学者研究发现产业链与供应链依靠价值链进行联系。产业链供应链则是通过价值、流程和时空进行融合发展得到的<sup>[15]</sup>。还有部分学者认为,价值链决定了产业链和供应链<sup>[16]</sup>。产业链和供应链都具有价值属性,前者创造了价值,而后者传递了价值<sup>[17]</sup>。产业链供应链是以价值创造为核心,不单是产业间或产业内的协同合作,而是由生产、流通、配送、消费等环节构成的复杂网络供应体系,该网络体系的底层逻辑是产品的生产与流通过程中的各个环节被片段化,这些片段通过价值链进行加工形成产品,使得价值链融入到了产业链与供应链中,为终端消费者实现了价值增值<sup>[18,19]</sup>。

有关韧性的研究主要集中在韧性的演化发展和测度上。韧性概念经历了工程韧性、生态韧性<sup>[20]</sup>与适应性韧性<sup>[21]</sup>的3个发展阶段,分别提出抵抗、吸收、恢复均衡、自组织思维和路径更新,内涵特征不断深化<sup>[22]</sup>。当韧性的概念被引入产业经济学领域后,研究重点集中在“产业链韧性”和“供应链韧性”等方面。周曙东等<sup>[23]</sup>认为产业链内部出现问题时,

系统仍能做出积极的回应,并在维持动态平衡后恢复正常运作的的能力叫做产业链韧性。陈晓东<sup>[24]</sup>等提出产业链韧性是指产业链应对内外部冲击的能力,即能够维持链条功能和结构稳定、预判断链的危机,并通过自身调整恢复至冲击前的状态或是实现链条升级的能力。关于韧性的测度研究成果集中在对于经济韧性或是产业韧性的度量,侧重于构建单一指标或者综合评价指标体系。如苏任刚等<sup>[25]</sup>和叶堂林等<sup>[26]</sup>均采用就业增长率来代表城市经济韧性。谭俊涛等<sup>[27]</sup>运用敏感指数和平均增长率研究了两次金融危机对中国区域经济韧性维持性和恢复性的影响。郝爱民等<sup>[28]</sup>从抵抗力、恢复力和再造力3个角度构建了农业韧性综合评价指标体系。王泽宇等<sup>[29]</sup>基于适应性理论,从抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力4个维度,构建了海洋船舶业综合指标体系。Martin<sup>[21]</sup>在适应性韧性框架下提出区域经济韧性。也有部分学者运用建模的方法对韧性进行测度。Nan等<sup>[30]</sup>针对特定的破坏性危害事件,提出了一种评估系统韧性的定量方法。

现有文献对于铜资源产业发展、供应安全以及产业韧性等研究的成果颇多,但对于铜资源产业链供应链韧性的研究较少。韧性评价是一个复杂的科学问题,目前还缺少对矿产资源产业链供应链韧性的定量评估。产业链供应链韧性是产业链供应链安全和现代化的基础条件,并且占据基础性、兜底性和决定性地位,对其进行测度有助于明晰中国铜产业链供应链韧性发展水平,以最可靠和最少的成本选择提高韧性的路径,提升产业链供应链韧性和安全水平。因此,本文的贡献在于,从矿产资源产业链供应链的角度出发,对铜资源产业链供应链韧性的概念进行界定,并采用一系列计量模型对其进行定量测度,进而评价中国铜资源产业链供应链韧性。综上所述,本文基于Martin的研究,结合产业链安全与现代化的特点,内嵌中国铜资源产业链全生命周期,分抵御能力、恢复能力、再组织能力以及更新能力4个维度构建铜资源产业链供应链韧性综合指标体系。依靠指标障碍度模型、指标贡献度模型以及耦合协调度模型,分析中国铜资源2000—2021年产业链供应链韧性的变化与影响因素,并提出相应的建议。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 分析框架

经济系统内部的产业、技术、制度的重新配置,企业创新能力的提升,投资或经济结构和劳动力的获取等都会对韧性产生影响。根据 Martin 的“适应性韧性”研究可知,当受到不确定性因素冲击时,铜资源产业链供应链韧性即铜资源上游供给和下游消费回收的抵御能力、恢复能力、再组织能力、更新能力。其中,抵御能力主要为在受到冲击后的反应深度,恢复能力主要为遭受冲击后恢复的速度与程度,再组织能力则是遭受冲击再定位与适应程度,更新能力则是恢复冲击前平衡状态或找到新的发展路径的能力。借鉴周娜等<sup>[31]</sup>、蔡乌赶等<sup>[32]</sup>、张虎等<sup>[33]</sup>、徐德义等<sup>[12]</sup>和李诗音等<sup>[34]</sup>的研究,用经济水平、政策环境和供给能力代表抵御能力,产业基础与配套代表恢复能力,产业合作、市场环境和循环持续代表再组织能力,创新投入与产出代表更新能力。中国铜

资源产业链供应链韧性的浮动受供需、价格及外部环境变化等的影响,具体可从矿产量占世界比重、对外依存度、价格波动性、环境风险和供给潜力等因素切入分析。因此,本文构建中国铜资源产业链供应链韧性分析框架,如图1所示。

### 2.2 指标体系

#### 2.2.1 指标选取

结合铜资源产业链部分环节以及产业链安全与现代化的特点选取相应的指标,构造如表1所示的涵盖10个二级指标和28个三级指标的中国铜资源产业链供应链韧性综合指标体系。具体指标选取依据如下:

(1)抵御能力。该能力是指应对破坏性事件的抵抗力,代表铜产业链供应链韧性的稳健性。产业链供应链在发展过程中,要依靠经济主体的经济实力应对外生冲击和风险挑战。因此本文选取了铜产业的总产值、利润总额和主营业务收入来衡量铜

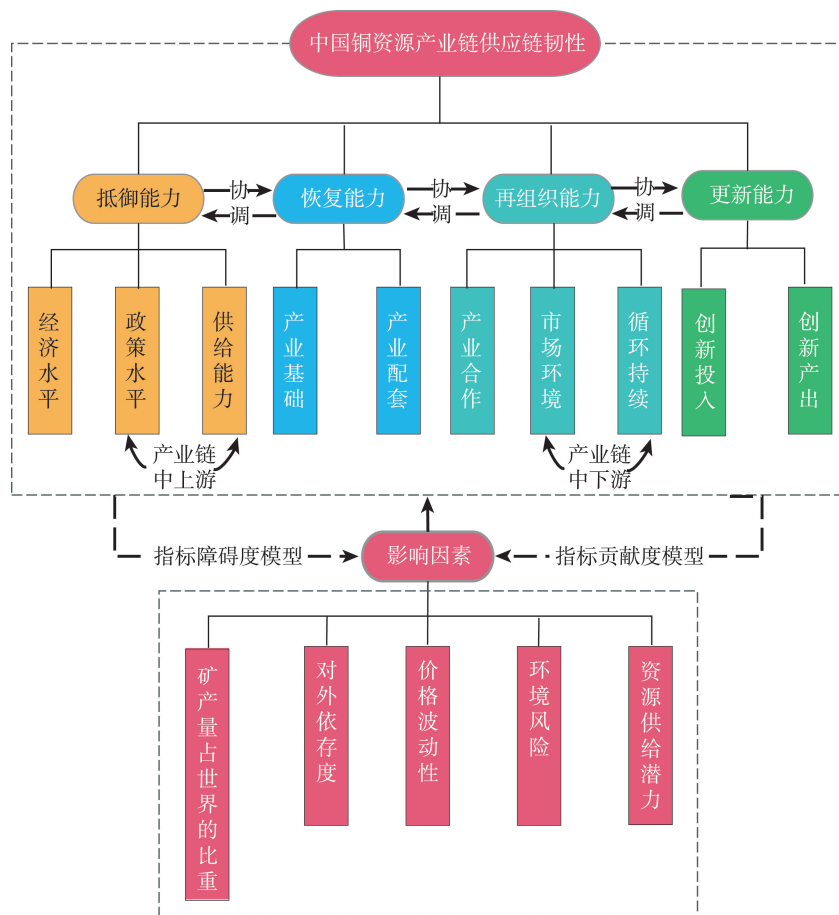


图1 中国铜资源产业链供应链韧性分析框架

Figure 1 A resilience analysis framework for China's copper resources industrial chain and supply chain



表1 中国铜资源产业链供应链韧性综合指标体系

Table 1 Comprehensive indicator system of resilience of China's copper resources industrial chain and supply chain

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性	指标权重
抵御能力 A1	经济水平 B1	铜产业总产值 C1/亿元	正	0.03
		铜产业利润 C2/亿元	正	0.03
		铜产业主营业务收入 C3/亿元	正	0.03
	政策环境 B2	矿业政策成熟度 C4	正	0.03
		环境风险 C5	正	0.05
	供给能力 B3	中国资源供给潜力 C6/%	正	0.06
		中国储量占世界的比重 C7/%	正	0.03
		中国铜矿产量占世界的比重 C8/%	正	0.10
		矿产供应多样性 C9	负	0.01
		价格波动性 C10/%	负	0.06
恢复能力 A2	产业基础 B4	铜产业企业数 C11/个	正	0.01
		铜产业资产总计 C12/亿元	正	0.03
		铜产业负债合计 C13/亿元	正	0.03
		铜产业年平均用工人数 C14/万人	正	0.01
	产业配套 B5	每百平方公里等级公路总里程 C15/(km/100 km <sup>2</sup> )	正	0.02
		每百平方公里铁路营业里程 C16/(km/100 km <sup>2</sup> )	正	0.02
再组织能力 A3	产业合作 B6	铜产业外资总额 C17/亿元	正	0.04
		有色金属工业外商企业数 C18/个	正	0.02
	市场环境 B7	精炼铜进出口总额 C19/亿元	正	0.02
		对外依存度 C20/%	负	0.07
	循环持续 B8	铜采矿综合能耗 C21/(kgce/t)	负	0.03
		铜选矿实际回收率 C22/%	正	0.03
		铜精炼回收率 C23/%	正	0.03
更新能力 A4	创新投入 B9	有色金属工业 R&D 人员全时当量 C24/(人年)	正	0.02
		有色金属工业研发经费(R&D) C25/亿元	正	0.05
		有色金属工业新产品开发经费支出 C26/万元	正	0.05
		有色金属工业研发项目数 C27/个	正	0.05
	创新产出 B10	有色金属工业专利申请数 C28/个	正	0.04

产业的经济水平。结合产业链供应链安全的重要性,选取了矿业政策成熟度、环境风险来评价铜产业面临的政策环境<sup>[12]</sup>。政策环境越好,说明铜产业的政策监管力度强,由于盗窃等事件导致供应中断的情况越少,从而说明其产业链供应链韧性越强;国内资源供给潜力、国内储量占世界的比重、国内铜矿产量占世界的比重和矿产供应多样性和价格波动性衡量铜产业的供应能力<sup>[31]</sup>。

(2)恢复能力。该能力是指在破坏性事件后恢复其中断前状态的能力。产业链韧性是从产业投入产出角度评判是否有断链的风险,供应链韧性是基于企业视角。要恢复受到冲击后的经济主体,需要将产业链与供应链相融合,刺激市场主体发挥经

济潜力。选取的指标有产业基础和产业配套。产业基础包括铜产业企业数、资产总计、负债合计以及年平均用工人数<sup>[32]</sup>。产业配套包括每百平方公里公路和铁路的营业里程,衡量产业链供应链在面临冲击时,上下游传统基建的流通能力<sup>[33]</sup>。铜资源产业基础好、配套齐全,才能更快使铜资源产业链供应链韧性恢复到均衡稳定态势<sup>[32]</sup>。

(3)再组织能力。该能力体现的是产业链供应链在受到冲击恢复新的均衡后,企业能够发挥自主可控能力,寻找新的契机,重新对内部构造和功能进行调整。选取的指标有产业合作、市场环境和循环持续。产业合作主要包括铜产业外资总额和有色金属工业外商企业数<sup>[35]</sup>。铜作为有色金属中非常

2023年9月

重要的战略性资源,在中国有色金属材料的消费中占较大比重。且从有色金属国际贸易的交易量数据看,铜的交易量较大。因此,可以用有色金属工业外商企业数据进行衡量。在双边贸易中,中国铜资源对国外资源供给的高度依赖会增加其暴露在风险中的程度,导致市场环境处于相对脆弱状态,继而影响相关企业的转型。市场环境包括精炼铜进出口总额和对外依存度<sup>[12]</sup>,且对外依存度对再组织能力是负向影响。铜产业循环持续发展的能力选择铜产业采选、冶炼环境的能耗与回收率来衡量。

(4)更新能力。科学技术是第一生产力,要想产业链供应链能够在调整中获得提升链条等级的跃迁机会,取得进一步的发展,就少不了学习和创新能力。因此选取了创新投入和创新产出两个指标。创新投入主要包括有色金属工业研发人员当量、研发经费投资、新产品开发经费支出以及研发项目数量的情况,创新产出则选择有色金属工业专利申请数量<sup>[34]</sup>。

### 2.2.2 指标计算

(1)矿业政策成熟度。采用Franser Institute发布的矿业政策洞察力指数(Policy Perception Index, PPI)来衡量矿产资源在全球资源开发中的监管风险<sup>[35]</sup>。计算公式如下:

$$C4 = \sum PPI_k \times \frac{P_i}{P} \quad (1)$$

式中: $k$ 表示矿产资源出口国,本文选取铜产量排名前三的国家作为参考; $i$ 表示铜资源国; $PPI_k$ 表示铜资源国 $k$ 的矿业政策洞察力指数; $P_i$ 表示铜资源国 $i$ 的铜产量; $P$ 表示全球的铜产量。

(2)环境风险。采用耶鲁大学发布的环境绩效指数(Environmental Performance Index, EPI)<sup>[36]</sup>衡量,计算公式如下:

$$C5 = \sum EPI_i \times \frac{P_i}{P} \quad (2)$$

式中: $EPI_i$ 表示铜资源国环境绩效指数,其值越大表明资源国环境状况越好,所以 $C5$ 的值越大说明铜的供应风险越低。

(3)中国资源供应潜力。采用储采比来衡量,该指标传达了由于地质上矿物资源的稀缺性以及市场需求造成的供应风险,也就是资源的耗竭程度<sup>[31]</sup>。

计算公式如下:

$$C6 = \frac{R_c}{P_c} \quad (3)$$

式中: $c$ 表示中国, $R_c$ 表示中国铜储量; $P_c$ 表示中国的铜产量。

(4)矿产供应多样性。本文采用全球供应集中度来衡量铜产业的供应多样性,借助芬达尔-希尔曼指数(Herfindahl-Hirschman Index, HHI)<sup>[37]</sup>来表示,计算公式如下:

$$C9 = \sum \left( \frac{P_k}{P} \right)^2 \quad (4)$$

本文选取铜产量排名前三的国家进行计算,该结果值越大说明铜产业的市场集中度越高,垄断程度也越高。

(5)价格波动性。由于受到天灾和人为等不可抗力因素而导致矿产资源的供需和生产受阻,进而引起价格波动,对矿产资源的供应能力产生影响。本文采取中国铜的年平均价格的变化来衡量<sup>[12]</sup>,计算公式如下:

$$C10 = \frac{F_t - F_{t-1}}{F_{t-1}} \quad (5)$$

式中: $F_t$ 表示国内市场第 $t$ 年铜价格; $F_{t-1}$ 为其上一年价格,若为负值说明上一年价格高于本年的价格,本文为衡量价格的波动变化,则取其绝对值。

(6)矿产对外依存度。以精炼铜的净进口量比上精炼铜的表观消费量来表示,计算公式如下:

$$N = I - E \quad (6)$$

$$AC = P_c + N \quad (7)$$

$$C20 = \frac{N}{AC} \quad (8)$$

式中: $N$ 表示精炼铜的净进口量; $I$ 表示精炼铜进口量; $E$ 表示精炼铜出口量; $AC$ 表示精炼铜的表观消费量。

## 2.3 评价方法

### 2.3.1 经独立性调整的熵权法

对指标赋予权重的方法有许多,本文采用熵权法与独立性权数相结合的方法来确定各个指标的权重,其中熵权法可以排除主观性因素,反映指标间的变异程度。指标的变异程度越大,赋权就越高,反之亦然。而独立性权数则可以处理指标间的重复性信息,避免其对综合评价的影响,本文采用

均值化法对基础数据进行标准化处理。首先是运用熵权法构建信息量权,假设研究对象有  $m$  个时间样本单位,  $n$  个评价指标,方法步骤如下<sup>[38]</sup>:

(1)原始数据标准化。

$$z_{tj} = \frac{x_{tj}}{\bar{x}_j}, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m x_{tj} \quad (9)$$

( $t=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ )

式中:  $z_{tj}$  表示第  $t$  年第  $j$  个评价指标标准化后的值;  $x_{tj}$  表示第  $t$  年第  $j$  个评价指标的值;  $\bar{x}_j$  表示第  $j$  个评价指标的均值。

(2)计算熵值。计算公式如下:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{t=1}^m f_{tj} \ln f_{tj} \quad (10)$$

式中:  $e_j$  表示熵值;  $f_{tj}$  表示第  $t$  年对应第  $j$  个评价指标时的特征比重;  $f_{tj} = \frac{z_{tj}}{\sum_{t=1}^m z_{tj}}$ 。

(3)确定权重。第  $j$  个指标的权重计算公式如下:

$$w_{1j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (11)$$

$$0 \leq w_{1j} \leq 1, \sum_{j=1}^n w_{1j} = 1 \quad (12)$$

式中:  $1 - e_j$  表示第  $j$  个评价指标的差异系数。

(4)采用相关系数矩阵构建独立性权数  $R^{[39]}$ :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & r_{2n} \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

矩阵中相关系数  $r$  若为负值就用 0 来代替,再将矩阵按列求和,得到行向量:

$$\left( \sum_{t=1}^n r_{t1}, \sum_{t=1}^n r_{t2}, \cdots, \sum_{t=1}^n r_{tn} \right) \quad (14)$$

式(14)表达综合指标体系中的信息重复情况,  $\sum_{t=1}^n r_{tj} (j=1, 2, \dots, n)$  的值越大,说明对应的指标与其他指标间的信息重复度越高,作用就越小,赋权就越低,将上述行向量取倒数后做归一化处理,即可获得第二部分的指标权重向量,其中第  $j$  个指标的权重计算公式如下:

$$w_{2j} = \frac{\left( \sum_{t=1}^n r_{tj} \right)^{-1}}{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{t=1}^n r_{tj} \right)^{-1}} \quad (15)$$

(5)计算信息熵权经独立性调整后的组合权重,公式如下:

$$w_j = \alpha w_{1j} + \beta w_{2j} \quad (16)$$

式中:  $\alpha + \beta = 1$ , 取  $\alpha = \beta = 0.5$ , 采用线性加权得到中国铜资源产业链供应链韧性综合指数  $V$ :

$$V = \sum_{j=1}^n w_j z_{tj}, \quad t=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

### 2.3.2 影响因素模型

为明确不同发展阶段铜产业链供应链韧性的影响因素,本文构建指标障碍度模型和指标贡献度模型。通过构建这两个模型,探究不同韧性发展阶段各指标对铜产业链供应链韧性的影响值的变化,本质上是通过正反两个角度找出影响铜产业链供应链韧性的主要因素。

#### (1)指标障碍度模型

由于对中国铜资源产业链供应链韧性的测算系统性研究,其在所选取的研究区间内有很大的变化,找到不同发展阶段阻碍或制约韧性提升的影响因素对于进行相应的对策分析尤为重要。因此本文借鉴栗欣如等<sup>[40]</sup>的指标障碍度测算方法,承接上文的指标权数构建结果,通过构建指标障碍度模型,研究各指标未达到韧性平均水平时,不同阶段影响中国铜资源产业链供应链韧性的主要因素,其计算公式如下:

$$H_{gt} = \begin{cases} 1 - V_{gt} & V_{gt} \leq 1 \\ 0 & V_{gt} > 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$Q_{gt} = \frac{w_p H_{gt}}{\sum_{t=1}^n w_p H_{gt}} \times 100\%; \quad p=1, 2, \dots, m \quad (19)$$

式中:  $V_{gt}$  表示第  $g$  个指标第  $t$  年的韧性得分;  $H_{gt}$  表示第  $t$  年指标  $V_{gt}$  综合得分偏离韧性均值的程度,即指标偏离度,计算三级指标障碍度时,  $g$  分别为 28 个三级指标;  $Q_{gt}$  为指标障碍度,其值越大,表明对中国铜资源产业链供应链韧性提升的抑制作用越大;  $w_p$  为各三级指标的权重。在计算一级指标障碍度

2023年9月

时,采用同样的方法,一级指标权重和得分由三级指标权重和得分加总得到。

### (2) 指标贡献度模型

为研究抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力对于中国铜资源产业链供应链韧性的贡献度,衡量4个子系统的变动对于韧性的影响大小,本文借鉴杨耀武等<sup>[41]</sup>的研究,利用几何平均法,计算公式如下:

$$V = \sqrt[4]{v_{A1t} \times v_{A2t} \times v_{A3t} \times v_{A4t}} \quad (20)$$

式中:  $V$  表示中国铜资源产业链供应链韧性的综合指数;  $v_{A1}$ 、 $v_{A2}$ 、 $v_{A3}$  和  $v_{A4}$  分别代表各一级指标的指数。

对上式两边同取对数得到:

$$\ln V = \frac{1}{4} [\ln v_{A1t} + \ln v_{A2t} + \ln v_{A3t} + \ln v_{A4t}] \quad (21)$$

然后,对上式两边求微分,在4个一级指标的得分变化不大的情况下,中国铜资源产业链供应链韧性的变化量可以近似表示为:

$$\Delta V_t \approx \frac{1}{4} \left[ \frac{\bar{V}_t}{v_{A1t}} \Delta v_{A1t} + \frac{\bar{V}_t}{v_{A2t}} \Delta v_{A2t} + \frac{\bar{V}_t}{v_{A3t}} \Delta v_{A3t} + \frac{\bar{V}_t}{v_{A4t}} \Delta v_{A4t} \right] \quad (22)$$

式中:  $\bar{V}_t$  表示韧性综合指数在各个时间段的平均值;  $\bar{v}_{A1t}$ 、 $\bar{v}_{A2t}$ 、 $\bar{v}_{A3t}$  和  $\bar{v}_{A4t}$  表示各一级指标在各个时间段的平均值;  $\Delta V_t$ 、 $\Delta v_{A1t}$ 、 $\Delta v_{A2t}$ 、 $\Delta v_{A3t}$  和  $\Delta v_{A4t}$  表示对应指标的各个时间段内的变化量。

### 2.3.3 耦合协调度模型

根据 Martin<sup>[21]</sup>、Ahmadi 等<sup>[42]</sup>和张秀艳等<sup>[43]</sup>的研究可知,铜产业链供应链韧性是系统适应性演化的过程,可通过其性质之间相互作用、自我调节,实现动态演化。该系统是高度复杂性、相互关联的链式系统,其诸性质之间相互促进相互制约,彼此耦合。借鉴翁钢民等<sup>[44]</sup>的研究方法,本文建立了抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力4个一级指标的协调度模型(式(23)),该模型可真实反馈两个及以上系统互动产生的耦合关系和协同效应,能评价系统自身发展程度以及适应性互动关系。其目的是为了反映抵御能力、恢复能力、再组织能力和

更新能力的整体综合协调值,进一步说明铜产业链供应链韧性的总体发展水平。这4个维度之间应具有较高的同步性,相互耦合发展,这对提升铜产业链供应链韧性的可持续发展有很重要的意义。

$$D = \left[ \frac{V_{A1} \times V_{A2} \times V_{A3} \times V_{A4}}{\left[ \frac{V_{A1} + V_{A2} + V_{A3} + V_{A4}}{4} \right]^4} \right]^u \quad (23)$$

式中:  $D$  表示系统的协调度;  $u$  为调节系数,这里取  $u=1$ 。  $D$  数值越大协调程度越高,反之亦然。虽然协调度是衡量系统不同要素之间相互影响程度的重要指标,但是由于系统或要素之间的不平衡以及相互交错等特性,协调度模型很难全面的反映系统或者要素间的协同效应或整体效益,因此引入协调发展度模型,来反映抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力之间的综合协调能力,公式如下:

$$E = \sqrt{D \times T}, T = \lambda_1 A1 + \lambda_2 A2 + \lambda_3 A3 + \lambda_4 A4 \quad (24)$$

式中:  $E$  为协调发展度;  $T$  为4个一级指标的线性综合发展指数,  $\lambda_1 - \lambda_4$  为调节系数,因为4个一级指标对于中国铜资源产业链供应链韧性同等重要,所以取  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0.25$ ,协调发展度等级划分见表2<sup>[45]</sup>。

### 2.4 数据来源

本文基于2000—2021年的相关数据进行研究。其中中国(未包含港澳台地区)铜储量和全球铜储量、产铜国铜产量和全球铜产量均来自美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS),中国精炼铜的进出口量和产量来自联合国贸易数据库(UN Comtrade Database)和《中国有色金属工业年鉴》,中国铜的年平均价格来自Wind数据库,铜产业的相关指标因统计口径发生变化,2012年前的数据缺失。因此,本文借鉴易明等<sup>[46]</sup>的研究,假设铜采选行业与铜加工行业在有色金属矿采选业和有色金属冶炼和压延加工业的相关数据占比短期不变,在求得2013—2021年的占比后,将均值作为缺

表2 协调发展度等级划分

Table 2 Coordinated development degree classification

等级	优质协调	良好协调	中级协调	初级协调	勉强协调	濒临失调	失调
协调发展度	0.90~1.00	0.80~0.89	0.70~0.79	0.60~0.69	0.50~0.59	0.40~0.49	0.00~0.39



失年份中的实际占比进行计算,得到了2012年以前铜产业总产值、利润、资产总计等数据。更新能力的数据库鉴于数据可获得性选取了有色金属矿采选业和有色金属冶炼和压延加工业,即有色金属工业的相关数据代替。剩余指标的数据来自《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国工业统计年鉴》和国家统计局,对部分缺失数据采用插值法进行处理。

### 3 结果与分析

#### 3.1 中国铜资源产业链供应链韧性综合评价

由图2可知,中国铜资源产业链供应链韧性处在波动上升阶段,韧性综合指数在0.689~1.455之间,年均增长速度为5.29%,中国铜资源产业韧性在不断增强。因为在对基础数据去除量纲和量级时采用的是均值法,所以数值1代表了2000—2021年铜资源产业链供应链韧性的平均水平,可以发现2011年后,中国铜资源产业链供应链韧性已经超过平均水平。结合图中韧性增长率与外生冲击时间点将发展过程进行如下4段:

第一阶段,蓄力期:2000—2004年,呈现波动上升后下降的态势。2000年后,中国航空航天等生产制造产业发展迅猛,铜消费和需求增加<sup>[8]</sup>,推动韧性

提升。2001年,中国加入世界贸易组织,全面开启多边贸易,国外铜产业涌入中国市场,引起国内铜产业市场缩水。再加上2003年中国SARS疫情爆发,导致国内消费市场萎缩,对国内铜需求造成了冲击。当年疫情对轻工纺织业和电子等行业影响较大<sup>[47]</sup>,对工业生产的影响有限,所以韧性在2003年后有了小幅度下降。

第二阶段,转型期:2004—2010年,呈现先快速上升后急速下降又缓慢上升的态势。韧性年平均增长率为7.75%,高于研究期内平均水平。这一阶段,铜产业发展迅速,中国铜资源储量增加了15.38%,铜矿石开采量增加了一倍左右,2010年精炼铜产量是2003年的2.06倍,铜的年均价格也在攀升。但2008年国际金融危机让中国285座城市的经济韧性都遭受到了不同程度的打击,城市治理问题面临了不小挑战。2009年希腊债务危机让欧盟向其他出口国的出口需求下降,影响了国内铜产业的加工和消费以及进出口贸易。铜价由2008年上半年的8698美元/t到年底跌至3041美元/t,短时间内降幅65.04%,产生剧烈波动。铜价格的剧烈波动影响了中国铜资源产业链供应链韧性的提升。伴随着2008年中国推出的大规模经济刺激计划,中国

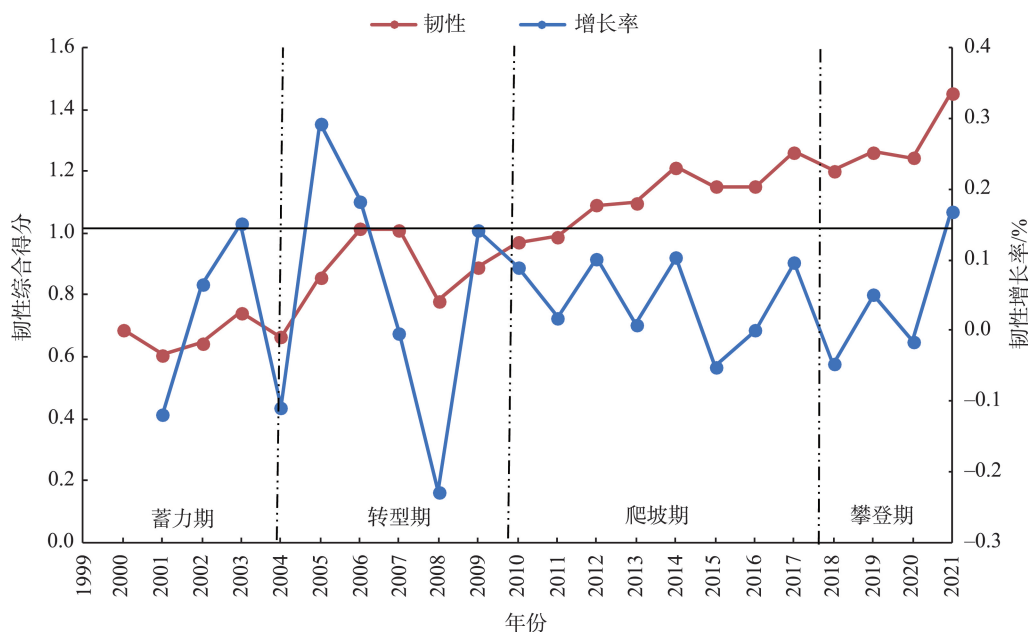


图2 2000—2021年中国铜资源产业链供应链韧性综合指数和增长率发展趋势

Figure 2 China's copper resources industrial chain and supply chain resilience composite index and trends of growth rate, 2000-2021



2023年9月

铜资源产业链供应链韧性出现了缓慢爬升的态势。

第三阶段,爬坡期:2010—2018年,呈现波动增长然后小幅度下降态势。2010年底投资四万亿计划,是国家为缓解经济危机负面影响的“强心针”,在一定时间内促进了各个行业经济增长,铜产业链供应链韧性开始缓慢提升,并于2012年突破均值。但2012—2016年采矿业开始进入“寒冬期”,全球矿业市场都处境艰难,中国及全球的资源勘探经费都在以两位数的速度递减,铜产业也受到了波及。同一时期的资源税改革,将绝大多数矿产品由从量计征改为从价计征,再加上国内供给侧结构性改革和产业结构调整对铜等大宗商品的价格造成冲击,铜资源产业链供应链韧性提升逐渐波动放缓。2018年启动的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》使得环境规制更加严格,铜矿企业一方面增加投资,购买净化设备,或是进行绿色技术创新,优化产业结构,降低污染排放<sup>[48]</sup>。部分规模较小企业因成本提升倒闭,产业链供应链韧性发展受阻转为下降态势。

第四阶段,攀登期:2018—2021年,呈现波动上升的态势。绝大部分铜矿企业经历产业结构升级,企业核心竞争力提升,推动了整个行业的绿色发展。但2020年末新冠疫情席卷全球,各个行业都遭

受了严重的损失甚至面临停摆,大宗商品的价格呈现了“V”型走势。中国国际电子商务中心发布的消息显示,2020年12月中国大宗商品价格涨至制高点,其中铜的价格持续上涨,环比上涨9.30%。主要原因是产业链下游需求上升,且受疫情影响全球铜的供应减少,供应缺口加大,铜库存也明显下降。不过在供给侧结构性短缺、疫情逐渐控制以及经济回暖等因素影响下,中国铜资源产业链供应链韧性并未受到严重影响,而是在逐步爬升。

### 3.2 中国铜资源产业链供应链韧性分指数分析

由图3可以看到,铜资源产业链供应链韧性的抵御能力与再组织能力的波动性较大,恢复能力与更新能力都处在不断上升的态势。2008年前,铜资源产业链供应链的抵御能力与再组织能力远高于恢复能力和更新能力。随后,开始出现下降的趋势,而更新能力在2010年开始大幅度提升,并在2018年超过抵御能力与再组织能力。原因主要是:在经历2008年和2009年两次经济危机后,国际上进出口贸易遭受冲击、铜价格的波动以及资源国矿产资源政策的收紧,国内铜资源供应风险的提高、铜产业收益下降以及外资的减少,都沉重打击了产业链供应链的抵御能力和再组织能力。而2010年

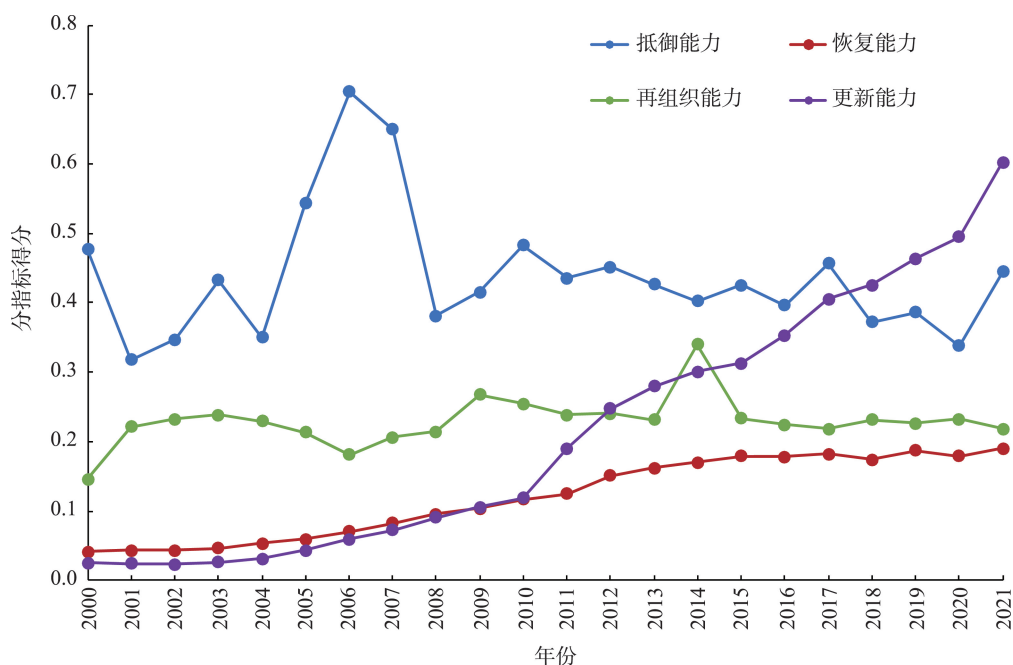


图3 2000—2021年中国铜资源产业链供应链韧性分指数发展趋势

Figure 3 China's copper resources industrial chain and supply chain resilience sub-index development trend, 2000-2021

的国家资金扶持,对中国传统基础建设和科研投入都给予了强有力的支持,激发了创新活力。并且在2020年疫情的影响下,更新能力以21.80%的增长率持续发力,并且带动抵御能力以31.48%的高增长率开始爬升。

本文选取了2000年、2005年、2010年、2015年和2020年5年的中国铜资源产业链供应链韧性分指数数据,绘制成雷达图。如图4所示,4个分指数逐渐增加,说明中国铜资源产业链供应链韧性的内涵在不断丰富。从2000年更新能力与恢复能力占比很小,到2010年更新能力和恢复能力占比开始增加,再到2015年更新能力的重要性已经开始凸显,2020年抵御能力、恢复能力、再组织能力与更新能力都占有了一定比例,在遭受外生冲击时,有较为成熟的系统来分散冲击力度,降低断链的风险,增加了补链并延长产业链供应链的能力,说明铜资源产业链供应链正在发生实质性改变。

### 3.3 中国铜资源产业链供应链韧性影响因素分析

#### 3.3.1 指标障碍度模型结果分析

为探明抑制中国铜资源产业链供应链韧性提升的主要原因,采用指标障碍度模型,对抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力在研究区间内的

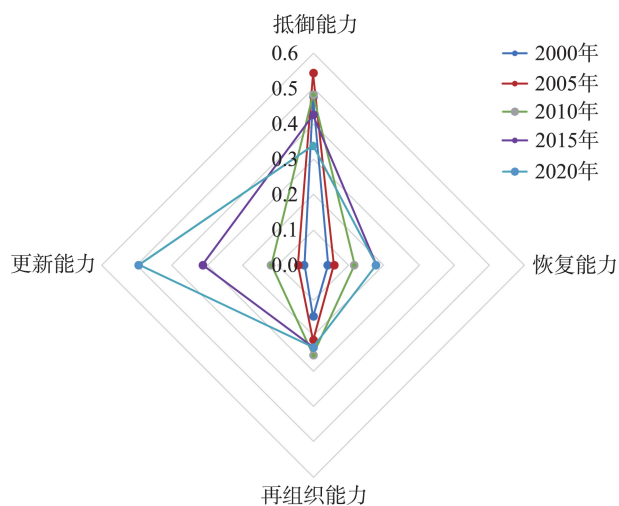


图4 2000—2021年中国铜资源产业链供应链韧性演化雷达图

Figure 4 Radar chart of resilience evolution of China's copper resources industrial chain and supply chain, 2000-2021

障碍程度进行研究。

从图5中可以看到,2010年前,再组织能力与更新能力障碍度的发展趋势相似,且更新能力障碍度大于再组织能力障碍度,抵御能力障碍度相对于再组织能力和更新能力障碍度呈现了“此消彼长”的态势。2008年后,更新能力障碍度开始下降,到

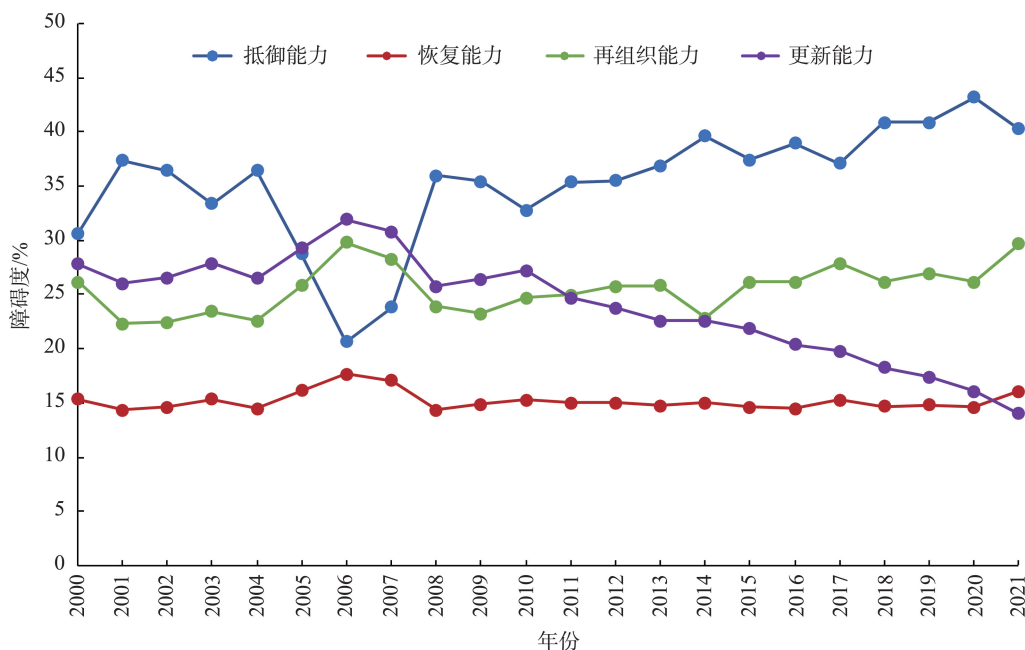


图5 2000—2021年分指标对总韧性的障碍度发展趋势

Figure 5 Barrier degree of sub-indices to total resilience, 2000-2021

2023年9月

2011年后与再组织能力障碍度呈现“此消彼长”态势。

说明整体来看,抵御能力一直是制约中国铜资源产业链供应链韧性发展的主要因素。中国早已由铜净出口大国转变消费和进口大国,铜资源的供应风险与日俱增,无法实现自给自足的困境使得其对外依存度已经超过80%<sup>[49]</sup>,传统的矿产资源安全强调自给,而新时代下其被赋予了更深刻和全面的内涵,即包括经济安全、环境安全、国防安全和代际资源安全在内的综合安全观,是凸显人类命运共同体的共同安全观<sup>[50]</sup>。

具体分析,表3是研究区间内,三级指标障碍度排名前5的障碍指标,其中铜矿产量占世界的比重(22次)、对外依存度(22次)、价格波动性(22次)、国内资源供给潜力(18次)、环境风险(11次)、有色金属工业新产品开发经费支出(5次)、有色金属工业研发项目数(6次)。将研究区间分为两个阶段。第

一个阶段:2000—2010年,制约中国铜资源产业链供应链韧性发展的指标在铜资源供给潜力、国内铜矿占世界的比重、铜价格波动性、对外依存度以及新产品开发经费和研发项目这6个里面循环出现。第二个阶段:2011—2021年,制约韧性发展的指标一直都是铜矿产量占世界的比重、对外依存度、铜价格波动性、国内资源供给潜力和环境风险。2010年国家4万亿资金到位后,意识到解决“卡脖子”问题,提升自主创新能力,才能在世界舞台上掌握话语权的重要性,因此对于创新投入的力度不断加大,提升了产业链供应链的更新能力。而新增加的环境风险指标说明,以美国为代表的西方国家在世界贸易中的去中国化、地区垄断经济集团的出现以及高端制造业“回流”本土等加剧了地缘政治风险,影响了铜资源市场的公平秩序,制约了中国铜资源产业链供应链韧性的提升,也同样证实了抵御能力的不足一直制约着韧性的发展。

表3 三级指标障碍度

Table 3 Barrier degree of the third-level indicators

年份	障碍指标1 (障碍度)	障碍指标2 (障碍度)	障碍指标3 (障碍度)	障碍指标4 (障碍度)	障碍指标5 (障碍度)
2000	C8(9.76)	C20(7.15)	C6(5.45)	C27(5.38)	C26(5.31)
2001	C8(9.72)	C20(6.59)	C10(6.30)	C27(5.35)	C26(5.28)
2002	C8(9.75)	C20(6.50)	C10(6.02)	C27(5.37)	C26(5.30)
2003	C8(9.79)	C20(6.53)	C10(5.53)	C27(5.39)	C26(5.32)
2004	C8(9.75)	C20(6.63)	C10(6.08)	C27(5.35)	C26(5.27)
2005	C20(6.85)	C8(6.69)	C10(6.44)	C6(6.00)	C27(5.47)
2006	C20(7.16)	C8(6.15)	C6(6.07)	C10(5.98)	C27(5.50)
2007	C20(6.95)	C10(6.58)	C6(6.07)	C8(5.96)	C27(5.48)
2008	C8(9.65)	C20(6.76)	C10(6.12)	C6(5.44)	C27(5.29)
2009	C8(9.73)	C20(6.52)	C10(5.91)	C6(5.48)	C27(5.30)
2010	C8(9.66)	C20(6.62)	C10(5.63)	C6(5.60)	C27(5.28)
2011	C8(9.61)	C20(6.70)	C10(6.08)	C6(5.63)	C5(5.28)
2012	C8(9.55)	C20(6.72)	C10(6.10)	C6(5.73)	C5(5.30)
2013	C8(9.60)	C20(6.79)	C10(6.23)	C6(5.72)	C5(5.31)
2014	C8(9.59)	C20(6.82)	C10(6.50)	C6(5.77)	C5(5.28)
2015	C8(9.61)	C20(6.81)	C10(6.23)	C6(5.75)	C5(5.28)
2016	C8(9.57)	C20(6.85)	C10(6.51)	C6(5.79)	C5(5.20)
2017	C8(9.70)	C20(6.94)	C10(6.10)	C6(5.81)	C5(5.23)
2018	C8(9.72)	C20(6.86)	C10(6.38)	C6(5.78)	C5(5.30)
2019	C8(9.71)	C20(6.93)	C10(6.37)	C6(5.81)	C5(5.31)
2020	C8(9.69)	C20(6.88)	C10(6.56)	C6(5.81)	C5(5.36)
2021	C8(9.75)	C20(7.01)	C10(6.19)	C6(5.90)	C5(5.42)



### 3.3.2 分阶段指标贡献度分析

从相反的角度出发,运用指标贡献度模型分阶段计算4个一级指标对于产业链供应链韧性的贡献能力,分析各个阶段推动韧性提升的主要因素。由表4可知,在研究区间内,铜资源产业链供应链韧性的恢复能力与更新能力的贡献度一直为正,并且在各个阶段中更新能力贡献量占比的绝对值是最大的,恢复能力贡献量占比的绝对值在逐渐减小。而抵御能力贡献量的数值在正负之间交替,波动性很大,再组织能力的贡献度持续减小为负值。更新能力随着时间的变化,影响力越来越强。恢复能力虽然也在推动韧性提升,但是贡献量越来越小,在2020年后,恢复能力障碍度有所提升(图5)。

分阶段来看,2000—2004年,加入世界贸易组织打开了世界市场的大门,中国铜产业市场缩水,收入降低。国外先进的技术与垄断的产业环境使得中国铜产业链供应链韧性的抵御能力一再受挫,贡献率为负值。而外商投资的进入以及多边贸易对精炼铜进出口的增加,也使得再组织能力有了提升。更新能力与恢复能力的发展在这个阶段一直处于缓慢上升阶段,波动很小且贡献率没有过半(表4)。2004—2010年,4个指标的贡献度逐渐趋于合理化。铜产业的生产规模不断壮大,传统基建的

飞速发展,科研投入的增加都使得恢复能力与更新能力不断提升。期间,国际先后发生了两次金融危机,进出口贸易受阻,铜的价格也受到了冲击,对抵御能力和再组织能力产生了负面影响,但是恢复能力与更新能力凭借不俗的贡献率,缓解了产业链供应链韧性的断链风险。

2010—2018年,更新能力贡献度最大,从2010年起更新能力上升速度越来越快,已经成为推动韧性发展的引擎(表4)。恢复能力贡献率基本没变,但抵御能力和再组织能力的贡献率却变为了负值。主要还是经历了全球性的采矿业寒冬以及资源税改革和环境规制收紧,铜产业企业的生产规模以及利润收入等方面都受到了不同程度的影响。2018—2021年,因受到新冠疫情的影响,恢复能力、再组织能力和更新能力都遭受了打击,恢复能力贡献量减少了近七成,更新能力贡献量减少了60.29%。各行各业都面临着停摆,各国为了抑制疫情蔓延都对进出口和对外投资作出了限制,国际环境受限。但是抵御能力却从上个阶段的负值直接逆转贡献了32.64%的力量,在经历20多年的发展后,中国铜产业的发展规模已经渐渐开始向成熟转变,抵御外生冲击风险的能力有所提升,再加上更新能力的不断强化,中国铜资源产业链供应链韧性

表4 2000—2021年分阶段的各方面指标对中国铜资源产业链供应链韧性提升的贡献

Table 4 Contribution of various sub-indices to the resilience improvement of China's copper resources industrial chain and supply chain by stage, 2000-2021

	分阶段各方面指标变动的贡献量			
	2000—2004年	2004—2010年	2010—2018年	2018—2021年
抵御能力	-0.01	0.01	-0.02	0.01
恢复能力	0.01	0.03	0.02	0.01
再组织能力	0.01	0.00	-0.01	-0.00
更新能力	0.01	0.05	0.07	0.03
合计	0.01	0.09	0.07	0.04
韧性实际变化量	0.01	0.10	0.08	0.04
偏差/%	-7.14	-4.17	-13.92	0.00
	分阶段各方面指标变动的贡献率/%			
	2000—2004年	2004—2010年	2010—2018年	2018—2021年
抵御能力	-62.51	11.32	-24.53	32.64
恢复能力	46.54	33.19	33.73	15.52
再组织能力	74.95	4.77	-8.69	-10.37
更新能力	41.02	50.72	99.49	62.21
合计	100.00	100.00	100.00	100.00

2023年9月

也得到了很好的巩固。

### 3.4 耦合协调度分析

由公式(24)计算得到的2000—2021年铜资源产业链供应链抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力4个一级指标的耦合协调度(图6)。从图6可看到,抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力的耦合协调度一直在波动增加,2015年后开始趋于平缓状态。且由表2中的等级划分可得出,整个研究区间内,4个一级指标的协调能力在2000—2010年处于失调状态,2011—2021年处于濒临协调状态。且在2008年和2009年两次国际经济危机的冲击下,4个一级指标的协调度仍坚挺的向上攀升,再加上更新能力在2010年开始爆发性增长,说明在2010年后,中国铜资源产业链供应链韧性在4种能力的协同作用下,依据适应性理论,在达到新的平稳状态后,通过重构内部组织和功能,不断学习和创新,找到新的路径使产业链供应链能力优化,让整个铜资源产业链供应链由失调状态初入协调状态,增强了韧性,使得中国铜资源产业链供应链韧性综合指数在2011年后超过了平均水平,而耦合协调度在2015年后发展趋于变缓,处在蓄力阶段。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本文从抵御能力、恢复能力、再组织能力和更

新能力4个维度,构建了中国铜资源产业链供应链韧性综合评价指标体系,采用经独立性调整的熵权法对2000—2021年铜资源产业链供应链韧性进行了评价,并运用指标障碍度模型和指标贡献度模型找出影响产业链供应链韧性提升的主要因素。主要结论如下:

(1)中国铜资源产业链供应链韧性在研究期内整体处于波动上升态势,在2011年后已经超过平均水平,且中国铜资源产业链供应链韧性经历蓄力期、转型期、爬坡期以及攀登期之后,铜资源产业链供应链韧性4种能力的占比趋于合理化。这也进一步说明现阶段中国铜资源产业链供应链逐渐形成较为成熟的韧性系统,能在遭受不确定性冲击时降低断链风险,保障中国铜资源产业链供应链安全。

(2)铜资源产业链供应链韧性的抵御能力不足是制约韧性提升的主要因素,具体受到铜矿产量占世界的比重、对外依存度、价格波动性、国内资源供给潜力、环境风险等影响。相较于传统的矿产资源安全强调自给,这些影响因素跳出传统单一的安全评价思路,体现了产业链供应链安全和现代化。

(3)铜资源产业链供应链的恢复能力与更新能力是提高韧性水平的主要动力,铜产业的产业基础不断夯实、产业配套的日益完善再加上创新投入的强有力支持 and 创新产出持续落地转化都对韧性的

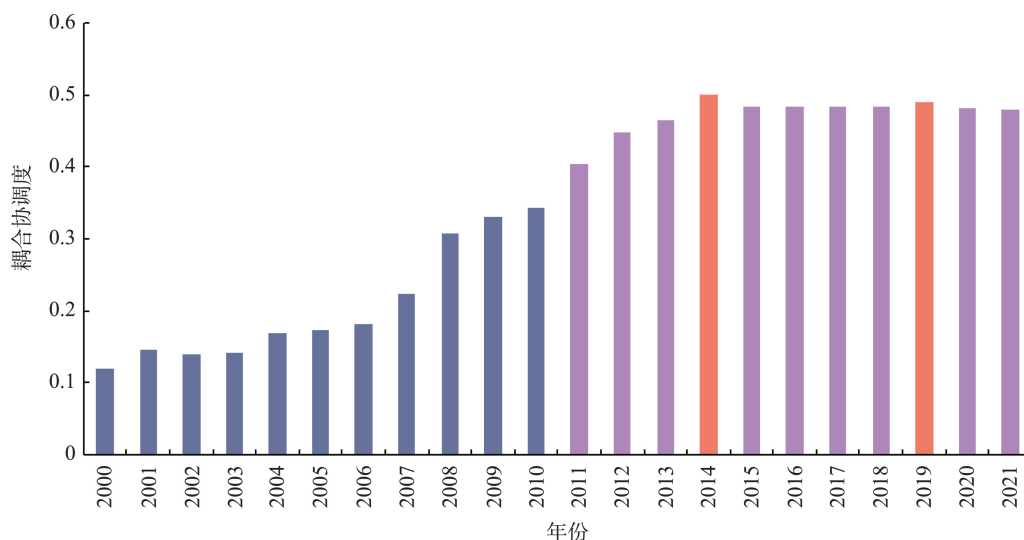


图6 2000—2021年铜资源产业链供应链一级指标耦合协调度

Figure 6 Coupling and coordination degree of the first-level resilience index, 2000-2021

注:蓝色代表失调,紫色代表濒临失调,橙色代表勉强协调。

发展产生了积极的作用。

(4)抵御能力、恢复能力、再组织能力和更新能力的耦合协调度呈现波动上升的趋势,并且2010年后协调度等级提升,由失调突破为濒临协调,2015年后协调性发展趋于平缓,达到新的平衡后通过重构内部组织和功能,不断学习和创新,找到新的路径使产业链供应链能力优化。

## 4.2 建议

基于上述结论,本文提出以下建议:

(1)要继续提升中国铜资源产业链供应链韧性更新能力与恢复能力,在环境承载能力范围内,扩大铜产业的生产规模、优化产业结构,结合人才市场与高校科研院所,持续为企业提供高素质员工,打造产学研一体的铜资源高技术产业园,加速科技研发成果落地转化,突破“卡脖子”技术问题,锻造产业链供应链韧性核心,相关政府部门应该为铜产业企业修建更加配套的物流服务设施,将生产性服务业与制造业协同融合。

(2)努力降低铜资源产业链供应链韧性抵御能力与再组织能力的负面影响,政府应当在税收政策优惠上对铜产业企业倾斜,并且积极应对因地缘政治风险导致的进出口贸易政策不稳定的问题,努力甄别断链风险,加强评估预警,打造优质的营商环境,加大对铜矿的勘探力度,提高铜矿的开发利用水平,提高铜资源的二次回收率。

(3)将产业链供应链与价值链、人才链、资金链等链条全方位融合,规避断链风险,提升断链修复水平。并将铜资源产业链供应链置于“双碳”目标下,为产业链供应链注入绿色动能。

## 参考文献(References):

- [1] 吴巧生,周娜,成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1439-1451. [Wu Q S, Zhou N, Cheng J H. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1439-1451.]
- [2] 张生辉,王振涛,李永胜,等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 138-168. [Zhang S H, Wang Z T, Li Y S, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 138-168.]
- [3] 沈俊杰,黄书培. 国际铜价波动对中国工业经济的结构性冲击: 基于MSVAR和TVP-SVAR-SV模型[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 994-1008. [Shen J J, Huang S P. Structural shocks of international copper price fluctuation on China's industrial economy: Based on MSVAR and TVP-SVAR-SV models[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 994-1008.]
- [4] 王俊博,范蕾,李新,等. 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 939-947. [Wang J B, Fan L, Li X, et al. Research on the social stock of copper resources in China based on the material flow analysis[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 939-947.]
- [5] Wang C, Huang X, Lim M K, et al. Mapping the structural evolution in the global scrap copper trade network[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122934.
- [6] 柳群义. 基于“S”形模型的全球铜需求分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(10): 61-68. [Liu Q Y. Global copper demand analysis based on the S-shape model[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(10): 61-68.]
- [7] 文博杰,代涛,韩中奎,等. 中国铜资源在用存量与二次供应潜力[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 325-332. [Wen B J, Dai T, Han Z K, et al. Copper in-use stock and recycling potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 325-332.]
- [8] Elshkaki A, Graedel T E, Ciacci L, et al. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050[J]. Global Environmental Change, 2016, 39: 305-315.
- [9] 程慧,徐琼,郭尧琦,等. 国际期铜价格波动中的金融因素分析[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 634-644. [Cheng H, Xu Q, Guo Y Q, et al. Financial factors in international copper futures price volatility[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 634-644.]
- [10] Su H, Zhou N, Wu Q, et al. Investigating price fluctuations in copper futures: Based on EEMD and Markov-switching VAR model[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103518.
- [11] 贾冯睿,郎晨,刘广鑫,等. 基于物质流分析的中国金属铜资源生态效率研究[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1706-1715. [Jia F R, Lang C, Liu G X, et al. Assessment of copper resources ecological efficiency based on material flow analysis in China[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1706-1715.]
- [12] 徐德义,王迪,李军辉,等. 新发展格局下战略性矿产资源产业链供应链安全内涵及指标体系研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2023, 57(1): 1-12. [Xu D Y, Wang D, Li J H, et al. The security connotation and index system of industry chain and supply chain of strategic mineral resource under the new development pattern[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2023, 57(1): 1-12.]
- [13] 孙传尧,宋振国,朱阳戈,等. 中国铜铝铅锌矿产资源开发利用现状及安全供应战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 133-



2023年9月

139. [Sun C Y, Song Z G, Zhu Y G, et al. Exploitation and utilization status and safe supply strategy of copper, aluminum, lead, and zinc resources in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 133-139.]
- [14] Kang X, Wang M, Chen L, et al. Supply risk propagation of global copper industry chain based on multi-layer complex network[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103797.
- [15] 宋华, 杨雨东. 中国产业链供应链现代化的内涵与发展路径探析[J]. 中国人民大学学报, 2022, 36(1): 120-134. [Song H, Yang Y D. An analysis on the connotation and development of the modernization of Chinese industrial and supply chains[J]. Journal of Renmin University of China, 2022, 36(1): 120-134.]
- [16] 黄群慧. 以产业链供应链现代化水平提升推动经济体系优化升级[J]. 马克思主义与现实, 2020, (6): 38-42. [Huang Q H. Promote the optimization and upgrading of the economic system with the modernization of the industrial chain supply chain[J]. Marxism & Reality, 2020, (6): 38-42.]
- [17] 王静. 提升产业链供应链现代化水平的共融路径研究[J]. 中南财经政法大学学报, 2021, (3): 144-156. [Wang J. Integration path of improving the modernization level of industrial chain and supply chain[J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2021, (3): 144-156.]
- [18] 李天健, 赵学军. 新中国保障产业链供应链安全的探索[J]. 管理世界, 2022, 38(9): 31-41. [Li T J, Zhao X J. The exploration on ensuring industrial chain and supply chain security in new China [J]. Journal of Management World, 2022, 38(9): 31-41.]
- [19] 中国社会科学院工业经济研究所课题组. 提升产业链供应链现代化水平路径研究[J]. 中国工业经济, 2021, (2): 80-97. [Research Group of the Institute of Industrial Economics of CASS. Research on the path of upgrading the modernization of industrial chain and supply chain[J]. China Industrial Economics, 2021, (2): 80-97.]
- [20] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecological Systems, 1973, 4(1): 1-23.
- [21] Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks[J]. Journal of Economic Geography, 2012, 12(1): 1-32.
- [22] 曾冰, 张艳. 区域经济韧性概念内涵及其研究进展评述[J]. 经济问题探索, 2018, (1): 176-182. [Zeng B, Zhang Y. A review of the connotation of the concept of regional economic resilience and its research progress[J]. Inquiry into Economic Issues, 2018, (1): 176-182.]
- [23] 周曙东, 韩纪琴, 葛继红, 等. 以国内大循环为主体的国内国际双循环战略的理论探索[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 22-29. [Zhou S D, Han J Q, Ge J H, et al. Theoretical exploration of domestic and international dual circulation strategy with domestic grand circulation being the mainstay[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 22-29.]
- [24] 陈晓东, 刘洋, 周柯. 数字经济提升我国产业链韧性的路径研究[J]. 经济体制改革, 2022, (1): 95-102. [Chen X D, Liu Y, Zhou K. Research on the path of digital economy to improve China's industrial chain resilience[J]. Reform of Economic System, 2022, (1): 95-102.]
- [25] 苏任刚, 赵湘莲. 制造业发展、创业活力与城市经济韧性[J]. 财经科学, 2020, (9): 79-92. [Su R G, Zhao X L. Research on urban manufacturing development, entrepreneurial vitality and economic resilience[J]. Finance & Economics, 2020, (9): 79-92.]
- [26] 叶堂林, 李国梁, 梁新若. 社会资本能有效提升区域经济韧性吗? 来自我国东部三大城市群的实证分析[J]. 经济问题探索, 2021, (5): 84-94. [Ye T L, Li G L, Liang X R. Can social capital enhance regional economic resilience effectively? Empirical analysis from the three major urban agglomerations in eastern China[J]. Inquiry into Economic Issues, 2021, (5): 84-94.]
- [27] 谭俊涛, 赵宏波, 刘文新, 等. 中国区域经济韧性特征与影响因素分析[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 173-181. [Tan J T, Zhao H B, Liu W X, et al. Regional economic resilience and influential mechanism during economic crises in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(2): 173-181.]
- [28] 郝爱民, 谭家银. 农村产业融合赋能农业韧性的机理及效应测度[J]. 农业技术经济, 2023, (7): 88-107. [Hao A M, Tan J Y. Empowering agricultural resilience by rural industrial integration: Influence mechanism and effect analysis[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2023, (7): 88-107.]
- [29] 王泽宇, 唐云清, 韩增林, 等. 中国沿海省份海洋船舶产业链韧性测度及其影响因素[J]. 经济地理, 2022, 42(7): 117-125. [Wang Z Y, Tang Y Q, Han Z L, et al. Measurement and influencing factors of the marine ship industry China's resilience in China's coastal areas[J]. Economic Geography, 2022, 42(7): 117-125.]
- [30] Nan C, Sansavini G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 157: 35-53.
- [31] 周娜, 吴巧生, 薛双娇. 新时代战略性矿产资源安全评价指标体系构建与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 55-65. [Zhou N, Wu Q S, Xue S J. A new security evaluation framework of strategic minerals in the new era[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(12): 55-65.]
- [32] 蔡乌赶, 许凤茹. 中国工业韧性的测度及时空演变特征研究[J]. 经济体制改革, 2022, (6): 90-97. [Cai W G, Xu F R. Research on the measurement and characteristics of the spatial-temporal evolution of industrial resilience in China[J]. Reform of Economic System, 2022, (6): 90-97.]
- [33] 张虎, 张毅, 韩爱华. 我国产业链现代化的测度研究[J]. 统计研

- 究, 2022, 39(11): 3-18. [Zhang H, Zhang Y, Han A H. Research on the measurement of modernization of industrial chains in China [J]. Statistical Research, 2022, 39(11): 3-18.]
- [34] 李诗音, 苏欣怡, 符安平. 长江中游城市群经济韧性对高质量发展的影响[J]. 经济地理, 2022, 42(10): 19-24. [Li S Y, Su X Y, Fu A P. Impact of economic resilience on high-quality development of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Economic Geography, 2022, 42(10): 19-24.]
- [35] Fraser Institute. Annual Survey of Mining Companies, 2018[N/OL]. (2019-02-28) [2023-09-15]. <https://www.fraserinstitute.org/studies/annual-survey-of-mining-companies-2018>.
- [36] Wendling Z A, Emerson J W, Sherbinin A, et al. 2020 Environmental performance index[R]. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2020.
- [37] Rhoades S A. The Herfindahl-Hirschman index[J]. Federal Reserve Bulletin, 1993, 79(3): 188-189.
- [38] 马玉芳, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国镍资源供应安全评价与对策研究[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1317-1328. [Ma Y F, Sha J H, Yan J J, et al. Safety assessment and countermeasures of nickel resource supply in China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1317-1328.]
- [39] 孟生旺. 多指标综合评价中权数的选择[J]. 统计研究, 1993, (2): 69-71. [Meng S W. Selection of weights in the comprehensive evaluation of multiple indicators[J]. Statistical Research, 1993, (2): 69-71.]
- [40] 栗欣如, 姜文来, 冯欣. 我国水利绿色发展水平测算分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 7-17. [Li X R, Jiang W L, Feng X. Calculation and analysis of water conservancy green development in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 7-17.]
- [41] 杨耀武, 张平. 中国经济高质量发展的逻辑、测度与治理[J]. 经济研究, 2021, 56(1): 26-42. [Yang Y W, Zhang P. Logic, measurement and governance in China's high-quality economic development[J]. Economic Research Journal, 2021, 56(1): 26-42.]
- [42] Ahmadi S, Saboohi Y, Vakili A. Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2021.110988.
- [43] 张秀艳, 白雯, 郑雪. 我国区域经济韧性的关联识别与演化特征分析[J]. 吉林大学社会科学学报, 2021, 61(1): 90-101. [Zhang X Y, Bai W, Zheng X. Resilience identification and evolution characteristics of regional economy in China[J]. Jilin University Journal Social Sciences Edition, 2021, 61(1): 90-101.]
- [44] 翁钢民, 唐亦博, 潘越, 等. 京津冀旅游-生态-城镇化耦合协调的时空演进与空间差异[J]. 经济地理, 2021, 41(12): 196-204. [Weng G M, Tang Y B, Pan Y, et al. Spatiotemporal evolution and spatial difference of Tourism-Ecology-Urbanization coupling coordination in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2021, 41(12): 196-204.]
- [45] 屈小爽. 旅游经济与生态环境耦合度及协同发展机制研究: 以黄河流域省会城市为例[J]. 生态经济, 2022, 38(10): 125-130. [Qu X S. Research on the coupling degree and coordinated development mechanism of tourism economy and ecological environment: Taking the provincial capital cities in the Yellow River Basin as an example[J]. Ecological Economy, 2022, 38(10): 125-130.]
- [46] 易明, 张兴, 吴婷. 中国数字经济核心产业规模的统计测度和空间特征[J]. 宏观经济研究, 2022, (12): 5-20. [Yi M, Zhang X, Wu T. Statistical measurements and spatial characteristics of the core industries in China's digital economy[J]. Macroeconomics, 2022, (12): 5-20.]
- [47] 杨翠红, 陈锡康. SARS对我国消费的影响程度分析[J]. 管理评论, 2003, (4): 13-17. [Yang C H, Chen X K. Study on the impacts of SARS on consumption of China[J]. Management Review, 2003, (4): 13-17.]
- [48] 张楠, 段绍甫. 2017年中国铜产业综述[J]. 中国矿业, 2018, 27(2): 6-8. [Zhang N, Duan S F. Review of China copper industry in 2017[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(2): 6-8.]
- [49] 邸敬涵, 温宗国. 资源产品贸易的环境影响及隐含环境流分析: 以铜资源为例[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 612-625. [Di J H, Wen Z G. Environmental impacts and embodied environmental flows of the international trade of resource products: A case study of copper[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 612-625.]
- [50] 王安建, 王高尚, 邓祥征, 等. 新时代中国战略性关键矿产资源安全与管理[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 133-140. [Wang A J, Wang G S, Deng X Z, et al. Security and management of China's critical mineral resources in the new era[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 133-140.]

# Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain

ZHU Yongguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Wufeng<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>, DOU Shiquan<sup>1,2</sup>, XU Deyi<sup>1,2</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 2. Resources Environmental Economic Research Center, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

**Abstract:** [Objective] Copper has a wide range of applications in new energy vehicles, electric power, communication, and other fields, and is a key metal that cannot be replaced in the process of energy transformation. China is the world's largest copper consumer and demand country, and its industrial chain and supply chain security issues are increasingly prominent, therefore it is important to scientifically evaluate the resilience of its copper resources industrial chain and supply chain. [Methods] This study constructed a comprehensive evaluation indicator system for the resilience of China's copper resources industrial chain and supply chain from four dimensions of resilience: resistance, recovery capacity, reorganization capacity, and renewal capacity, combined with the characteristics of the copper resources industry. The independence-adjusted entropy weight method was used to evaluate the resilience of the copper resources industrial chain and supply chain from 2000 to 2021, and the indicator barrier degree model and indicator contribution degree model were applied to identify the main factors that affect the improvement of resilience. [Results] The study found that: (1) From 2000 to 2021, the resilience of China's copper resources industrial chain and supply chain showed a fluctuating upward trend, which was more rapid after 2012; (2) The lack of resistance was the main factor that led to the slow improvement of resilience, while the improvement of renewal capacity and recovery capacity was the main path to improving the overall resilience; (3) The coordination degree of resistance, recovery capacity, reorganization capacity, and renewal capacity fluctuated and increased after 2010, which contributed to the above-average resilience of the industrial chain and supply chain. [Conclusion] China should continue to improve the level of renewal capacity and recovery capacity of the copper resources industry, facilitate the integration of industry, academia, and research, and accelerate the transformation of scientific research results; reduce the negative impact of lack of resistance, identify the risks of chain breakage, strengthen the assessment and early warning of risks, and improve the secondary recovery rate of copper resources; collaborate in all aspects of the industrial chain and talent chain, and inject green kinetic energy into the industrial chain and supply chain.

**Key words:** copper resources; industrial chain and supply chain; resilience; indicator barrier degree; coordination degree; China