

引用格式: 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] DOI: 10.18402/resci.2021.03.17

# 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

邸敬涵<sup>1,2</sup>, 温宗国<sup>2</sup>

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 资源产品大规模的国际贸易在对全球资源进行再分配的同时, 也产生了显著的跨境环境影响转移。传统仅从国家或产业层面评估国际贸易中单一环境要素的隐含流已远无法满足国际谈判与博弈中的精细化决策要求。本文以铜资源为例, 应用生命周期评价方法构建了产品级、多环境要素的国际贸易环境影响及隐含流核算体系, 选取了2018年6种铜资源产品的国际贸易数据, 核算了铜资源产品在国际贸易中对各国带来的环境影响变化及在各国之间形成的多环境要素隐含流。分析发现: ①不同资源产品在生产加工过程的环境影响类别、国际贸易带来的环境影响变化和所形成的隐含流规律等方面均具有较大差异; ②铜资源产品的国际贸易带来了全球环境影响的显著增加, 其中, 约97%来源于铜矿、粗铜、精炼铜等原材料产品的贸易, 主要流向原料国, 其余3%的贸易环境影响增加来源于铜废料的国际贸易, 主要由中国等发展中国家承担; ③总体上, 在铜资源的国际贸易中主要形成了“发达国家→中、印等发展中国家→其他发展中国家”的全球环境影响转移链条。根据研究所得结论, 建议在资源产品国际贸易谈判博弈和环境政策制定中, 应综合考虑多环境要素, 并结合各国经济发展水平对不同资源产品予以精细的差别化管理。

**关键词:** 贸易环境影响; 生命周期评价; 隐含环境流; 铜资源产品; 精细化管理

DOI: 10.18402/resci.2021.03.17

## 1 引言

国际贸易是加速全球化进程的重要途径, 产业链条的全球化以国际贸易的形式将世界各国链接形成了全球产业分工体系, 带来了全球产业链的整合。但与此同时, 资源开采、产品加工与生产、以及运输等环节亦带来自然资源消耗和环境污染等额外的隐含资源环境影响, 加剧了局部地区的环境恶化。资源产品在国家间通过国际贸易形成物质流的同时, 也带来了隐含环境影响的跨境转移与流动, 形成贸易的隐含环境流<sup>[1]</sup>。近年来, 随着国际社会对绿色可持续发展的不断重视, 例如欧盟在2019年提出的“欧洲绿色新政”<sup>[2]</sup>, 大规模国际贸易带来的环境影响与隐含流在各国贸易政策与产业政策

的制定中日益受到关注。

已有研究主要从产品-行业-国家3个维度<sup>[3]</sup>(如图1所示)对国际贸易带来的环境影响与隐含流进行评估与研究。产品层面的隐含环境流核算主要应用生命周期评价的自下而上方法, 对特定领域或产品的贸易环境影响进行分析, 所需数据的精度很高<sup>[4]</sup>; 在行业和国家维度主要应用环境拓展的投入产出模型、单一区域投入产出模型、双边贸易投入产出模型、多区域投入产出模型、一般均衡模型等自上而下方法, 研究领域较为广泛, 且应用的数据为高度整合的行业参数, 精度较低<sup>[5]</sup>。

大部分已有研究主要从国家、地区以及行业、产业层面, 应用环境扩展的投入产出模型及其衍生

收稿日期: 2021-02-20 修订日期: 2021-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1900301); 国家杰出青年科学基金项目(71825006)。

作者简介: 邸敬涵, 女, 吉林长春人, 博士后, 主要从事资源环境管理政策研究。E-mail: jinghan.di@ruc.edu.cn

通讯作者: 温宗国, 男, 福建泉州人, 教授, 主要从事循环经济与环境管理政策研究。E-mail: wenzg@tsinghua.edu.cn

2021年3月

研究维度	研究方法	研究领域	数据精度	分析方法
国家	一般均衡模型 多区域投入产出模型 双边贸易投入产出模型 物质流分析	广泛	高度整合	自上而下
行业	单一区域投入产出模型 物质平衡方法 投入产出-生命 周期混合模型	特定	非常精细	组合应用
产品	生命周期评价			自下而上

图1 贸易隐含流的研究方法<sup>[3,5]</sup>

Figure 1 Research methods of embodied flows in trade<sup>[3,5]</sup>

模型,对双边、区域及全球的国际贸易隐含环境影响进行核算。例如,Peters等<sup>[6]</sup>应用贸易隐含排放核算方法对2001年87个国家的国际贸易碳隐含流进行核算,指出贸易中的隐含碳排放对国际气候政策具有显著影响,且不同的政策选择对全球气候变化影响不同;Duarte等<sup>[7]</sup>应用环境拓展的多区域投入产出引力模型对1995—2009年间全球39个国家贸易碳隐含流的轨迹与决定因素进行分析,并提供了一种可以综合从生产和消费的角度解释与量化碳贸易潜在地理、结构、国家制度等影响因素的研究方法;赵玉焕等<sup>[8]</sup>通过结合CO<sub>2</sub>排放市场的供需均衡分析、投入产出分析、回归分析等方法,考察了2000—2014年中国56个部门中全球价值链的嵌入对中国进出口贸易隐含碳的影响,并检验了不同嵌入模式对其异质性影响及影响路径。而由于数据可得性和复杂性以及研究维度和系统边界的局限性<sup>[9]</sup>等限制,对产品层面的研究较少。例如,Sato<sup>[4]</sup>应用物质平衡方法,结合全球足迹网络、生命周期评价方法等,对2006年双边贸易产品层面的隐含碳流动进行更为细致的核算与分析,指出约10%的产品贸易贡献了70%的国际贸易隐含碳排放,其在地理分布具有区域性特征,且主要的贸易集团在全球各类产品供应链上均具有显著地位;Yang等<sup>[9]</sup>将投入产出分析与生命周期评价方法结合,对中美贸易中的能源隐含流进行分析,指出在1997—2011年的中美贸易中,中国是隐含能源的净出口国,导致中国的能耗大幅增加,而美国的能耗则大幅下降。

在对环境要素的选择与评估中,国内外研究者主要基于单一环境要素的贸易隐含流进行核算。其中,贸易的碳隐含流分析<sup>[5]</sup>是较多研究重点关注的领域,对双边或国际贸易中<sup>[10]</sup>的隐含能源<sup>[11,12]</sup>、隐含大气污染排放<sup>[13,14]</sup>、虚拟水、虚拟土地、隐含太阳能

等<sup>[15]</sup>的评估与研究亦有所涉及。

然而,已有对国际贸易隐含环境流的研究在产品差异性与多环境要素综合影响上具有较大的局限性。一方面,已有研究并未考虑到同一产业或行业部门内部各产品贸易隐含环境影响可能存在的差异性,使得其研究结果无法实现产品级的具体分析与管理应用,无法落实到贸易政策的产品目录中,不满足当前精细化管理的决策需求;另一方面,不同类别环境影响在不同产品或行业中的分布比例存在一定的差异,仅根据单一环境要素进行分析与政策制定可能会导致其他类型环境影响的转移,例如出现低碳高污染等问题。

铜元素是国民经济社会发展的关键大宗金属,是国际主要经济体国家的战略性金属资源。铜及其合金广泛应用于电力行业、电器电子行业、日用品行业、机械制造业、交通运输业、建筑业、航空航天行业、军工行业等<sup>[16]</sup>。作为世界第一大铜消费国,中国铜原料的对外依存度高达80%以上,铜进出口贸易位居世界第一<sup>[16]</sup>,是“被卡脖子”的战略性金属资源。此外,中国对进口废杂铜也有一定的对外依存度,尽管洋垃圾禁止进口政策的实施对废六类废杂铜的进口带来了一定的抑制作用,但2019年废杂铜进口量依然约占当年铜原料需求量的12%<sup>[17]</sup>。

因此,为解决前述研究存在的局限性,本文以铜为例,应用生命周期评价方法评估铜资源产品2018年国际贸易中全生命周期的多环境要素综合影响,分析国际贸易形成的隐含环境流,厘清不同产品贸易的跨境环境影响转移情况,并提出促进全球环境可持续发展的贸易政策及国际合作建议。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 研究方法与系统边界

#### 2.1.1 生命周期评价方法

本文对资源产品的全生命周期环境影响的核算主要通过生命周期评价方法中的环境影响清单分析与环境影响潜值分析实现。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是分析产品全生命周期环境影响的重要方法,ISO 14040将其定义为一个产品生产体系全过程的输入、输出以及潜在环境影响的集合与评估<sup>[18]</sup>。根据生命周期评价的一般步骤形成资源产品的国际贸易环境影响核算框架如图2所示。

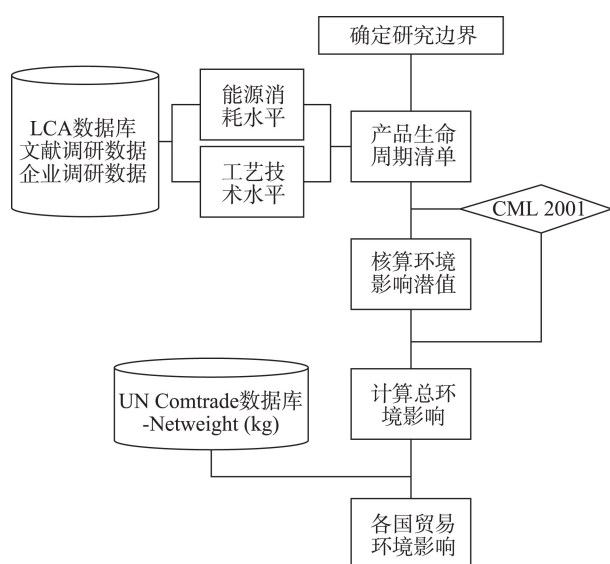


图2 资源产品国际贸易的环境影响核算框架

Figure 2 Evaluation framework for the environmental impacts of the international trade of resource products

具体的核算步骤如下:

### (1) 确定研究边界及各产品生命周期环境影响清单

选取与资源产品贸易类别对应的产品作为核算的主要对象,并假设所有产品生产加工的原材料产品与能源均为国内生产。在对系统边界的界定上,根据数据的可得性和完整性,选取2018年的数据,且仅考虑产品的生产制造“Cradle-to-gate”的全过程环境影响,即从资源开采到产品出厂全过程,产品生产仅考虑原料的开采与生产,不考虑其后续的使用与废弃;废料则仅考虑其处理处置过程的环境影响,而不考虑其上游产品生产制造或使用以及下游产品的再利用环节(图3)。

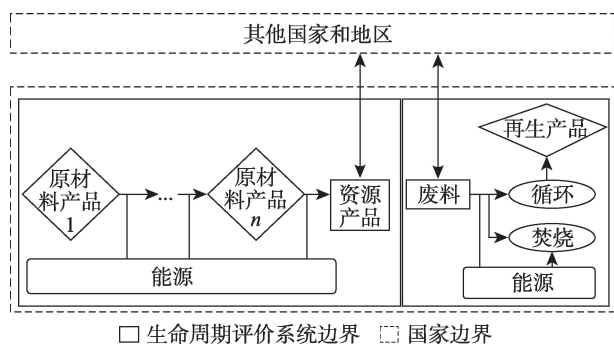


图3 资源产品生产加工生命周期评价的系统边界

Figure 3 System boundary of the life cycle assessment of producing and manufacturing resource products

### (2) 核算各产品生产环境影响潜值

各类别环境影响潜值包括非生物性资源耗损潜值、酸化潜值、富营养化潜值、生态毒性潜值、全球变暖潜值、光化学臭氧层耗损潜值等。由于各类别环境影响潜值存在量纲的差异,在不同研究中采用的生命周期影响评估方法不同,为使得环境影响具有可比性与可加性,本文对各类别环境影响潜值评估结果进行标准化与归一化处理,形成综合环境影响,可表示为:

$$\varepsilon_{xi} = \sum \frac{POA_{xi}}{POA_{std}} \times POA_{factor} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_{xi}$  为国家  $i$  生产产品  $x$  的综合环境影响;  $POA_{xi}$  为根据环境影响清单得到的国家  $i$  生产产品  $x$  的某项环境影响潜值;  $POA_{std}$  为该类环境影响潜值标准化基准因子;  $POA_{factor}$  为该类环境影响潜值对应的权重因子。

可体现多种环境影响类别的评估方法较多,主要包括 CML、ReCiPe、TRACI 等。其中, CML 评估方法的标准化因子主要适用于欧盟或全球情景<sup>[19]</sup>,且更新时间为2016年<sup>[20]</sup>,与本文关注的2018年较为接近; ReCiPe 评估方法通过中点和终点指标对环境影响潜值进行刻画,尽管中点指标的不确定性相对较小,但该方法开发者并未提供各中点指标的权重<sup>[21]</sup>; TRACI 评估方法主要适用于美国情景<sup>[22]</sup>。综合考虑评估方法的时效性、不确定性和可得性,本文选取 CML 评估方法,确定标准化因子和权重因子。将2000年的全球平均环境影响潜值<sup>[20,23]</sup>作为标准化基准因子  $POA_{std}$ ,并选取 Gabi 数据库<sup>[24]</sup> CML 评估方法对应的权重因子  $POA_{factor}$ ,如表1所示。

### (3) 计算各产品生产总环境影响

对各产品生产过程各环节的环境影响和能源消耗环境影响进行加总,得到不同国家或地区生产单位产品全生产过程的总环境影响。

### (4) 计算各国产品贸易的环境影响

在贸易关系  $r(i, j)$  中,出口国  $i$  向进口国  $j$  出口  $w(i, j)$  的产品  $x$ ,出口国  $i$  生产产品  $x$  的环境影响为  $\varepsilon_{xi}$ ,进口国  $j$  生产产品  $x$  的环境影响为  $\varepsilon_{xj}$ 。本文对国际贸易带来的环境影响变化定义如下:

对于进口国  $j$  而言,由于从出口国  $i$  进口了相应的产品,而本应由进口国承担的环境影响转化为0



2021年3月

表1 环境影响潜值标准化基准因子及权重

Table 1 Normalization factors and weights of specific environmental impacts

环境影响潜值类别		2000年全球均值	单位	权重
非生物性资源耗损( <i>ADP</i> )	元素	3.61E+08	kg Sb eq./yr	6.4
	化石燃料	3.80E+14	MJ/yr	7.0
全球变暖( <i>GWP</i> )		4.22E+13	kg CO <sub>2</sub> eq./yr	6.1
人体毒性( <i>HTP</i> )		2.58E+12	kg 1,4-DCB eq./yr	6.6
生态毒性( <i>ETP</i> )	淡水生态毒性( <i>FAETP</i> )	2.36E+12	kg 1,4-DCB eq./yr	6.8
	海洋生态毒性( <i>MAETP</i> )	1.95E+14	kg 1,4-DCB eq./yr	9.3
	陆地生态毒性( <i>TETP</i> )	1.09E+12	kg 1,4-DCB eq./yr	7.1
臭氧层耗损( <i>ODP</i> )		2.27E+08	kg CFC eq./yr	6.8
光化学效应( <i>POCP</i> )		3.68E+10	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq./yr	6.2
酸化( <i>AP</i> )		2.39E+11	kg SO <sub>2</sub> eq./yr	6.5
富营养化( <i>EP</i> )		1.58E+11	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq./yr	6.8

(本文不考虑进出口过程带来的环境影响),其环境影响可表示为:

$$EIP(j) = -w(i, j) \times \varepsilon_{xj} \quad (2)$$

而对于出口国*i*而言,生产出口至国家*j*的产品*x*带来的额外环境影响可表示为:

$$EIP(i) = w(i, j) \times \varepsilon_{xi} \quad (3)$$

由贸易关系  $r(i, j)$  带来的总环境影响可表示为:

$$EIP(i, j) = w(i, j) \times (\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{xj}) \quad (4)$$

而当贸易产品为废料*y*时,国家*i*作为出口国,需考虑若其不出口  $w(i, j)$  的废料*y*,而是由本国固体废弃物处理体系进行处理处置,即按一定比例进行填埋( $\varepsilon LF_{yi}$ )、焚烧( $\varepsilon INC_{yi}$ )与循环利用( $\varepsilon RCL_{yi}$ )的总环境影响,而出口后环境影响视为0。因此,对于出口国*i*而言,出口废料*y*的环境影响为:

$$EIP(i) = 0 - w(i, j) \times (\varepsilon LF_{yi} + \varepsilon INC_{yi} + \varepsilon RCL_{yi}) \quad (5)$$

国家*j*作为进口国,进口的废料虽然在一定程度上可作为额外带来的资源化产品原料,但考虑到本国金属原料市场的需求及资源化技术可能存在的先进性与经济性问题,进口国对废料的处理处置依然与本国固体废弃物管理体系相一致,即按一定比例填埋、焚烧与循环利用,其环境影响可表示为:

$$EIP(j) = 0 + w(i, j) \times (\varepsilon LF_{yj} + \varepsilon INC_{yj} + \varepsilon RCL_{yj}) \quad (6)$$

### 2.1.2 贸易的隐含环境流核算方法

与已有研究中直接将产品出口国或废料进口国的生产或处理处置环境影响作为隐含环境流的

核算方法不同,本文综合考虑了产品进口国与废料出口国的生产与处理处置环境影响情况,定义了资源产品国际贸易中实际产生的环境影响变化与隐含环境流,并基于前述生命周期环境影响评估结果,核算并分析贸易的隐含环境流。

由于技术差异,出口国和进口国生产单位产品的环境影响存在一定差异,具体的可能情景以及隐含环境流的情况如图4所示。若  $EIP(i, j) > 0$ ,说明贸易带来了整个系统环境影响的增加,而增加的这部分环境影响是由于出口国*i*应用了环境影响更大的工艺技术导致,隐含环境流的方向为进口国*j*→出口国*i*,大小为进口国*j*生产单位该产品的环境影响  $\varepsilon_{xj}$ ;若  $EIP(i, j) < 0$ ,说明贸易使得整个系统的环境影响减小,减小部分是由于出口国*i*选取了环境影响更小的工艺技术导致,隐含环境流的方向为进口

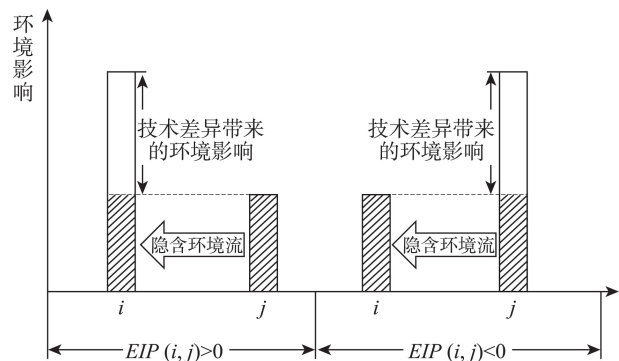


图4 资源产品贸易的隐含环境流示意图

Figure 4 Illustration of embodied environmental flows in the trade of resource products



国 $j \rightarrow$ 出口国 $i$ ,大小为出口国 $i$ 生产单位该产品的环境影响 $\varepsilon_{xi}$ 。

类似地,在废料的贸易关系 $r(i,j)$ 中,废料贸易带来的环境影响变化及隐含环境流的流向和流量如图5所示。隐含环境流方向为出口国 $i \rightarrow$ 进口国 $j$ ,大小为出口国 $i$ 和进口国 $j$ 处理处置单位废料环境影响的较小值。

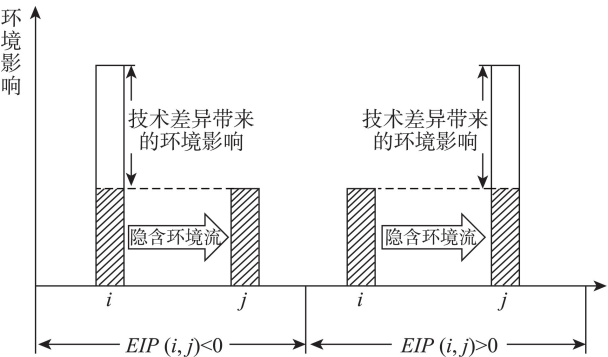


图5 废料贸易的隐含环境流示意图  
Figure 5 Illustration of embodied environmental flows in the trade of waste and scraps

2.2 数据来源与基本假设

2.2.1 国际贸易数据选取与设定

本文选取UN Comtrade数据库中2018年174个贸易国家的4-6位HS编码铜资源产品(包括铜矿、粗铜、精炼铜、铜化合物、铜材、铜废料)统计数据(表2)。由于铜产品所涉及的行业和产品类别繁多,包括电器电子产品、汽车、航空航天等,且产品组分较为复杂,主要以零部件的形式存在于产品中,无法按单一资源产品进行处理,因此,本文对铜产品这一类别不予考虑。在贸易数据的选取方面,本文仅考虑进出口数据,而不考虑再进口/再出口以

表2 研究选取的铜资源产品及对应UN Comtrade编码

Table 2 UN Comtrade codes of copper resource products in this research	
金属资源	HS 编码
铜矿	2603, 262030
粗铜	7401, 7402
精炼铜	7403, 7405
铜化合物	282550, 282741, 283325
铜材	7406, 7407, 7408, 7409, 7410, 7411, 7412, 7413, 7415, 7418, 7419
铜废料	7404

及镜像数据等其他数据类型。

2.2.2 生命周期评价数据选取与设定

在核算单位铜资源产品产出的环境影响时,由于无法获取所有国家和地区生产技术清单数据,本文按区域(如亚洲、非洲、中东、欧盟等)对所有的贸易国家进行地区划分,并假设各地区通用本区域的主要生产工艺(表3),生产技术清单主要在Gabi数据库<sup>[24]</sup>和Ecoinvent数据库<sup>[25]</sup>所提供的清单信息基础上结合文献调研与企业调研结果进行计算与调整;对清单中上游能源消耗(如原油、煤、天然气、电等)则选取不同国家的能源情景,来体现应用同一技术清单的国别间产品生产的环境影响差异,能源消耗的环境影响清单数据来源主要为Gabi数据库Energy Conversion子数据库。

具体而言,对各类别铜资源产品的生产工艺技术基本设定如下:

(1)铜精矿

铜精矿生产的物料投入与排放清单选取Ecoinvent数据库提供的亚洲、北美洲、南美洲、欧洲、澳大利亚、全球的硫化矿采矿与选矿工艺情景,设定澳

表3 铜资源产品生产工艺技术及区域设定

Table 3 Producing and manufacturing technologies and regions of copper resource products			
金属资源	清单产品	主要生产工艺技术	应用国家或地区
铜矿	铜精矿	硫化矿采选工艺	亚洲、欧洲、澳大利亚、北美、南美、全球
粗铜	含铜量98.5%	火法	亚洲、欧洲、澳大利亚、北美、南美、中国、全球
精炼铜	含铜量99.99%	火法;湿法	亚洲、欧洲、澳大利亚、北美、南美、中国、全球
铜化合物	氧化铜、硫酸铜	(化学反应方程式)	亚洲、欧洲、澳大利亚、北美、南美、全球
铜材	铜片、铜管、铜丝	压铸、锻造、轧制	欧洲、北美、中国、乌克兰、巴西
铜废料	铜废碎料	焚烧;循环利用	欧洲、非洲、日本、德国、中国、美国、巴西

注:若某一国家的某项工艺技术清单可得,则应用本国的清单数据;否则,采用该国所在区域的平均工艺技术水平。

2021年3月

大利亚的工艺情景代表大洋洲的工艺技术水平,应用全球的采选工艺技术代表非洲和中东地区的工艺技术情景。开采技术的比例分配设定为70%的露天开采与30%的地下开采,通过混合浮选工艺从铜钼矿中分离得到铜和钼<sup>[25]</sup>。

### (2)粗铜与精炼铜

从铜矿石或精矿中提炼铜的过程统称为铜冶炼。铜冶炼技术主要分为火法炼铜和湿法炼铜,且以火法为主要技术选择。铜铈和粗铜是铜冶炼过程的中间产物,中间产物经过精炼后得到精炼铜。主要的铜冶炼技术流程如图6所示。

对国际铜业研究组织(International Copper Study Group, ICSG)<sup>[27]</sup>提供的2019年全球精炼铜产能排名前20的铜冶炼企业的技术选择分析可知,全球主要的铜冶炼企业中,占约69%产能的精炼铜采用闪速熔炼法,9%采用反射炉熔炼法,22%采用熔池熔炼法;基于刘志宏<sup>[28]</sup>对中国铜冶炼行业的24家主要企业的熔炼工艺选择梳理可知,约51%产能的精炼铜采用闪速熔炼法,11%采用富氧底吹熔炼法,38%采用其他熔池熔炼法,反射炉等传统铜冶炼工艺在中国已被全面淘汰。

在粗铜生产工艺技术的选取上,选取欧洲生产1 kg铜含量为98%的粗铜的工艺技术<sup>[25]</sup>;在精炼铜的生产工艺技术清单选取上,选取亚洲、北美洲、南美洲、欧洲、澳大利亚、全球的主要生产工艺,结合中国的铜冶炼主要工艺应用比例<sup>[28]</sup>。对各主要火法炼铜工艺的应用比例、湿法炼铜工艺的应用比例、以及整体SO<sub>2</sub>削减率的设定如表4所示。

### (3)铜化合物

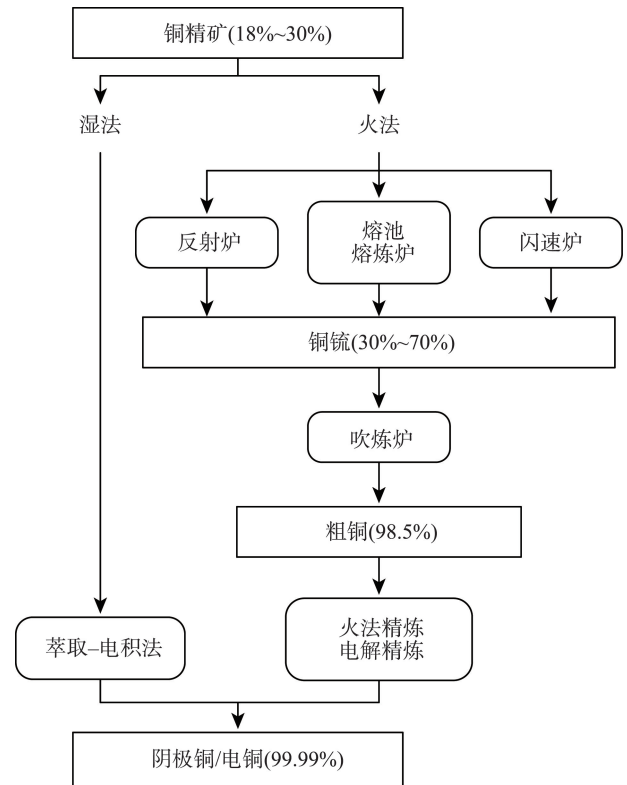


图6 铜冶炼技术流程示意图<sup>[26]</sup>

Figure 6 Illustration of copper smelting processes<sup>[26]</sup>

根据数据可及性,本文仅选取氧化铜和硫酸铜制备的生产生命周期清单作为铜化合物生产的环境影响核算产品,基于氧化铜和硫酸铜制备的单一环节生产工艺的物料投入与排放清单<sup>[25]</sup>,结合上游产品和原材料,形成主要国家和地区氧化铜和硫酸铜制备的生命周期清单。

### (4)铜材

本文在前述铜材产品的分类上,除基础材料外,将零部件、中间产品等也纳入了铜材的考虑范

表4 精炼铜生产工艺比例<sup>[25]</sup>

Table 4 Technology applications (proportion) of the refined copper production<sup>[25]</sup>

	反射炉工艺/%	闪速熔炼法/%	其他熔炼法/%	萃取-电积法/%	SO <sub>2</sub> 削减率/%
全球	23.7	60.7	6.2	9.4	45.4
欧洲	6.2	76.0	17.8	0.0	95.0
北美洲	23.3	53.9	5.2	17.6	50.0
南美洲	23.3	53.9	5.2	17.6	50.0
亚洲	22.8	75.7	1.5	0.0	20.0
中国 <sup>①</sup>	0.0	51.2	48.8	0.0	20.0
澳大利亚	23.7	60.7	6.2	9.4	45.4

① 对中国工艺比例的设定综合考虑主要铜冶炼工艺的比例分布和亚洲的比例分布情况。

围。根据基础铜材分类以及数据可得性,本文仅考虑铜片(sheet)、铜管(tube and pipe)、铜丝(wire)的生产清单<sup>[24]</sup>。

### (5)铜废料

对铜废料的处理处置,主要可分为焚烧与循环利用,根据已有对铜物质流分析的研究对铜废料的焚烧与循环利用比例进行设定(表5)。

本文应用 Ecoinvent 数据库提供的全球和欧洲的铜废料焚烧技术清单,以及全球的铜废料处理利用的技术清单,结合表中的处理处置比例进行核算。

中国作为全球铜废料的主要进口国,需对再生铜的循环利用技术清单予以单独核算。结合中国再生资源企业利用铜废料生产再生铜的主要工艺技术,考虑到在中国49家城市矿产示范基地的园区中,有22家基地涉及再生铜的生产与加工项目,新增资源量约占全部新增资源量的9%,其中,江西省、浙江省、山东省的城市矿产示范基地再生铜年均新增加工处理能力均达到80万t以上,在全部城市矿产示范基地新增铜资源量中,共约占52%。本文通过对江西省、浙江省、山东省主要再生铜企业(如贵溪东升铜业、南方有色、中旺铜业、浙江巨东、东营方圆有色等)的原料、产品、工艺等进行对比分析,考虑到再生铜企业应用的国内源与进口源废杂铜的含铜量相对较低且成分差异较大<sup>[39]</sup>,本文设定

中国的再生铜的生产工艺为火法精炼,主要应用富氧熔炼工艺进行“三段法”熔炼,生产流程为废杂铜→黑铜→阳极铜→电解铜。

## 3 结果与分析

### 3.1 铜资源产品贸易的全生命周期环境影响

基于上述数据来源和基本假设,核算生产单位铜资源产品或处理处置单位铜废料的环境影响潜值,经标准化与加权后得到生命周期环境影响潜值的比例分布如图7所示。

对各主要国家或地区各类别铜资源产品全生命周期多环境要素的环境影响分析可知,非生物性资源耗损、生态毒性和人体毒性是最为主要的3类环境影响。其中,非生物性资源耗损在铜精矿和粗铜生产过程中的影响较大,分别占比约77%和31%;生态毒性在所有类别的铜资源产品生产加工的环境影响中占比约为20%~30%,在铜废料焚烧处置的环境影响中占比约达100%;人体毒性在粗铜、精炼铜、氧化铜、硫酸铜、铜材的生产加工过程中的环境影响分别占比约40%、70%、71%、68%、70%,在铜废料的循环利用处理环节中,除生态毒性约占36%外,其余的环境影响基本为人体毒性,约占62%。而在所有类别的铜资源产品生产加工及废料的处理处置过程中,所带来的全球变暖影响是极小的,占比均不足0.05%。这说明,仅应用碳排放或温室气体排放作为铜资源产品国际贸易的环境影响进行判断与决策,可能会由于温室气体的低排放水平而降低其贸易的环境壁垒,进而导致铜资源产品的贸易规模变大,带来较高水平的非生物性资源耗损、生态毒性和人体毒性等其他环境影响,造成环境影响在不同环境要素间的转移,无法实现环境可持续发展。

由于不同国家或地区生产加工各类铜资源产品的工艺技术水平差异,在不同类别的环境影响潜值的表现也有所不同<sup>⑤</sup>。具体而言,在生产铜精矿的各项环境影响潜值中,欧洲工艺的所有环境影响

表5 各国家与地区的铜废料<sup>②</sup>处理处置比例

Table 5 Treatment and disposal methods (proportion) of copper scraps in different countries and regions

	焚烧 <sup>③</sup> /%	循环利用 <sup>④</sup> /%
全球平均 <sup>[27,29]</sup>	42	58
德国 <sup>[30]</sup>	34	66
中国 <sup>[31,32]</sup>	44	56
美国 <sup>[33]</sup>	39	61
欧盟 <sup>[34,35]</sup>	40	60
巴西 <sup>[36]</sup>	75	25
非洲 <sup>[37]</sup>	66	34
日本 <sup>[38]</sup>	35	65

② 此处的铜废料为本国产生并进行处理处置,不包括进出口。

③ 考虑铜废料中除进入循环利用环节外的剩余部分均进入焚烧环节。

④ 此处应用的循环利用比例为铜废料中进入循环利用环节的比例,对应文献中常用的指标 End-of-life Collection Rate。由于文献的研究时间不一,仅以文献中出现的最新处理处置情景的数据作为参考。

⑤ 因篇幅限制,文中未展示不同工艺技术在各环境影响潜值的具体比例,有需要的读者可以找作者索取。



2021年3月

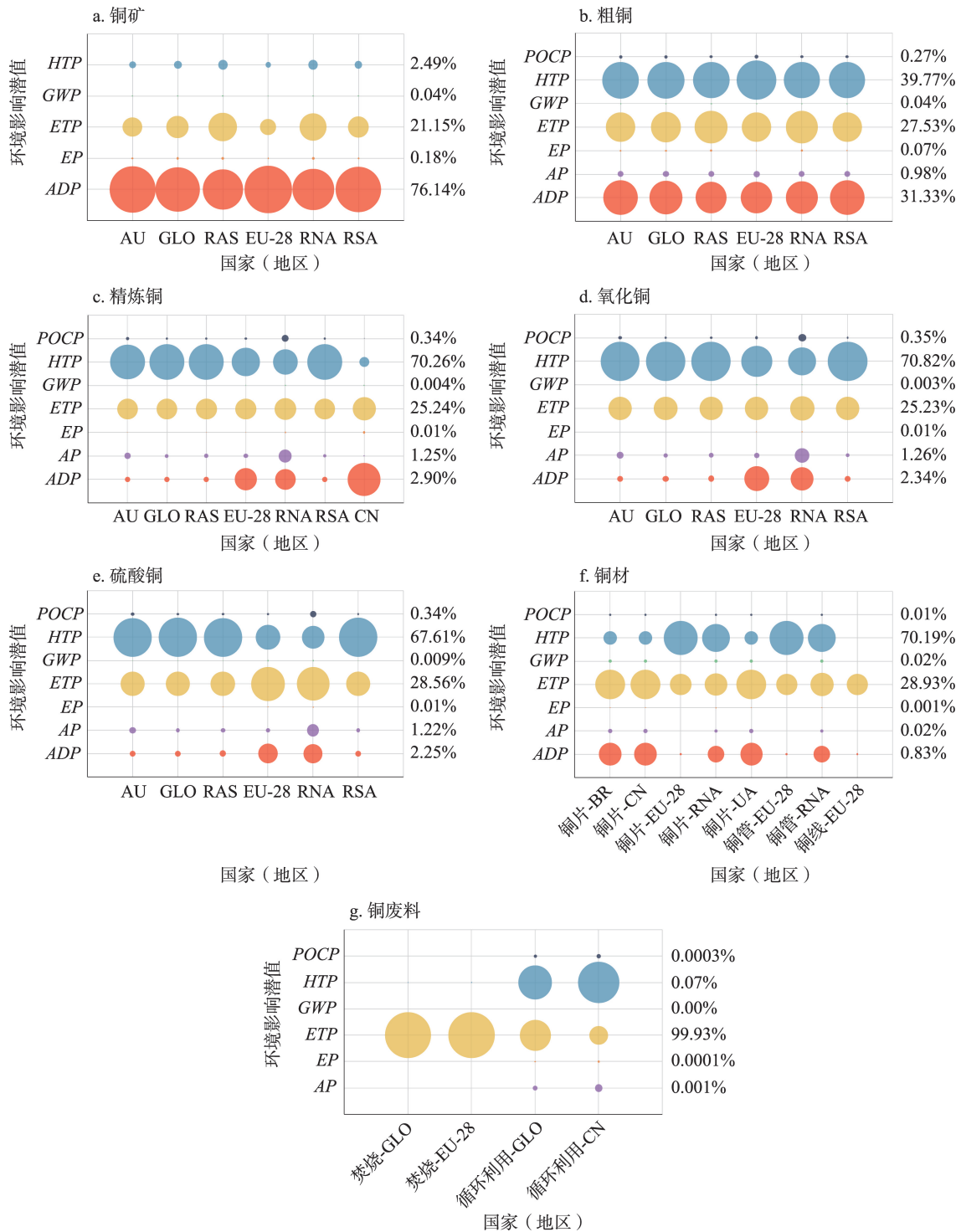


图7 铜资源产品生命周期环境影响比例分布

Figure 7 Proportional distributions of specific life cycle environmental impacts of copper resource products

注:在此交叉气泡图中,横轴代表生产某类铜资源产品的国家或地区,英文缩写对应的中文地区或国家名称分别为:AU—澳大利亚、BR—巴西、CN—中国、EU-28—欧盟、GLO—全球、RAS—亚洲地区、RNA—北美地区、RSA—南美地区、UA—乌克兰;纵轴代表产品生产或废料处理处置的环境影响潜值类别,对应关系详见表1。同一颜色的气泡代表同一类别的环境影响潜值,气泡的大小代表某一国家或地区生产某类铜资源产品的某类环境影响潜值占总环境影响的比例大小。

潜值均占最小比例,总环境影响也最小;亚洲工艺除了非生物性资源耗损潜值外,其他4类环境影响潜值占比均最高;北美工艺的总环境影响最大,各类环境影响潜值的占比也较高。在生产粗铜的各项环境影响潜值中,北美洲工艺的非生物性资源耗损潜值(19%)、酸化潜值(17%)和光化学效应潜值(17%)占比最高,亚洲工艺的富营养化潜值(31%)、生态毒性潜值(20%)、全球变暖潜值(21%)和人体毒性潜值(17%)占比最高;欧洲工艺整体环境影响潜值相对较小,其中,非生物性资源耗损潜值(13%)、富营养化潜值(3%)、生态毒性潜值(13%)、全球变暖潜值(12%)、人体毒性潜值(16%)均占比最小。在生产精炼铜的各项环境影响潜值中,中国工艺组合的非生物性资源耗损潜值(20%)和富营养化潜值(33%)占比最大,澳大利亚的工艺技术组合在酸化潜值(41%)和光化学效应潜值(41%)占比最大,亚洲平均的工艺组合的生态毒性潜值(24%)和全球变暖潜值(19%)的占比最大;欧洲的工艺技术组合在所有的环境影响潜值中均占比最小。

本文重点核算了单位氧化铜和硫酸铜两种铜化合物的生产制备环境影响潜值。在生产氧化铜的各环境影响潜值中,澳大利亚的制备工艺具有最大的酸化潜值(41%)和光化学效应潜值(41%),亚洲工艺的全球变暖潜值(22%)、生态毒性潜值(25%)、富营养化潜值(33%)和非生物性资源耗损潜值(18%)最大,南美洲工艺的人体毒性潜值(25%)占比最大;欧洲工艺在所有类别的环境影响潜值中均为最小,且生产单位氧化铜的总环境影响最小。在生产硫酸铜的环境影响潜值中,澳大利亚的工艺具有最大的酸化潜值(40%)和光化学效应潜值(40%),亚洲工艺的非生物性资源耗损潜值(18%)、富营养化潜值(32%)、生态毒性潜值(23%)、全球变暖潜值(19%)、人体毒性潜值(25%)占比最大;欧洲工艺在各类别环境影响潜值中均占比最小,且总环境影响最小。

在铜材生产加工的各类环境影响潜值中,铜线生产的富营养化潜值(21%)、生态毒性潜值(57%)、人体毒性潜值(59%)、臭氧层耗损潜值(38%)最大,欧洲的铜片生产工艺的各类环境影响潜值均最小。处理处置铜废料的环境影响潜值中,全球变暖、生态毒性和人体毒性等环境影响主要由焚烧铜

废料产生,非生物性资源耗损、富营养化、光化学效应和人体毒性等环境影响主要由循环利用铜废料产生。

### 3.2 铜资源产品的国际贸易隐含环境流

2018年,中国对铜资源产品的净进口量最大,约达0.5亿t,主要体现在铜精矿、粗铜、精炼铜以及铜废料的进出口贸易中;智利是净出口量最大的国家,约达0.2亿t,主要体现在铜精矿、粗铜以及精炼铜的进出口贸易上。

对各类别铜资源产品国际贸易带给各国环境影响变化的来源与去向进行分析,根据本文对隐含环境流的定义,核算得到2018年各类别铜资源产品国际贸易中各国间的隐含环境流情况如图8所示。分析发现:铜资源产品的国际贸易带来了全球环境影响的显著增加,主要来源于铜矿、粗铜、精炼铜等原材料产品及铜废料的国际贸易,铜化合物和铜材的国际贸易带来全球环境影响的变化并不显著。

具体而言:①约97%的环境影响增加来源于铜矿、粗铜、精炼铜等原材料产品,主要由智利、秘鲁、赞比亚等原料国承担,且这些国家的贸易环境影响主要来源于向铜资源相对短缺且处于经济发展与建设阶段的国家的出口贸易;②铜废料的国际贸易产生的环境影响增加占总增加的3%,主要由中国、印度等发展中国家承担,且60%以上的环境影响增加来源于美国、日本等发达国家的出口;③南非和澳大利亚是铜化合物国际贸易中的主要隐含环境流流出国,中国、俄罗斯和赞比亚为主要隐含环境流流入国,南非的隐含环境流中约73%流向赞比亚,澳大利亚的隐含环境流中约87%流向中国和俄罗斯;④铜材贸易的隐含环境流与地域分布关联性较大,德国和阿联酋是主要的隐含环境流流入国,其中,德国约68%的环境影响来源于欧洲国家,阿联酋约71%的环境影响来源于亚洲国家;而印度和美国是主要的隐含环境流流出国,其中,印度约87%的环境影响转移至亚洲国家,美国约81%的环境影响转移至加拿大。

上述分析表明,各类别铜资源产品国际贸易的隐含环境流与各国在产业链上的地位以及各国的地理位置直接相关,主要形成了在铜矿、粗铜、精炼铜等原材料产品贸易中“中国、印度等发展中国家→智利、秘鲁、赞比亚、澳大利亚等原材料分布国”

2021年3月

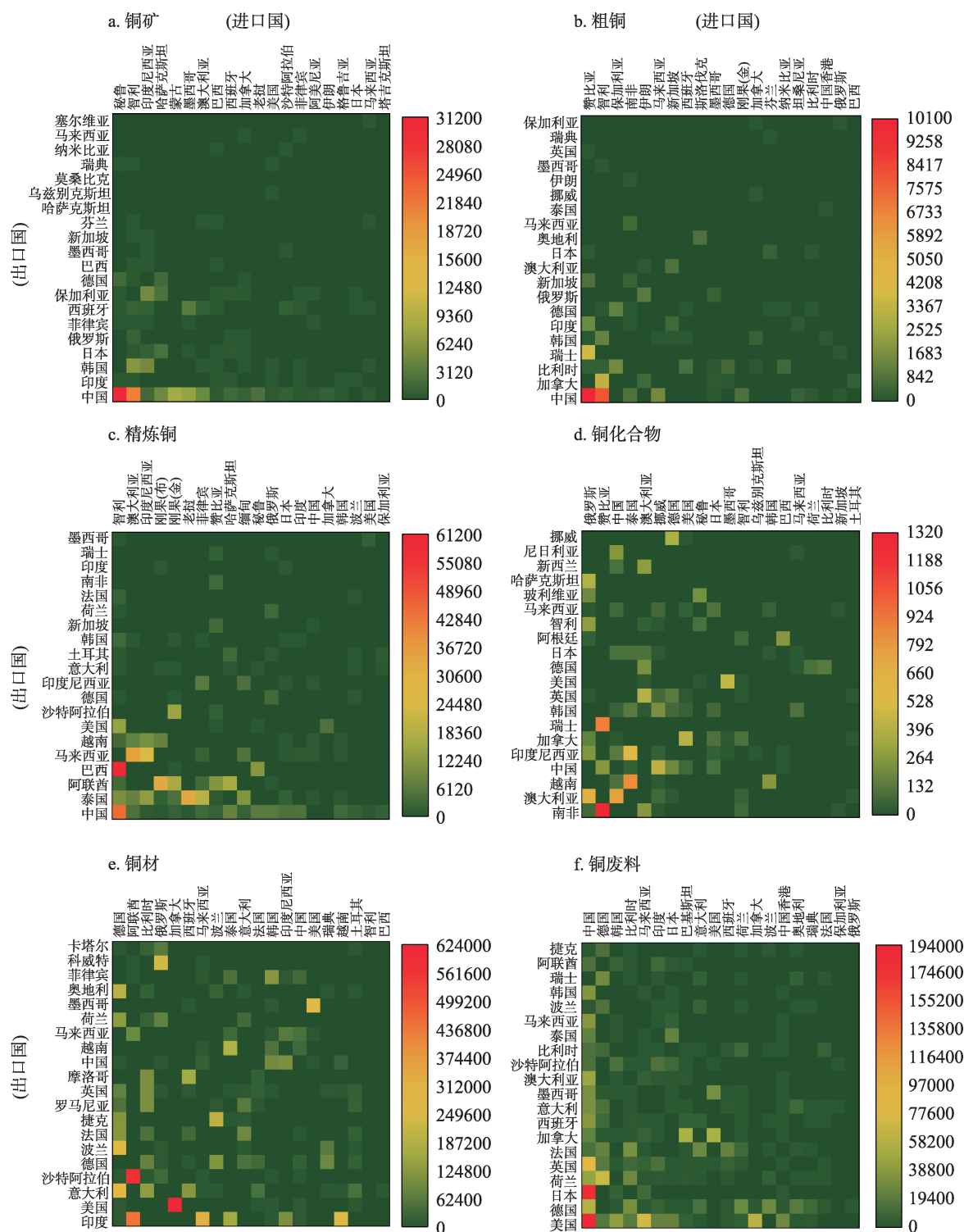


图8 2018年铜资源产品的主要贸易隐含环境流情况

Figure 8 Major embodied environmental flows in the international trade of copper resource products, 2018

注:此热力图反映了各铜资源产品国际贸易中主要国家间的隐含环境流流动情况。纵轴表示隐含环境流的主要流出国(或地区)或环境影响的主要出口国(地区),横轴表示隐含环境流的主要流入国(或地区)或环境影响的主要进口国(地区);每一个矩阵方块的颜色代表隐含环境流的大小,由绿色渐变至红色,颜色越偏向红色系则表明隐含环境流越大,越偏向绿色系则表明隐含环境流越小。因篇幅限制,此处仅展示贸易隐含环境流大小在前20名的出口国与进口国的隐含环境流流向及大小情况。



的典型隐含环境流;铜化合物贸易中的隐含环境流分布较为分散,以“南非、瑞士→赞比亚”“澳大利亚→俄罗斯、中国”“越南、印度尼西亚→泰国”等最为显著;在具有较高附加价值且位于产业链中下游的铜材产品贸易中,则在北美、亚洲及欧洲主要形成了“美国→加拿大”“印度、沙特阿拉伯等→阿联酋、马来西亚等亚洲其他国家”以及“欧洲其他国家→德国”的隐含环境流;铜废料的国际贸易中,则形成了“美国、日本等发达国家→中国、马来西亚等亚洲发展中国家”以及“其他欧洲发达国家→德国”的典型隐含环境流流动链。

## 4 结论与启示

### 4.1 结论

本文提出了产品层面的国际贸易多环境影响及隐含环境流的核算方法与框架,以铜为例,分析了资源产品国际贸易所带来的主要环境影响类别,以及各国的环境影响变化及其来源。主要结论如下:

(1)不同类型铜资源产品生产加工的环境影响类别差异较大,不同国家或地区工艺技术的环境影响程度与类别亦有所不同,总体上,欧洲所采用工艺技术的各类环境影响潜值相对较小。在铜资源产品生产加工及处理处置的环境影响类别中,非生物性资源耗损、生态毒性和人体毒性等3类环境影响是主要的环境影响类别,占比60%以上,全球变暖的环境影响占比相对较低,占比不足0.05%。这说明,仅应用碳排放或温室气体排放作为贸易环境影响进行判断会使得其他环境影响类别被忽略,带来较大偏差,应从多环境要素的角度予以综合分析。

(2)不同类型金属资源产品国际贸易对全球及各国的环境影响不尽相同,金属原材料产品的国际贸易是环境影响增加的主要来源,且主要由经济水平相对较低的原材料分布国家承担。铜资源产品的国际贸易带来了全球环境影响的显著增加,其中,约97%的环境影响增加来源于铜矿、粗铜、精炼铜等原材料产品,主要由智利、秘鲁、赞比亚等原料国承担;铜废料的国际贸易产生的环境影响增加占总增加的3%,主要由中国、印度等铜资源相对短缺且处于经济发展与建设阶段的发展中国家承担。

(3)伴随资源产品国际贸易所形成的隐含环境

流具有与产业链特征及地理分布特征相似的规律,分别在不同经济发展水平的国家群体中形成了群体内部和群体间的环境影响转移链。在铜资源产品国际贸易所形成的隐含环境流中,德国既是欧美发达国家群体中隐含环境流的主要目标国家,亦是经济水平相对较低的发展中国家群体的隐含环境流主要来源国家;而经济水平相对较高的发展中国家亦具有类似的隐含环境流链条上的地位,承担了较为关键的环境影响中转作用,使得大量环境影响在这一隐含环境流链条中不断累积,最终由经济发展水平较低的国家承担了较高的环境负担,尽管实现了高经济发展水平国家群体的经济效率,但也同时加剧了低经济发展水平国家群体的环境不公平性。

### 4.2 启示

上述研究结果表明,在针对资源产品的国际贸易环境政策制定过程中,应实现环境要素与产品类别的双重差异化管理。

(1)在环境要素的差异化管理方面,传统仅应用碳排放或温室气体排放作为贸易环境影响进行判断会使得其他环境影响类别被忽略,带来较大决策偏差。因此,在各国制定与金属资源产品贸易相关的碳减排政策时,应充分考虑到金属资源产品生产加工的多环境影响特性,针对主要的环境影响类别,实施相应的技术革新与政策规划。

(2)在产品类别的差异化管理方面,从产业链的角度分析,基本呈现原材料产品低附加值高需求量、加工程度较高的中下游产品具有较高附加值的规律。而从本文对铜资源产品的国际贸易隐含环境流的分析发现,对全球环境可持续性带来负贡献的主要是原材料产品贸易。原材料生产国主要是经济水平相对较低的国家,生产技术及环境治理水平相对落后,原材料产品的大量出口尽管可以带来一定的经济效益,但其生产加工过程所带来的环境影响导致的环境与健康成本往往超过其所获经济效益,且与其经济发展水平不相匹配。而这些环境影响主要来源于经济发展水平相对较高的国家,造成了较大的环境不公平性。为改善这种环境不公平性,促进国际贸易的环境可持续发展,一方面,可以通过在关税等具有产品清单的贸易政策中,将环境成本作为税率制定与定价博弈的关键因素,通过

2021年3月

市场机制控制环境影响向经济水平较低国家的转移;另一方面,作为享受环境效益的国家,应承担相应的环境责任,在输出环境影响的同时也输出清洁生产技术与资金支持,促进环境不公平性的改善,形成良性的贸易合作模式。

## 5 研究展望

本文揭示了资源产品贸易中产品层面、多环境要素的综合环境影响的国别差异,指出在贸易环境政策制定过程中精细化管理与多要素管理的重要性。但仍存在一定的不足,需要在未来的研究中予以改进。

本文存在的不足在于所选用各国工艺技术水平与能源消耗水平可能存在区域性误差。在对各国各类别铜资源产品的生产以及废料的处理处置工艺技术设定上,本文作出了区域性替代以及上游产品均为国内来源的基本假设。但在现实的情景中,如亚洲等区域范围内,各主要铜资源生产国所应用的工艺技术可能存在较大差异。采用区域性的平均工艺技术水平与污染排放水平,尽管对上游能源消耗的环境影响予以区分,但不同国家之间仍存在着一定差异。且由于目前全球化程度较高,实际情况中,产品生产产业链各个环节的原料来源各不相同,最终的分析结果会与实际情况有一定偏差。此外,对环境影响的分析中并未考虑运输过程的环境影响,亦需对其改进。

在后续的深入研究中,可从以下2个角度展开进一步的分析与探讨:

(1)应在资源和环境两个维度的基础上,进一步从产业链的角度纳入经济维度的分析,对原生资源生产产业链、再生资源生产产业链、贸易产品进入本国市场后的产业链进行资源-环境-经济的综合效益对比分析,通过多层网络分析的方法识别不同产业链在3个维度上的价值传递机制。

(2)进一步将世界各主要国家发布的战略性矿产资源清单所涉及的所有金属资源类别纳入研究范围,并对交通、机械、电力电子等行业的终端产品进行核算,明确各国在战略性金属资源贸易隐含环境流网络中的重要性地位并判断可能的政策选择,为中国战略性金属资源发展的国内布局与产品级的贸易策略提供支撑。

## 参考文献(References):

- [1] Wiedmann T. A first empirical comparison of energy footprints embodied in trade: MRIO versus Plum[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1975–1990.
- [2] European Commission. A European Green Deal[EB/OL]. (2019–11–11) [2020–08–16]. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
- [3] Wiedmann T, Wilting H, Lutter F S, et al. Development of a Methodology for the Assessment of Global Environmental Impacts of Traded Goods and Services[R/OL]. (2009–08–07) [2020–06–22]. [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/SCHO1009BRAM\\_e\\_e.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/SCHO1009BRAM_e_e.pdf).
- [4] Sato M. Product level embodied carbon flows in bilateral trade[J]. *Ecological Economics*, 2014, 105: 106–117.
- [5] Sato M. Embodied carbon in trade: A survey of the empirical literature[J]. *Journal of Economic Surveys*, 2014, 28(5): 831–861.
- [6] Peters G P, Hertwich E G. CO<sub>2</sub> embodied in international trade with implications for global climate policy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(5): 1401–1407.
- [7] Duarte R, Pinilla V, Serrano A. Factors driving embodied carbon in international trade: A multiregional input–output gravity model[J]. *Economic Systems Research*, 2018, 30(4): 545–566.
- [8] 赵玉焕, 郑璐, 刘似臣. 全球价值链嵌入对中国出口贸易隐含碳的影响研究[J]. *国际贸易问题*, 2021, (3): 142–157. [Zhao Y H, Zheng L, Liu S C. Impact of participating in global value chains on carbon emissions embodied in China's exports[J]. *Journal of International Trade*, 2021, (3): 142–157.]
- [9] Yang R R, Long R Y, Yue T, et al. Calculation of embodied energy in Sino–USA trade: 1997–2011[J]. *Energy Policy*, 2014, 72: 110–119.
- [10] 余晓泓, 彭雨舸. 国际贸易中的隐含碳: 文献综述[J]. *技术经济*, 2015, 34(1): 109–116. [Yu X H, Peng Y G. Carbon embodied in international trade: Literature review[J]. *Journal of Technology Economics*, 2015, 34(1): 109–116.]
- [11] 韩梦瑶, 熊焦, 刘卫东. 中国跨境能源贸易及隐含能源流动对比: 以“一带一路”能源合作为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(11): 2674–2686. [Han M Y, Xiong J, Liu W D. China's cross-border energy relations between direct trade and embodied transfers: Based on "the Belt and Road" energy cooperation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(11): 2674–2686.]
- [12] Shepard J U, Pratson L F. Hybrid input–output analysis of embodied energy security[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115806.
- [13] 李永源, 张伟, 蒋洪强, 等. 基于MRIO模型的中国对外贸易隐含大气污染转移研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 889–896. [Li Y Y, Zhang W, Jiang H Q, et al. Transfers of air pollutant emissions embodied in China's foreign trade based on MRIO model[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 889–896.]
- [14] Li C S, Liu B H. Air pollution embodied in China's trade with the BR countries: Transfer pattern and environmental implication[J].

- Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119126.
- [15] 陈炜明. 全球贸易及其结构变化对各国经济和资源环境影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [Chen W M. Study on the Impact of Global Trade and Its Structure Change on National Economy and Environment[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.]
- [16] 张弦, 陆双平. 聚焦新时代中国铜产业发展: 2019中国铜产业链发展高峰论坛召开[N/OL]. (2019-07-16) [2020-08-25]. <https://paper.cnmm.com.cn/Content.aspx?id=150601&q=4281&v=1>. [Zhang X, Lu S P. Focus on China's Copper Industrial Development in the New Era: The Convening of the Summit Forum of China's Copper Industrial Chain Development in 2019[N/OL]. (2019-07-16) [2020-08-25]. <https://paper.cnmm.com.cn/Content.aspx?id=150601&q=4281&v=1>.]
- [17] 智研咨询. 2020年疫情对中国铜行业发展的影响: 中国铜资源对外依存度高, 短期错配, 基本面强劲[N/OL]. (2020-06-16) [2020-07-03]. <http://www.chyxx.com/industry/202006/874398.html>. [Intelligence Research Group. Impacts on China's Copper Industrial Development from COVID-19 in 2020: High Foreign Dependence, Short-Term Mismatch, and Strong Fundamentals[N/OL]. (2020-06-16) [2020-07-03]. <http://www.chyxx.com/industry/202006/874398.html>.]
- [18] ISO. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework: ISO 14040: 2006[S/OL]. (2006-07) [2020-06-23]. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- [19] Thinkstep. Description of the CML 2001 Method[R/OL]. (2006-07) [2020-11-28]. <http://www.gabi-software.com/international/support/gabi/gabi-lcia-documentation/cml-2001/>.
- [20] CML—Department of Industrial Ecology. CML—IA Characterisation Factors[R/OL]. (2016-09-05) [2020-07-21]. <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>.
- [21] Thinkstep. ReCiPe[R/OL]. (2012-12) [2020-11-28]. <http://www.gabi-software.com/international/support/gabi/gabi-lcia-documentation/recipe/>.
- [22] Thinkstep. Description of the TRACI Method[R/OL]. (2020-01) [2020-11-28]. <http://www.gabi-software.com/international/support/gabi/gabi-lcia-documentation/traci/>.
- [23] Guinée J B, Gorée M, Heijungs R, et al. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [24] Thinkstep. Gabi 9.2 Software and Database[R]. Germany: Sphera, 2020.
- [25] Ecoinvent Association. Ecoinvent Database[R/OL]. (2020-01) [2020-07-21]. <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>.
- [26] 赵波, 周遵波, 段绍甫. 中国铜业[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014. [Zhao B, Zhou Z B, Duan S F. China Copper Industry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.]
- [27] International Copper Study Group. The World Copper Factbook 2020[R/OL]. (2020-09-21) [2020-10-08]. <http://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/3046>.
- [28] 刘志宏. 中国铜冶炼节能减排现状与发展[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(5): 1-12. [Liu Z H. Current situation and development of energy saving and waste reduction in Chinese copper smelting industry[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(5): 1-12.]
- [29] Glöser S, Soulier M, Tercero L. Dynamic analysis of global copper flows, global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(12): 6564-6572.
- [30] Pfaff M, Glöser-Chahoud S, Chrusasik L, et al. Resource efficiency in the German copper cycle: Analysis of stock and flow dynamics resulting from different efficiency measures[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 139: 205-218.
- [31] Soulier M, Pfaff M, Goldmann D, et al. The Chinese copper cycle: Tracing copper through the economy with dynamic substance flow and input-output analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 435-447.
- [32] Wang J B, Ju Y Y, Wang M X, et al. Scenario analysis of the recycled copper supply in China considering the recycling efficiency rate and waste import regulations[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 146: 580-589.
- [33] Zhang Y L, Sun M X, Hong J L, et al. Environmental footprint of aluminum production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1242-1251.
- [34] Ciacci L, Fishman T, Elshkaki A, et al. Exploring future copper demand, recycling and associated greenhouse gas emissions in the EU-28[J]. Global Environmental Change, 2020, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102093.
- [35] Soulier M, Glöser-Chahoud S, Goldmann D, et al. Dynamic analysis of European copper flows[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 143-152.
- [36] Tanimoto A H, Gabarrell-Durany X, Villalba G, et al. Material flow accounting of the copper cycle in Brazil[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 55(1): 20-28.
- [37] Van Beers D, Bertram M, Fuse K, et al. The contemporary African copper cycle: One year stocks and flows[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(3): 147-162.
- [38] Kapur A, Bertram M, Spataro S, et al. The contemporary copper cycle of Asia[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2003, 5(2): 147-162.
- [39] 王冲, 杨坤彬, 华宏全. 废杂铜回收利用工艺技术现状及展望[J]. 再生资源与循环经济, 2011, 4(8): 28-32. [Wang C, Yang K B, Hua H Q. Current status and prospect of recovery and utilization process for copper scrap[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2011, 4(8): 28-32.]



# Environmental impacts and embodied environmental flows of the international trade of resource products: A case study of copper

DI Jinghan<sup>1,2</sup>, WEN Zongguo<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Under the background of globalization, while the large scale international trade reallocates resources among countries, it also transfers significant environmental impacts. With the increasing global environmental requirements in trade negotiation and competition, the original evaluation method for embodied environmental flows based on single environmental element from the perspective of countries or industries no longer can meet the requirements of the current trend for delicacy management. Therefore, this research used the Life Cycle Assessment method and established an updated evaluation system for the environmental impacts of trade and embodied environmental flows at the product level, through the whole life cycle and considering multiple environmental elements. This research took copper resource as an example. To evaluate the change of environmental impacts and embodied environmental flows in the international trade of copper products, we chose the 2018 trade data and environmental impact data for 6 categories of copper resource products. The results indicate that large differences exist between the specific environmental impacts of producing and manufacturing various resource products, environmental impact changes in different countries, and the regulation of embodied environmental flows in the trade. The international trade of copper products brought significant increase of global environmental impacts. About 97% of the increase came from the trade of raw material products such as copper mine, blister copper, and refined copper, which was mostly burdened by countries with copper resource endowment. The rest 3% of the global environmental impact increase was from copper scrap trade, whose environmental burden was borne by developing countries such as China. Overall, it formed a chain of global environmental impact transfer from “developed countries→developing countries such as China and India→other developing countries”. Based on these results, we suggested that during the international trade negotiation and environmental policy-making processes, countries should sufficiently consider multiple environmental elements as well as the economic development levels and apply discrepant management for different types of resource products.

**Key words:** environmental impacts of trade; Life Cycle Assessment; embodied environmental flows; copper resource products; delicacy management