

引用格式:张玲,冉文春,袁增伟.人类圈铜循环格局演变及趋势[J].资源科学,2021,43(3):513-523.[Zhang L, Ran W C, Yuan Z W. Evolution and prospects of anthropogenic copper cycles[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 513-523.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.08

人类圈铜循环格局演变及趋势

张玲¹,冉文春¹,袁增伟²

(1. 南京林业大学经济管理学院,南京 210037;

2. 南京大学环境学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,南京 210023)

摘要:铜是支撑人类经济和社会发展的重要金属之一,人类活动主导了地球上的铜资源循环过程。本文基于文献成果,运用元素流分析方法,从总体循环格局、关键铜流演变过程、社会存量时空变化和铜循环的未来可持续性4个方面,系统分析了1910—2018年人类圈铜循环格局的动态演变及未来趋势。结果表明:①在过去的一个世纪中,人类圈铜循环强度显著增加,累计约有821.8 Tg铜资源从岩石圈中进入人类圈,其中约一半的铜以社会存量形式存储在社会经济系统中,另有381.7 Tg在铜循环各个过程中被损耗;②从关键铜流的区域演变过程看,人类圈铜循环已从之前的美洲为主导,转变为20世纪90年代起至2018年的亚洲为绝对主导;③铜社会存量的空间格局特征表明铜矿资源经开发利用后,在人类圈进行了空间再分配,经济发达地区累积了更多社会存量;④截至2050年,人类圈铜资源的供给能否满足持续增长的需求仍存在一定不确定性。本文最后从矿铜和再生铜两方面给出了提高铜资源供给能力的主要方向。

关键词:铜循环;人类圈;资源利用;社会存量;可持续性

DOI: 10.18402/resci.2021.03.08

1 引言

铜是人类社会使用量最大的3种金属之一(仅次于铁和铝),被广泛应用于基础设施、机械/电子设备、建筑和交通系统中,为人类社会的发展作出了重要贡献。与碳、磷、硫等其他元素不同,人类活动主导了金属元素的迁移过程,而铜是唯一一种在人类圈的迁移规模远超自然圈的金属^[1-3]。人类圈指以人类为自然实体的地球圈层,它的基本组成是地球上的人类、人造产品、文化、以及同人类关系密切相关的人与人之间的关系^[4]。铜在人类圈的一系列迁移、转化和储存构成了人类圈的铜循环过程,也称为铜代谢过程。量化人类圈金属循环格局有助于系统理解人类活动对自然界金属循环系统的影响,铜则是受关注度最高的金属之一^[1,2,5-7]。元素流分析(Substance Flow Analysis, SFA)为解决“如何定

量分析金属循环格局”这一科学问题提供了答案^[8]。耶鲁大学流量与存量项目组(Stocks and Flows, STAF)在2002年的研究中应用元素流分析建立了分析框架来量化金属在人类圈的循环过程^[9]。此后,针对不同区域开展的铜循环流量分析^[10-14]和铜社会存量(即 in-use stocks, 也有研究称为“在用存量”或“在役存量”)估算研究^[15-18]大量出现,为理解人类圈铜循环过程奠定了坚实基础。然而,在人类活动驱动下,铜循环格局发生了怎样的演变?目前针对该科学问题的研究多局限于人类圈铜循环的局部过程,缺乏对其循环格局的整体刻画和分析。据此,本文运用元素流分析方法,基于前期文献成果,重建近百年来的人类圈铜循环格局,分析其演变过程及未来趋势,以期对未来铜资源可获得性、铜资源可持续利用和城市铜矿产开采等各方面研

收稿日期:2020-10-09,修订日期:2020-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41971259);教育部人文社会科学基金项目(19YJCZH252)。

作者简介:张玲,女,山东日照人,博士,副教授,研究方向为资源环境管理研究。E-mail: zhangling01@126.com

通讯作者:袁增伟,男,河南平顶山人,博士,教授,研究方向为物质循环及其环境效应研究。E-mail: yuanzw@nju.edu.cn

究提供科学基础。

2 人类圈铜循环总体格局

铜在人类圈社会经济系统中的循环过程主要包括开采、冶炼、加工制造、社会使用和废铜回收处理5个过程(也有研究也将前2个过程合并称为生产过程)^[9,19],因此人类圈铜循环分析框架主要由上述铜生命周期过程、岩石圈、自然环境以及连接这些过程和介质的各铜流组成。已有研究表明,20世纪全球铜产量占1800—2000年间总量的90%^[2],意味着20世纪以后人类圈铜循环的强度开始加剧。因此,本文以1910—2018年作为铜循环刻画的时间范围。

岩石圈中的铜矿石经开采后进入人类圈,经选矿、冶炼、加工等一系列过程形成含铜最终产品。这些含铜最终产品会进入社会使用阶段,成为“铜社会存量”,在社会经济系统中提供各种功能和服务。经过不同年限的产品服役期后,社会存量将陆续变为废弃产品,这些产品有些被回收后再次进入铜循环过程(称为旧废铜,可进入冶炼或者加工制造环节),有些则被废弃或成为“休眠存量”(指虽已废弃但并未被有效回收的存量部分)。理论上,铜损失会发生在其生命周期的各个阶段,但实际数据表明,铜损失主要发生在采矿、冶炼和废铜回收处理3个环节,加工制造阶段的废铜(称为新废铜)一般被内部回收利用,而社会使用环节的耗散性损失非常小,仅占总损失量的0.3%左右^[20-23],一般忽略不计。

基于国际铜研究组(International Copper Study Group, ICSG)的全球铜生产统计数据^[20]和Glöser等^[24]的全球废铜回收利用数据,本文重建了如图1所示的1910—2018年人类圈铜循环累计格局,并进一步刻画了该循环中关键铜流的演变过程(图2)。

图1表明,自1910至2018年,约有821.8 Tg铜资源从岩石圈中被开采进入人类圈,这一规模与2018年全球铜资源储量830.0 Tg基本相当;约有440.1 Tg铜以社会存量形式存储在社会经济系统中;另有约381.7 Tg铜损耗在采矿、冶炼和废铜回收处理过程,其中废铜回收处理过程损失约占总量56%,与Kapur^[25]的估算结果一致。

全球累积铜社会存量从2000年的311.0 Tg^[26]增至2018年的440.1 Tg,呈现持续增长态势,且其

当前规模已占到全球铜资源储量的53%。与岩石圈中相对有限的铜矿资源不同,这一铜资源社会存储库可以持续地输出具有再生潜力的废铜资源,因此可对未来的铜资源可持续利用起极为重要的作用。另一方面,废铜回收处理这一阶段的铜损失占到累积社会存量的一半,表明目前全球的废铜回收管理仍然任重道远,尤其是表现为“休眠存量”的损失需引起高度重视。

从精炼铜生产的原料组成看,铜矿石、旧废铜和新废铜分别占84%、14%和2%。这一结果与Graedel等^[22]对1994年全球铜循环的研究结果接近,

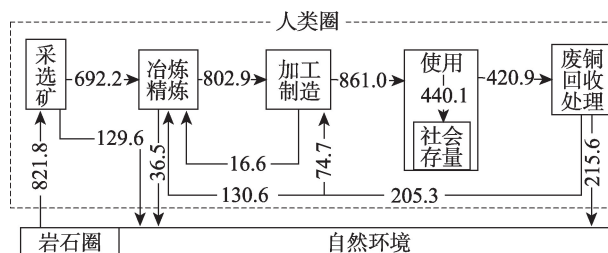


图1 1910—2018年人类圈铜循环累计格局

(单位:Tg,即百万t)

Figure 1 Pattern of accumulated global anthropogenic copper cycle, 1910-2018

注:铜循环图中流量规模为按照不同含铜产品的用铜强度折算出的铜元素量,用铜强度数据来源于文献[12]和[24],以下同。

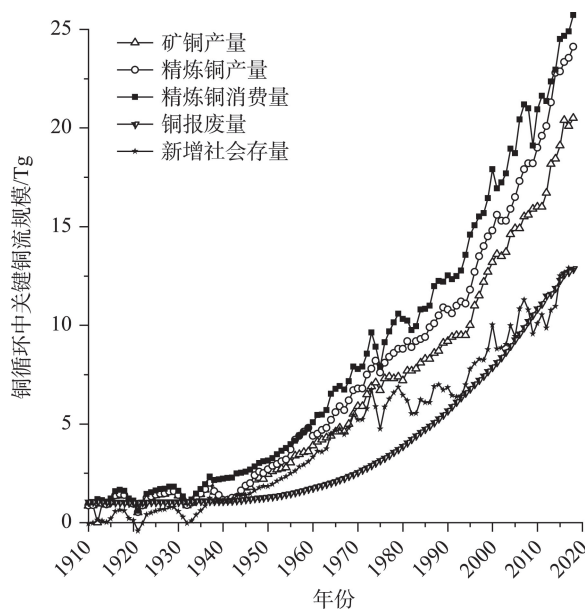


图2 1910—2018年人类圈铜循环中关键铜流演变过程

Figure 2 Evolution of key flows in global anthropogenic copper cycle, 1910-2018

2021年3月

意味着全球铜生产的原料格局在过去一个多世纪中保持相对稳定。从满足人类圈铜需求的角度来看,约有1/5来自废铜资源。尽管废铜回收利用已成为共识,但目前全球铜生产对铜矿石的绝对依赖仍未改变。

从图2来看,除社会使用环节的“新增社会存量”在整体增长趋势中有较为明显的波动外,其他铜流几乎都呈相对稳定的上升趋势。新增社会存量的波动一般与当年的石油危机、经济萧条、生育高峰和工业发展等因素有关。对于稳定增长的铜流,以精炼铜消费量为例,其综合年均增长率为3.1%;而全球人均铜消费量从1910年的0.57 kg增至1950年的1.23 kg,再增至2018年的2.95 kg,增加了4倍多。考虑到该指标在一定程度上可表征历年新增社会财富,因此这一增势反映了人类在最近100多年取得的巨大社会发展。此外,从反映再生铜原料供给潜力的指标——铜报废量来看,尽管其也呈现稳速增长趋势,但与原生铜原料(即矿铜)规模的差距明显,且趋势并未改变。

3 关键铜流的时空格局演变

3.1 区域/国家层面的铜流格局

基于 Graedel 等^[22,27]对 1994 年全球铜循环的研究成果、ICSG 统计数据^[20]和美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)统计数据^[28],选择 1994 年和 2018 年两个时间断面,以矿铜产量、精炼铜产量和精炼铜消费量这 3 条铜流在全球主要区域的规模比例(%)来分析 20 世纪 90 年代至 2018 年人类圈铜循环的时空格局演变(图 3)。

20 世纪 90 年代,矿铜生产的主要地区为南美

洲、北美洲和亚洲。精炼铜生产环节主要发生在亚洲、欧洲和北美洲,且 3 个地区份额差别不大。同时,这 3 个地区也是当时全球铜消费的主要区域,累计占全球消费总量的 90%以上,其中亚洲以占 37% 居首位。

经过 25 年的发展,全球矿铜产量从 1994 年的 10.7 Tg 增至 2018 年的 20.5 Tg,增幅达 91%;而区域基础设施建设和经济增长速度的差异造成了全球铜循环空间格局的变化。从矿铜产量的空间分布看,2018 年亚洲跃居为全球第二大生产区域,产量仅次于南美洲,其次为北美洲和欧洲。精炼铜生产环节也体现了与 20 世纪 90 年代不一样的特征,即亚洲跃升为全球精炼铜生产的主要地区,占全球总量的 56%。而从铜消费的区域分布来看,自 90 年代起亚洲成为铜消费巨头的格局被进一步强化,至 2018 年已高达 70%;与此同时,欧洲和北美洲份额有所下降,尤其是北美洲下降明显。

对比全球不同区域在这 3 个环节的铜流规模比例,可以识别这些区域在全球铜循环中所承担的角色。南美洲是人类圈铜矿最丰富的地区,在全球铜循环中承担主要的开采者和出口者角色;亚洲目前是全球主要的铜开采者、最大的生产者和最大的消费者。欧洲总体上各环节铜流比例特征与亚洲类似,但在铜流规模上小很多^[29,30],虽然该区域有部分铜矿资源,但由于其需求高于内部资源供给,因此在消费环节也高度依赖进口。最后,北美地区内部的铜循环在开采、生产和消费 3 个环节相对均衡。

进一步将铜循环格局细化至国家层面,可以发现,少数几个国家的铜循环格局在很大程度上决定

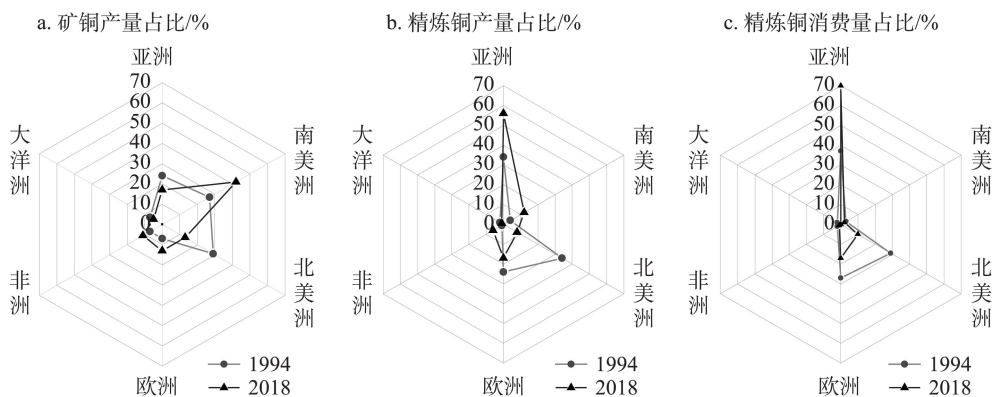


图3 典型时间断面主要铜流区域格局

Figure 3 Pattern of key flows at the regional level for typical years

了全球的空间格局,从而造成了区域的非均衡性。例如,20世纪90年代全球铜矿开采的主要国家为智利和美国,而2018年铜矿开采全球前4位分别是智利、秘鲁、中国、美国,解释了南北美洲和亚洲在铜生产环节的突出表现。精炼铜生产和消费环节也是如此,自20世纪90年代起亚洲在这两个环节的突出地位主要由中国的高速发展所造就。这一阶段的中国铜循环体现出了一个全面、高速发展的工业经济体特征^[12,19],在铜生产和消费上均成为全球第一大国。

国家层面的铜循环特征与该国的资源禀赋、经济发展水平、国民财富和社会习俗等因素有关,而后几个因素决定了该国对铜资源的消费需求。2017年全球主要铜消费国家(排名前23)的人均铜消费情况如图4所示(各国铜消费量数据来源于ICSG统计数据,GDP数据来自于World Development Indicators)。可以看出,发展中国家当前的铜资源人均消费水平总体上低于发达国家,而未来随着这些国家经济、社会发展水平的提高,对铜资源的需求将逐步提高,从这个意义上说,全球铜消费仍有较大的增长空间。

3.2 铜贸易流的时空格局

由于不同区域/国家资源禀赋和消费需求之间

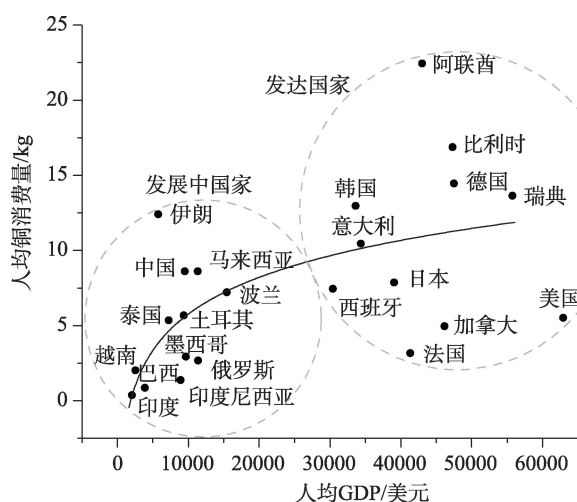


图4 2017年全球主要铜消费国家的铜消费水平

Figure 4 Refined copper consumption of major countries of consumption, 2017

注:①由于2018年各国铜消费数据目前不可获得,因此以2017年数据进行分析;②图中发达国家和发展中国家的划分依据为联合国统计司的《地区和国家分类标准》。

的不平衡,铜贸易流(即含铜产品的贸易往来)是区域层面上铜循环中不可或缺的部分,在很大程度上弥补了铜矿资源禀赋的空间不均衡。ICSG统计显示,全球铜贸易流主要涉及铜精矿、精炼铜、铜材和旧废铜四大类产品。基于联合国贸易统计数据库(United Nations Commodity Trade Database, UN Comtrade),以这四大类产品的出口情况来大致衡量1962—2018年间全球铜贸易状况(1910—1961年的国际贸易数据无法获取)。

以这4类产品的出口净重含铜量来评估全球铜贸易规模,可以发现,随着经济全球化的纵深推进,全球铜贸易规模不断扩大。出口产品含铜量从1962年的1.4 Tg增至2018年的23.1 Tg,年均增速为5%,且其当前贸易规模已接近全球原生精炼铜产量(24.1 Tg)。

1962—2018年,参与全球铜精矿、精炼铜、铜材和旧废铜4类产品贸易的国家数量均保持持续增长(分别增长了2~7倍),国家之间的贸易网络也愈加复杂。并且,贸易含铜产品在铜生命周期中所处的阶段越靠后,参与贸易的国家越多,贸易网络结构越复杂(例如,2018年参与铜材贸易的国家数量为142个,远多于参与铜精矿贸易的国家85个);且美国、德国、意大利、日本等发达国家也往往在铜生命周期后端阶段产品的国际贸易中参与更多,与全球铝贸易表现出来的特征一致^[31]。

此外,全球铜贸易格局呈现了明显的空间非均衡性,总体上表现为铜资源从欠发达国家流向工业化国家和快速工业化国家,这也与前人针对20世纪90年代以及2014年全球铜贸易的研究结果一致^[32,33]。从区域看,大洲内部贸易网络以北美洲、欧洲和亚洲(尤其是东亚地区)最为突出,这与全球精炼铜生产和消费格局一致。发达国家美国、日本和德国曾经是全球贸易网络的中心;20世纪90年代后,中国作为亚洲的快速工业化国家,成为全球最大的铜进口国和全球铜贸易网络中心。

4 铜社会存量的时空格局演变

4.1 铜社会存量的空间格局

近20年,不同空间尺度的铜社会存量核算取得了丰富的研究成果^[34-38]。一个国家的金属社会存量水平受很多因素影响,而其与该国经济发展水平的正向相关关系被广泛认可^[26,39]。因此,本文基于已

2021年3月

有的国家层面铜社会存量核算结果,采用线性回归模型拟合了全球人均铜社会存量与人均GDP的关系($y=230.68x$, $R^2=0.94$, 人均GDP数据来源于World Development Indicators^[40]),并基于该线性相关关系进一步估算了2018年全球不同国家铜社会存量的总量、人均量和空间分布密度格局(图5)。

结果表明(图5a),全球铜社会存量达531 Tg(由于核算方法和所依赖数据的来源及类型差异,该结果比本文第2部分结果高20%)。排名前10位的国家铜社会存量合计占全球总量的62%,可见其分布与铜矿资源一样存在着空间非均衡性。其中,中国居全球首位,占全球总量18%;位居第二的美国总量规模略低于中国但远高于其他国家。在排名靠前的其他国家中,除日本、德国、英国等发达国家外,印度、巴西和印度尼西亚这些人口和经济均快速增长的经济体也占较大份额。

人均铜社会存量的空间格局(图5b)则呈现出与总量不同的特征。总体来说,全球平均人均水平为72 kg,发展中国家人均水平在100 kg以下,而发达国家在160 kg以上。诸如卡塔尔、卢森堡和新加坡等几个国土面积小、经济发展水平高的国家,其人均量更高达400 kg以上,这一结果与Rauch估算的2000年全球铜社会存量的格局类似^[26]。2018年中国人均铜社会存量为66 kg,排在全球所有国家的中游略偏上位置,但数值水平略低于全球平均。

从不同国家铜社会存量的空间密度看(图5c),新加坡、巴林、马耳他、卡塔尔、荷兰、卢森堡这些具有高人口密度和高人均GDP的国家排在世界前列,而诸如中国和美国这些存量总量庞大的国家,虽然排在全球前1/3左右,但其空间密度值远低于前10名的国家。进一步结合其他关于铜社会存量空间密度分布的研究结论^[16,41,42],可知铜社会存量的空间密度分布主要取决于区域的人口密度和财富水平。

由于铜矿资源主要分布在南美洲和北美洲(二者合计探明储量约占全球62%)^[20],以上铜社会存量的空间格局特征表明,铜矿资源经人类开发利用后,在全球范围内进行了空间再分配。一方面,尽管铜社会存量较集中地分布在发达区域,但这一分配仍显著提高了铜资源的空间均衡性,从而提高了其在全球不同国家的可获得性。另一方面,随着铜矿资源的耗竭,铜社会存量这种“铜资源财富”向发

达区域的转移和积累特征对于全球未来资源安全具有长期影响,即对欠发达国家、尤其是矿产资源贫乏的欠发达国家来说,其未来铜资源的可持续供应可能存在更大风险。

4.2 铜社会存量的时间演变趋势

铜社会存量的时间演变过程反映了全球的经济和社会发展趋势。结合Rauch^[26]的研究结果可知,全球铜社会存量在过去的半个多世纪中增幅为680%;或者从人均水平看,2018年的72 kg约为1960年水平的3倍多。

不同国家人均铜社会存量的增长趋势解释了不同区域的发展动态。20世纪90年代,全球几乎所有国家都经历着铜社会存量的增长,表现为每年均有社会存量的净增量^[22];而对比前期研究结果^[6,37]和图5所示的估算结果可知:2000年以后,一些发达国家如美国、日本、德国、法国、英国和意大利等,其铜社会存量水平已趋于稳定,这一趋势也在相关研究中被验证^[11,43]。而对于以中国为代表的快速增长经济体来说,铜社会存量仍在迅速累积中,如中国人均铜社会存量从新中国成立时的低于1 kg^[18]增长至2018年的66 kg。

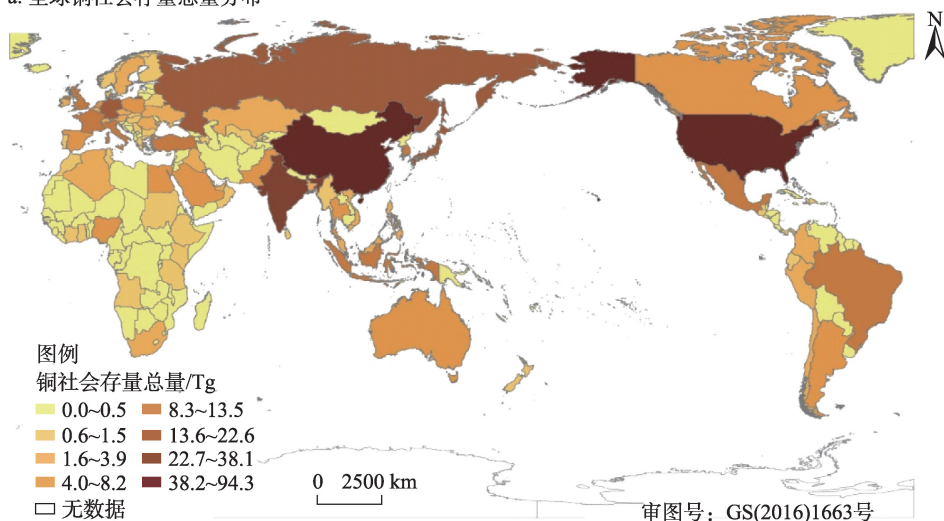
因此,不同国家铜社会存量的时间演变趋势可概括为:在中国、巴西等快速增长经济体中,铜社会存量表现为较低的人均水平和较高的增长速度;而成熟经济体(如美国、日本、德国等)的铜社会存量特征则正好相反,即具有相对高的人均水平,但存量随时间的增长幅度较小。究其原因,前一类国家其存量增长来自新的产品/服务需求以及功能的提升,而后的存量增长主要来自含铜产品/服务功能的维持和置换,这也意味着快速增长经济体中各铜社会存量子系统(耐用品、基础设施、建筑和交通)在达到稳定水平前仍有较大的增长空间。

5 铜循环的未来可持续性

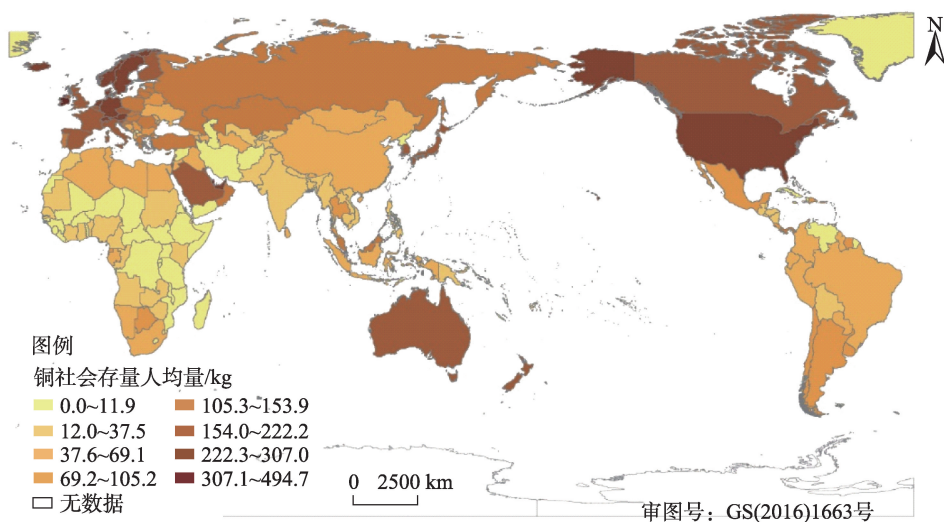
未来人类圈铜循环的可持续性取决于铜资源的需求和供给状况。考虑到铜资源在人类社会经济系统中的广泛应用,其未来需求与社会经济发展状况密切相关;而铜资源的供给源有两大类,即原生矿产资源和再生资源。

在全球层面上,耶鲁大学Graedel等^[44]和Nassar等^[45]对全球各类金属资源的危急程度研究表明,尽管铜资源在供给约束方面具有较高的脆弱性,但其

a. 全球铜社会存量总量分布



b. 全球铜社会存量人均量分布



c. 全球铜社会存量空间密度分布

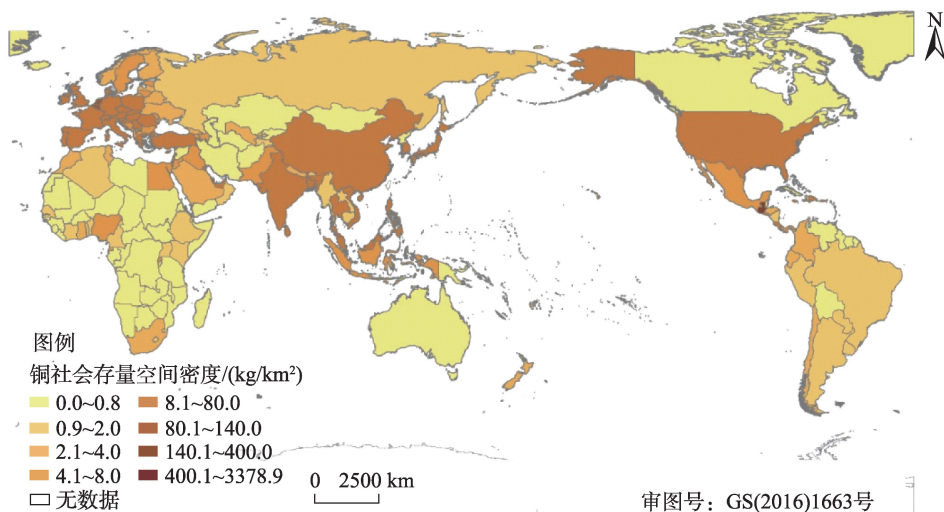


图5 2018年人类圈铜社会存量空间格局

Figure 5 Spatial pattern of anthropogenic copper in-use stocks, 2018

2021年3月

综合危急程度并不算高。然而,资源危急程度这一概念本身具有时间维度,因此,有必要在对供需两侧动态分析的基础上讨论人类圈铜循环的可持续性。

5.1 铜资源未来需求预测

全球铜资源未来需求取决于三大类因素,即全球人口增长情况、人均铜消费量水平(尽管在一定程度上会受消费偏好影响,但主要由逐渐提高的生活水准决定,常以人均收入来衡量),以及与含铜产品生产和服务功能提供有关的技术进步状况。首先,从人口数量增长来看,联合国发布的《世界人口展望》表明,全球人口将从2015年的73亿增至2050年的98亿。其次,从人均铜消费量来看(图4),发展中国家与发达国家之间仍存在明显差距。假设未来全球人均铜消费量最终趋于发达国家水平,则全球铜消费仍有显著增长空间。最后,从技术角度来说,尽管市场中铜替代材料已经在部分产品中得以应用,但由于技术及经济原因,铜资源在很多产品应用中具有不可替代性,即铜替代技术不会大幅度降低铜资源需求。基于上述分析可知,全球铜资源需求在未来一段时间将保持持续增长趋势。根据相关研究^[46-49],至2050年,铜消费量将增长至43~107 Tg/年之间。也就是说,虽然基于库兹涅茨倒U型曲线理论,未来的全球铜需求量理论上将从某个时间起逐渐趋缓甚至略有下降,但在中短期无法出现该拐点。

基于前文对全球不同国家铜社会存量的估算结果,未来全球铜消费的主要驱动力会来自目前人均存量较低、人口总量大且经济发展较强劲的区域,尤其是亚洲经济体在全球铜消费中的份额将继续增长。尽管近年来中国铜消费量增长趋缓,但参考近二三十年来中国的发展轨迹及铜消费趋势,人

口规模大的巴西和印度等国家的工业化和城镇化将带来全球铜消费量在基础设施和建筑等子系统的显著上涨。

5.2 矿铜资源供给潜力分析

矿铜资源供给潜力是一个具有时间维度的动态变化概念。而针对中短期的讨论,多以USGS界定的储量(Reserve)等信息为基础。根据USGS地质调查结果^[50],铜储量从1995年的310 Tg稳定增至2018年的830 Tg,而表征长期供应能力的指标如探明资源量,则基本保持在2100 Tg^[20,50];Elshkaki等^[48]的研究表明,21世纪中期全球矿铜生产潜力约为1062 Tg。

矿产数量的确定是供应能力评估的基础,而如何将储量转化为产量也是影响供应能力的重要方面,这一转化过程受矿物学、环境、政治、物流、经济等各种因素共同影响^[51]。若以国际智库经济与和平研究所发布的2018年全球和平指数(Global Peace Index, GPI)粗略代表各国资源供应的稳定性,2018年全球铜资源储量前10国家(其储量合计占全球总量的74%)的情况如表1所示,基本以中等和平程度及以上的国家为主(占全球总储量约60%)。因此可认为在中短期的时间维度上(截至21世纪中期),铜资源在目前生产规模下基本可以保证稳定供应。

5.3 再生铜供给潜力分析

由于铜是一种可回收的金属资源,因而再生铜在铜资源的供需平衡中发挥着越来越重要的作用。图1结果显示,1910—2018年,废铜满足了人类全部铜需求的20%左右。再生铜的生产原料——废铜并非来自地质矿石,而是来自人类圈^[26]。主要包括三大来源,即填埋地、社会存量和铜生产加工过程。

其中,社会存量报废被认为是废铜的最主要来

表1 全球主要铜资源储量国家的铜供应稳定性

Table 1 Copper supply security for major reserve countries

国家	储量占比/%	全球和平指数(GPI)	国家	储量占比/%	全球和平指数(GPI)
智利	20.5	高	墨西哥	6.0	低
澳大利亚	10.6	很高	美国	5.8	中
秘鲁	10.0	高	中国	3.1	中
俄罗斯	7.3	很低	刚果	2.4	低
印度尼西亚	6.1	高	赞比亚	2.3	高

源,无论是规模还是含铜强度都优于原生铜矿。未来废铜的供给潜力在很大程度上取决于当前和未来人类圈的铜社会存量规模,而其从社会存量中的被释放特征(主要指规模和速度)则由社会存量的在用时间分布、产品构成及产品相应的使用寿命分布共同决定。含铜产品的使用寿命一般在1~50年之间,如果大致认为平均使用年限为30年,则从全球铜消费的历史趋势来看,2030年以后从社会存量中释放的旧废铜规模和占比均会逐渐上升。相关研究认为^[48,52],至2050年左右再生铜的供给规模将在21~31 Tg/年之间,与目前的矿铜生产规模相当。

5.4 未来铜资源供需平衡分析及政策建议

结合以上分析可知,2010—2050年全球铜资源供需情况如图6所示。考虑到对铜资源需求的预测建立在对全球经济发展状况推断的基础上,因此可认为近几年开展的预测(即需求情景1-3^[46,48,49])结果相对更准确。并且,考虑到2019年全球铜资源消费量约为23.8 Tg,远低于需求情景4^[47]对2020年的预测结果,因此基于前3个情景认为中短期内铜资源需求量会稳定持续上升,截至2050年达42~76 Tg/年。

对铜资源供给潜力的估算,如前所述包括矿铜和再生铜两部分。矿铜供给方面,考虑到2018年全球生产规模为20.5 Tg,而相关研究认为未来矿铜生产峰值将出现在2030—2050年,年生产规模约为

25~27 Tg^[46,53,54],因此假定全球矿铜未来历年生产规模保持在23 Tg左右(根据这一假定,资源耗竭期约为36年,在地质学上可认为供应形势并不紧迫)。进一步结合前文提到的文献对再生铜未来产量的估算^[48,52],两者累加得到图6中所示的铜资源总供给潜力。数据表明铜资源未来总供给量也会持续上升,至2050年约达36~54 Tg/a。

综合以上对铜循环供需两端的未来趋势分析可知,截至21世纪中期的全球铜资源循环能否良性持续,存在一定的不确定性。为满足未来持续增长的铜消费需求,提高铜资源供给能力将是一个迫切议题,可从以下两个方面开展。

首先,加强铜矿资源评估和矿铜生产技术投资,提高矿铜供给能力。储量、基础储量、资源量等作为动态变化指标,其规模会随勘探技术的进步而增长,因此加强矿产资源评估已成为当前金属可持续利用领域的重大任务之一^[55]。除资源的物理数量限制外,铜矿资源的开采会对经济增长、人类发展以及向低碳社会的转变产生负面影响,从而给供给方面带来了越来越突出的社会和经济压力^[56]。因此在这个过程中,需要采取强有力的政府纠正性措施来保证矿产资源的可持续供应^[52]。

第二,提高废铜资源从社会存量中释放后的回收效率,以提高再生铜供给潜力。由于铜资源广泛分布在社会经济不同子系统的各类产品中(一般认为目前人类社会90%以上的产品均含铜),且不同产品回收难度不一,导致目前废铜平均回收率仅略高于50%^[43,54,57],在很大程度上限制了再生铜规模。如果将回收率提高至70%~90%,则能大大提高废铜原料的供给量。显然,这一效率的提升需要未来在含铜产品设计、回收观念与行为,以及回收技术上的巨大改变。总之,提高回收效率会逐渐成为关系到未来铜资源供给安全的重要问题^[52,58]。

对于在全球铜资源供需格局中作用举足轻重的中国来说,当前铜资源供需形势更加严峻,也需多措并举提高其保障水平。在矿铜供给能力建设方面,应加大国内勘察力度^[59],并通过政策和金融支持鼓励国内企业加强多边国际合作和海外投资;在再生铜供给能力建设方面,应继续大力推进“城市矿产”开发战略^[60],建立更加完善的废铜回收体系,

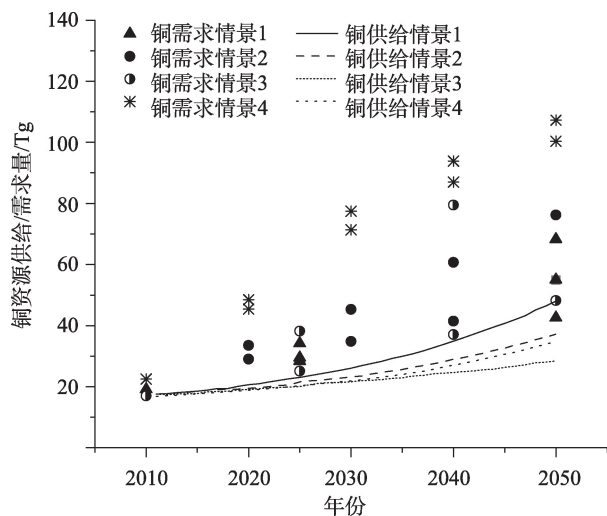


图6 2010—2050年人类圈铜资源供需情景分析

Figure 6 Overall copper supply-demand balance, 2010-2050

注:数据来源于文献[46-49]和[52]。

2021年3月

提高标准进口高品位废铜^[61]等。

6 结论

本文基于国内外铜循环相关研究结果,运用元素流分析方法,重建了1910—2018年的人类圈铜循环格局,分析了其演变过程及未来趋势。主要结论如下:

(1)1910—2018年人类圈铜循环的流量强度和存量规模持续稳定增加,这期间共有821.8 Tg铜从岩石圈中进入人类圈,其中440.1 Tg铜以社会存量形式存储在社会经济系统中,其余381.7 Tg在铜循环各个过程中被损耗。虽然全球铜消费对矿铜的供给仍具有绝对依赖,但应更加重视对铜循环过程中损耗铜资源的回收利用,尤其是旧废铜的回收利用。

(2)人类圈区域层面的铜流演变分析表明,自20世纪90年代起,亚洲作为全球主要的开采者、最大的生产者和最大的消费者,绝对主导了人类圈的铜循环。而亚洲对人类圈铜循环的绝对主导又主要由中国在这一阶段的高速发展所决定。铜循环中的贸易流也展示了相同特征,即90年代后中国成为全球最主要的铜贸易网络中心。

(3)人类圈铜社会存量格局是人类活动驱动下铜矿资源在人类圈再分配的结果。2018年铜社会存量格局分析表明,全球主要经济体的存量总量规模突出,而具有高人口密度和高人均GDP的国家其存量空间分布密度居世界前列;以人均水平来衡量,则发达国家与发展中国家之间体现出不同的动态演变特征和明显的梯度差异,发展中国家在达到稳定水平前仍有较大的增长空间。

(4)至2050年,人类圈矿铜基本可保证在当前生产规模下稳定供给,再生铜供给将持续增长至当前矿铜生产规模;但由于铜资源需求增长程度的不确定,铜循环能否良性持续存在一定的不确定性,应从矿铜和再生铜两个供给源共同提高铜资源供给能力。

参考文献(References):

[1] Rauch J N. Global spatial indexing of the human impact on Al, Cu, Fe, and Zn mobilization[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(15): 5728–5734.

[2] Klee R J, Graedel T E. Elemental cycles: A status report on human or natural dominance[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2004, 29: 69–107.

[3] Rauch J N, Graedel T E. Earth's anthropobiogeochemical copper cycle[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, DOI: 10.1029/2006GB002850.

[4] 陈之荣. 最新的地球圈层: 人类圈[J]. *地理研究*, 1997, 16(3): 95–100. [Chen Z R. Enwest geosphere: Anthroposphere[J]. *Geographical Research*, 1997, 16(3): 95–100.]

[5] Landner L, Reuther R. *Metals in Society and in the Environment* [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2006.

[6] Rauch J N, Pacyna J M. Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, DOI: 10.1029/2008GB003376.

[7] Rauch J N. The present understanding of Earth's global anthropobiogeochemical metal cycles[J]. *Mineral Economics*, 2012, 25(1): 7–15.

[8] 张玲, 袁增伟, 毕军. 物质流分析方法及其研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6189–6198. [Zhang L, Yuan Z W, Bi J. Substance flow analysis (SFA): A critical review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6189–6198.]

[9] Graedel T E, Bertram M, Fuse K, et al. The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles[J]. *Ecological Economics*, 2002, 42(1): 9–26.

[10] Tanimoto A H, Durany X G, Villalba G, et al. Material flow accounting of the copper cycle in Brazil[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2010, 55(1): 20–28.

[11] Kral U, Lin C Y, Kellner K, et al. The copper balance of cities[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(3): 432–444.

[12] Zhang L, Yang J M, Cai Z J, et al. Analysis of copper flows in China from 1975 to 2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 478: 80–89.

[13] 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.]

[14] 温宗国, 季晓立. 中国铜资源代谢趋势及减量化措施[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(9): 1283–1288. [Wen Z G, Ji X L. Copper resource trends and use reduction measures in China[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(9): 1283–1288.]

[15] 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.]

[16] Van Beers D, Graedel T E. Spatial characterisation of multi-level

- in-use copper and zinc stocks in Australia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(8): 849–861.
- [17] Terakado R, Takahashi K I, Daigo I, et al. In-use stock of copper in Japan estimated by bottom-up approach[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2009, 73(9): 713–719.
- [18] Zhang L, Yang J M, Cai Z J, et al. Understanding the spatial and temporal patterns of copper in-use stocks in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6430–6437.
- [19] Zhang L, Cai Z J, Yang J M, et al. The future of copper in China: A perspective based on analysis of copper flows and stocks[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 142–149.
- [20] International Copper Study Group (ICSG). *The World Copper Factbook 1999–2019*[M]. Lisbon: ICSG, 1999–2019.
- [21] Bertram M, Graedel T E, Rechberger H, et al. The contemporary European copper cycle: Waste management subsystem[J]. *Ecological Economics*, 2002, 42(1): 43–57.
- [22] Graedel T E, Van Beers D, Bertram M. Multilevel cycle of anthropogenic copper[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(4): 1242–1252.
- [23] Lifset R J, Eckelman M J, Harper E M, et al. Metal lost and found: Dissipative uses and releases of copper in the United States 1975–2000[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417: 138–147.
- [24] 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.
- [25] Kapur A. The future of the red metal: Discards, energy, water, residues, and depletion[J]. *Progress in Industrial Ecology An International Journal*, 2006, 3(3): 209–236.
- [26] Rauch J N. Global mapping of Al, Cu, Fe, and Zn in-use stocks and in-ground resources[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(45): 18920–18925.
- [27] Graedel T E, Bertram M, Kapur A, et al. Exploratory data analysis of the multilevel anthropogenic copper cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(4): 1253–1261.
- [28] U. S. Geological Survey. *1995–2015 Minerals Yearbook*[M]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 1997–2017.
- [29] Ciacci L, Vassura I, Passarini F. Urban mines of copper: Size and potential for recycling in the EU[J]. *Resources*, 2017, 6(1): 6.
- [30] Soulier M, Glöser–Chahoud S, Goldmann D, et al. Dynamic analysis of European copper flows[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 143–152.
- [31] Liu G, Muller D B. Mapping the global journey of anthropogenic aluminum: A trade-linked multilevel material flow analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11873–11881.
- [32] Tong X, Lifset R. International copper flow network: A blockmodel analysis[J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(2): 345–354.
- [33] Espinoza L A T, Soulier M. An examination of copper contained in international trade flows[J]. *Mineral Economics*, 2016, 29(2): 47–56.
- [34] Kapur A, Graedel T E. Copper mines above and below the ground[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(10): 3135–3141.
- [35] Gordon R B, Bertram M, Graedel T E. Metal stocks and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(5): 1209–1214.
- [36] Gerst M D, Graedel T. In-use stocks of metals: Status and implications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(19): 7038–7045.
- [37] Zhu X, Yu X B. Above-ground resource analysis with spatial resolution to support better decision making[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2016, (2): 304–312.
- [38] United Nations Environment Programme (UNEP). *Metal Stocks in Society: Scientific Synthesis*[R]. UNEP, 2010. <https://www.unep.org/resources/report/metal-stocks-society-scientific-synthesis>.
- [39] Mcmillan C A, Moore M R, Keoleian G A, et al. Quantifying US aluminum in-use stocks and their relationship with economic output[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(12): 2606–2613.
- [40] The World Bank. *World Development Indicators (WDI)*[R/OL]. (2020–06–02) [2020–10–09]. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/topics/19286-world-development-indicators-wdi>.
- [41] Zhang L, Cai Z J, Yang J M, et al. Quantification and spatial characterization of in-use copper stocks in Shanghai[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 93: 134–143.
- [42] Van Beers D, Graedel T E. The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa[J]. *South African Journal of Science*, 2003, 99(1): 61–69.
- [43] Daigo I, Hashimoto S, Matsuno Y, et al. Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(4): 208–217.
- [44] Graedel T E, Harper E M, Nassar N, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(14): 4257–4262.
- [45] Nassar N T, Barr R, Browning M, et al. Criticality of the geological copper family[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 46(2): 1071–1078.
- [46] 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.
- [47] Kapur A. The future of the red metal: Scenario analysis[J]. *Futures*, 2005, 37(10): 1067–1094.
- [48] Elshkaki A, Graedel T E, Ciacci L, et al. Resource demand scenarios for the major metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 2491–2497.

2021年3月

- [49] Schipper B W, Lin H C, Meloni M A, et al. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 28–36.
- [50] U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries[M]. Reston: USGS, 1996–2019.
- [51] Mudd G, Jowitt S. Growing global copper resources, reserves and production: Discovery is not the only control on supply[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(6): 1235–1267.
- [52] Ali S H, Giurco D, Arndt N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. *Nature*, 2017, 543: 367–372.
- [53] Northey S, Mohr S, Mudd G M, et al. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 83: 190–201.
- [54] Sverdrup H U, Ragnarsdottir K V, Koca D. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 87: 158–174.
- [55] Graedel T E. Grand challenges in metal life cycles[J]. *Natural Resources Research*, 2018, 27(2): 181–190.
- [56] Valenta R K, Kemp D, Owen J R, et al. Re-thinking complex orebodies: Consequences for the future world supply of copper[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 816–826.
- [57] United Nations Environment Programme (UNEP). Recycling Rates of Metals: A Status Report[R]. UNEP, 2011. <https://www.unep.org/resources/report/recycling-rates-metals-status-report>.
- [58] Singer D A. Future copper resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 271–279.
- [59] 杨建锋, 马腾, 王尧, 等. 社会经济发展对铜矿资源勘查驱动传导机制分析[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 526–534. [Yang J F, Ma T, Wang Y, et al. Socio-economic mechanisms driving copper exploration[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 526–534.]
- [60] 姚海琳, 张翠虹. 中国资源循环利用产业政策演进特征研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 567–579. [Yao H L, Zhang C H. The evolution of China's resource recycling industry policy[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 567–579.]
- [61] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000–2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1515–1526. [Hao M, Chen W Q, Ma Z J, et al. Benefits and risks of China's copper waste and scrap trade during 2000–2015[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1515–1526.]

Evolution and prospects of anthropogenic copper cycles

ZHANG Ling¹, RAN Wenchun¹, YUAN Zengwei²

(1. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Copper has made vital contributions to sustaining and improving the human society. Anthropogenic copper cycle is the quantitative characterization of the flows and stocks of copper within the anthroposphere. To bring an update and comprehensive analysis of anthropogenic copper cycle, we systematically characterized the global time-integrated (1910–2018), multi-scale copper cycle that incorporate both stocks and anthropogenic mobilization of flows. The main results include: (1) Of the 822 Tg of copper extracted from the lithosphere over the past century, about half was added to the societal in-use stocks, and 382 Tg were discarded into various long-term repositories. (2) The evolution process of key copper flows indicates that since the 1990s, the anthropogenic copper cycle has been overwhelmingly dominated by Asia, different from the domination of the America before. (3) Global mapping of copper in-use stocks indicates a redistribution of copper resources in the socioeconomic system, manifested by a higher concentration in developed urban regions. (4) Till 2050, there is uncertain on whether copper supply can meet anthropogenic demand. Based on the above results, we proposed two directions for enhancing supply capacity of copper.

Key words: copper cycle; anthroposphere; resource use; in-use stocks; sustainability