文章编号：1004-4051(2025)02-0168-09 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20242340

“双碳”目标与金属资源利用路径的战略分析

李芳琴[1,2]
（1. 中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037；
2. 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心，北京 100037）

摘 要：在“双碳”目标成为中国主要共识的时代背景下，金属资源作为支撑工业化发展的重要基石，更是保障现代化能源系统绿色低碳转型的关键原材料。传统金属资源利用模式伴随着国家工业化进程的演进，在技术进步与产业结构变动的推动下显现出由需求驱动的供需阶段性特征、载体金属与伴生金属联合生产的结构特征、金属消费后聚积为社会存量的社会特征，以及一系列诸如资源环境约束、伴生金属供给面临结构性不确定、社会存量开发利用不足等问题。因此，“双碳”目标下金属资源利用路径针对的主要是金属资源全产业链系统的优化低碳转型，从重数量、重速度向重效率、重均衡转变。包括协调金属开发利用与生态文明建设；提升金属全产业链利用效率；通过开发技术、早期设计、建立政策激励机制等方式实现社会存量金属回收利用。

关键词：金属资源；金属循环；伴生金属；“双碳”目标；产业链
中图分类号：TD-9 **文献标识码：**A

Strategic analysis of the “dual carbon” goal and the utilization of metal resources

LI Fangqin[1,2]
（1. *Institute of Mineral Resources*，*Chinese Academy of Geological Sciences*，*Beijing* 100037，*China*；
2. *Research Center for Strategy of Global Mineral Resources*，*Chinese Academy of Geological Sciences*，*Beijing* 100037，*China*）

Abstract： Against the backdrop of the “dual carbon” goal becoming the main consensus in China, metal resources, serving as the fundamental pillar supporting industrialization, are also the critical raw materials ensuring the green and low-carbon transformation of modern energy systems. The traditional utilization mode of metal resources has emerged with the evolution of national industrialization process, driven by technological progress and industrial structure changes, showing the characteristics of demand driven supply and demand stages, the structural characteristics of joint production of carrier metals and associated metals, the social characteristics of metal consumption accumulating into social stock, and a series of problems such as resource and environmental constraints, structural uncertainty in the supply of associated metals, and insufficient development and utilization of social stock. Considering the above factors, the utilization path of metal resources under the “dual carbon” goal is mainly aimed at the optimization and low-carbon transformation of the entire metal resources industry chain system, from

收稿日期：2024-11-18 **责任编辑：**聂虹
基金项目：国家自然科学基金基础科学中心项目“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”资助(编号：72088101)；国家重点研发计划项目课题“全球战略性矿产大数据平台和预警与决策支持技术”资助(编号：2021YFC2901801)；国家社会科学基金项目“自然资源高效利用与经济安全和高质量发展机制研究”资助(编号：21&ZD104)
作者简介：李芳琴(1982—)，女，汉族，山西临汾人，博士，副研究员，主要研究方向为资源经济、资源环境，E-mail：lifangqin.1@163.com。
引用格式：李芳琴. “双碳”目标与金属资源利用路径的战略分析[J]. 中国矿业，2025，34(2)：168-176.
LI Fangqin. Strategic analysis of the “dual carbon” goal and the utilization of metal resources[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2)：168-176.

focusing on quantity and speed to focusing on efficiency and balance, specifically including: coordinating metal utilization and ecological civilization construction; improve the utilization efficiency and optimize the structure of the entire metal industry chain; recycling metals by developing technology, early design, and establishing policy incentive mechanisms.

Keywords：metal resource；metal cycle；associated metal；the “dual carbon” goal；industry chain

1　问题的提出

金属资源是关系国民经济全局的核心资源，根据工业用途及性质，分为黑色金属、有色金属、贵金属和“三稀”金属（包含稀土金属、稀有金属、稀散金属）[1-2]。通常，在产业链的不同环节，金属资源表现为不同形态，包括矿产资源/矿床、金属单质与化合物、金属功能材料及各种终端产品[3]。世界范围内已基本达成共识：金属资源利用与国家工业化进程、产业发展密切相关，不同发展阶段金属资源利用的种类、数量均不同。金属消费沿着技术进步—产业变革—增长趋势分化的路径进行演化，从工业革命到科技革命见证了从大宗金属到“三稀”金属逐步进入生产应用的过程。电子产品使用了多达 60 种金属，医疗设备和相关诊断使用了多达 70 种金属[4]。计算机芯片所用材料，已由 20 世纪 80 年代的 11 种扩充到近年来的 60 种[5]。长期以来，工业化进程引发金属资源快速消耗并以终端在用产品/报废产品的形式聚积为社会存量，同时，金属资源的可耗竭性、不可再生性，以及在开发利用过程中面临的生态环境问题日益显现。

随着实现能源系统转型的清洁能源产业迅速发展，预计与能源转型相关的太阳能发电行业、风电行业、储能行业对铜、铝、钕、镝、镓、铟、锗等多种金属需求量将大幅增长[6]。尽管现代化能源系统对金属的需求在很大程度上取决于实际部署的特定技术[7]，然而，清洁能源技术相比传统能源系统更具有金属密集性，在种类和数量方面都需要消耗更多金属[3]。考虑到即将面临的供需缺口，寻求可替代资源、从社会存量中循环再利用金属得到了来自国内外的广泛关注。然而，研究表明目前常用的 62 种金属元素在各自应用领域的可替代性极其有限[8]。并且就技术层面而言，当前对金属资源利用和回收利用技术的发展水平远不能满足能源转型所需增量的需求[9]。

鉴于此，以美国、欧盟为代表的发达国家或地区纷纷建立关键金属资源清单以保障本土需求，对金属资源利用的典型特征表现为：一方面，重视全产业链的完备发展，重视金属矿产开发、金属材料加工制造、终端报废产品回收利用等关键环节的金属利用效率及对环境造成的影响[10-12]；另一方面，在加强金属本土供应链建设的同时，强化供应链领域的国际合作，试图构建并掌控完备的金属资源供应链[13]，以巩固并维护本土资源安全。这可为我国“双碳”目标下的金属资源利用路径提供一定借鉴。

“双碳”目标正是着力解决上述资源与环境约束、实现能源系统清洁转型、推动经济高质量发展的必然选择。一方面，实现“双碳”目标需要新技术、新产业，赋予了金属资源新的用途；另一方面，实现“双碳”目标需要全面统筹资源与环境的双重约束，赋予了金属资源新的供给路径。“双碳”目标代表一种新的经济发展模式，一种新的金属利用与经济发展关系。综合上述背景，本文分析了新中国成立以来工业化进程中金属资源利用的特征事实及存在问题，基于此，对实现“双碳”目标下金属资源利用路径进行了探析（图 1）。

2　金属资源利用的特征事实

2.1　金属资源利用的供需特征

科学理性地认识工业化进程中金属资源供需变化规律，是厘清“双碳”目标下金属资源利用路径的基础。工业化的实质是对自然资源的大规模深度开发利用，以不断满足经济发展和社会发展的需求[14]。新中国成立以来，尤其是改革开放以后，随着工业化进程的逐步推进，越来越多的金属进入工业经济。与此同时，伴随着技术进步与产业变革的持续深化，金属资源供给与需求的内涵也发生着深刻变化，主要表现：供给端由国内供给向国内供给与国际供给相结合转变；需求端由大宗金属需求占主导向“三稀”金属需求占主导转变。具体而言，中国工业化进程中由需求驱动的金属资源供需特征主要体现为以下三个阶段（图 2）。

1）第一阶段：新中国成立至改革开放前。计划经济体制下的工业化，实行优先发展重工业的指令。这一时期的工业发展特征表现为重工业为主导的粗放式发展。金属消费主要集中在基础工业建设所急需的领域，包括与钢铁工业紧密相关的生铁、锰等黑色金属，与基建、电力、运输等相关的有色金属铜、铝等。为保障供给，我国大规模开展资源综合考察、区划和勘探等行动，截至 1978 年底，累计发现并探明储量的金属矿种达 53 种。由于实施封闭型的经济政策，这一时期金属供给均来自国内开采。

2）第二阶段：改革开放至 21 世纪前二十年。市

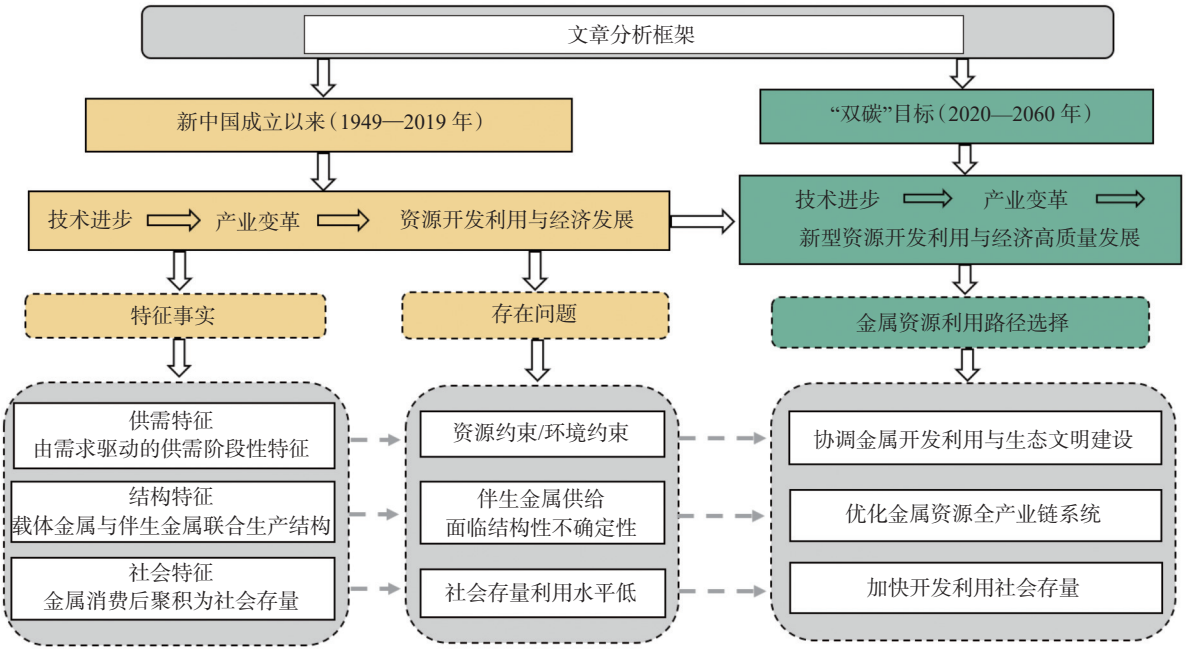

图 1 分析框架

Fig. 1 Analysis framework

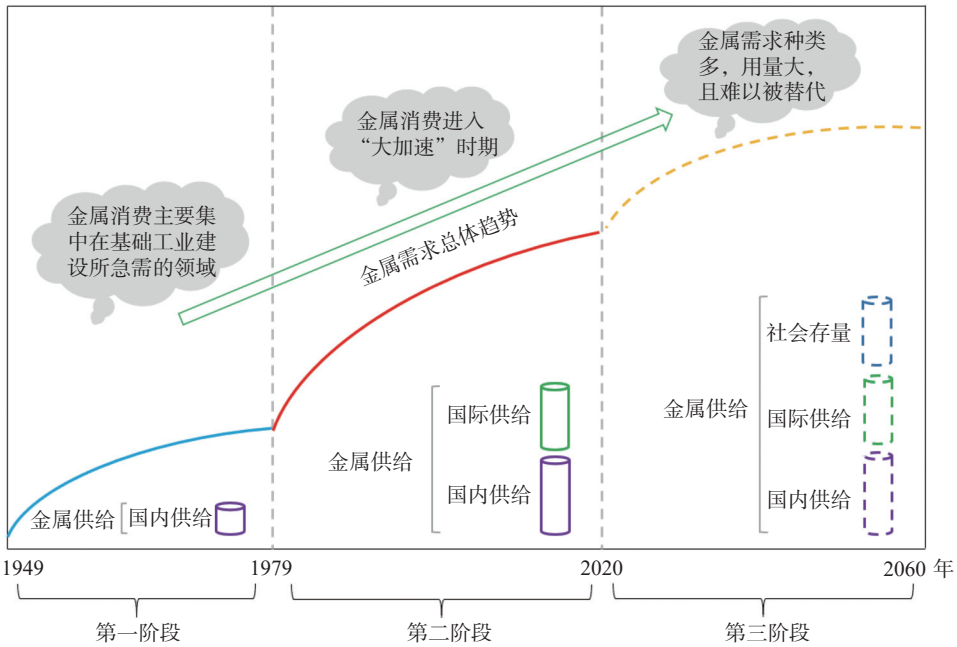

图 2 工业化进程中金属资源供需特征

Fig. 2 Supply and demand characteristics of metal resources

场体制下的工业化，经济主体由重工业主导向技术密集型主导转变。这一时期的工业发展表现为“短而快”的规模化扩张，金属消费进入“大加速”时期，具体而言：黑色金属粗钢、锰消费量快速增长并逐步进入峰值期，2019 年中国粗钢消费量为 9.1 亿 t，锰消费量为 1 007 万 t(金属量)；有色金属铜、铝、铅、锌、钨、锡、镍等消费兴起，并快速增长，以铜为例，1979 年铜消费量为 36 万 t，2019 年消费量增至 1 280 万 t；以稀土、锂为代表的“三稀”金属进入工业经济相对较晚，但增长势头迅猛，比如锂金属，消费量由 1979 年的 0.1 万 t 增长至 2019 年的 18.6 万 t[15]。随着工业化进程对金属的强劲需求，为保障供给，国内实施了重大找矿战略及专项，先后对铜、铝、铅锌、锡等资源进行了重点勘查和开发利用。同时，随着改革开放，中国实施“走出去”战略，先后在 70 多个国家和地区进行了资源国际合作和利用。

3)第三阶段：进入 21 世纪 20 年代以来。随着“双碳”目标的提出，中国经济从高速增长转向高质量发展，更加注重绿色低碳转型。新材料技术、新能源技术、新信息技术等新兴技术的应用，推动产业结构发生变革，金属需求分化趋势愈加明显，黑色金属、有色金属等大宗金属需求增长放缓，稀土、锗、镓、铟等多数“三稀”金属需求持续增长，且主要向高端产业聚集。其中比较典型的是随着能源转型的深化，太阳能发电行业、风电行业、储能行业发展势头迅猛，预计所需金属资源将快速增长。总体上，这一时期金属需求表现为种类多、用量大、且难以被替代，金属供给路径需要提前规划和探索。

2.2　金属资源利用的结构特征

金属资源利用的结构特征源于金属资源自然禀赋特征：载体金属与伴生金属的联合生产结构。通常，伴生金属原生供给依赖于载体金属，而多数伴生金属恰恰是实现“双碳”目标亟需的关键材料。

工业化进程中一直被广泛使用的金属主要是在大型矿床中浓度相对较高的金属，比如铁、铜、铝、锌等，即载体金属。而在地壳中浓度较低，很少会形成独立矿床，通常以间隙方式富集于具有相似物理性质和化学性质的金属矿石，并作为副产品随着载体金属的开采冶炼而获得的金属，为伴生金属[4]，大多数“三稀”金属正是此类伴生金属。载体金属与伴生金属这种联合生产结构，比如铜-钴、铝-镓、锌-铟（图 3），决定了伴生金属的原生供给完全依赖于载体金属的原生产量[16-17]。需要强调的是现代技术越来越依赖伴生金属，对清洁能源技术起关键作用的正是此类伴生金属[18]：对电子和太阳能应用至关重要的锗、镓、铟；对动力电池技术发展起关键作用的钴、镉、镧；核控制棒的重要组成部分铪；应用于高强度磁体的关键稀土元素钕、镝。

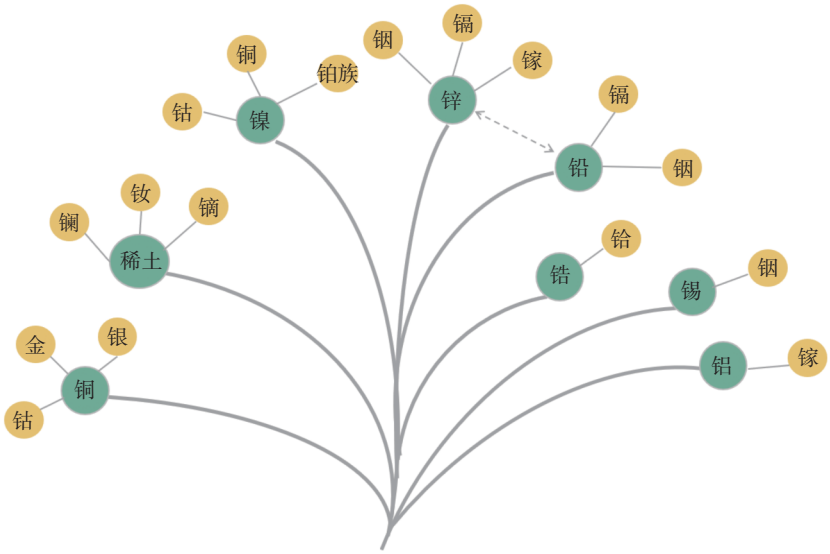

图 3　载体金属与伴生金属的联合生产结构

Fig. 3　Joint production structure of carrier metals and associated metals

（资料来源：文献 [4] 和文献 [19]，有修改。注：通常，载体金属铜、稀土、锌、铅也有其他伴生元素，由于本文研究金属元素，此处对其他伴生元素予以省略）

2.3　金属资源利用的社会特征

中国“压缩式”工业化引发金属快速消耗，并以社会存量形式聚积于社会环境。随着技术发展、消费升级，富集在社会存量中的金属种类越来越丰富，几乎任何通过生产环节进入终端产品的金属均会聚积在社会存量中，并且大多数产品中金属矿物的品位和纯度（作为纯金属或合金）高于一般天然矿物[1,20-21]（图 4(a)）。

研究结果表明，2018 年中国钢铁的社会存量为 82 亿 t，2021 年为 98 亿 t，预计到 2050 年社会存量将达到 123 亿 t[22-23]。全球铜的社会存量已经和地壳中的查明储量相当[24]，截至 2016 年底，中国社会铜存量约 9 000 万 t，为中国铜矿石储量的 4 倍[25]，2021 年中国铜社会存量达到 1.4 亿 t[26]。截至 2021 年底，中国的铝社会存量约为 2.95 亿 t[27]，预计到 2050 年，从社会存量中开发利用铝供给占总供给将达到 60% 以上[28]。截至 2019 年底，中国铟的社会存量为 537t[29]，截至 2020 年底，中国镝的社会存量约 8 000 t[30]，截至 2022 年底，钕的社会存量将近 9 000 t[31]，同年，镓的社会存量达到 643 t[32]（图 4(b)）。这部分社会存量经过合理

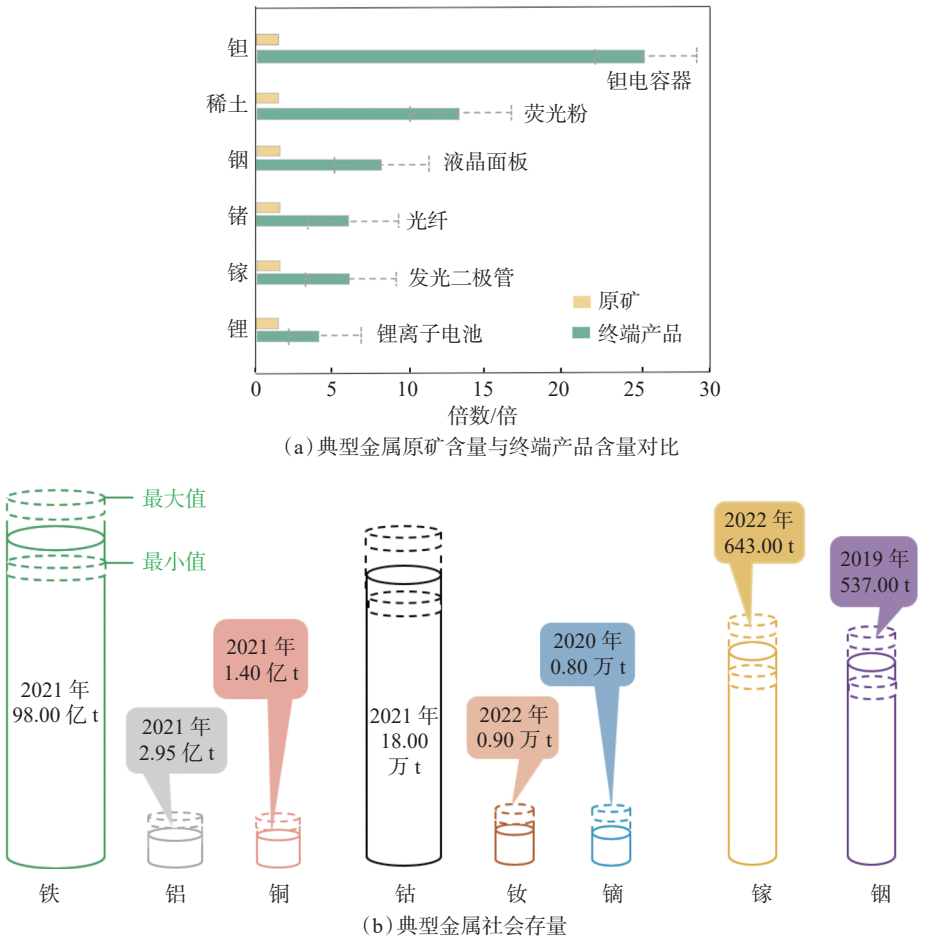

图 4 典型金属原矿含量与终端产品含量对比和典型金属社会存量

Fig. 4 Comparison of metal content in primary ore and products and typical metal social stock

（资料来源：文献 [1]、文献 [20～32]，有修改）

开发利用，可以增加有效供给，提高国内金属资源供给安全水平，如果“听之任之”“放任自流”，最终将被丢弃、消散，失去技术用途。这无疑是对资源的极大浪费，有悖于推进生态文明建设，发展可持续经济的宏伟战略目标。

3 金属资源利用过程中存在的问题

3.1 金属资源利用的资源约束、环境约束

1）金属资源利用的资源约束。金属资源的有限性与人类需求的无限性之间的矛盾日益突出，特别是，实现“双碳”目标所亟需的能源转型相关金属。有研究表明，为满足国内能源转型的需求，我国国内的铬、锰、铂、镍、碲资源储量的保障年限不到 10 a，铜、镝、铟、银等不到 20 a，锂、钴、锡等不到 30 a[3]。金属资源正成为制约能源产业低碳转型的重大约束因素。

行业金属使用强度大。风能、太阳能、储能等清洁能源行业在能源转型中承担着日益重要的角色。虽然清洁能源大大降低了碳排放强度，但却极大地增加了金属耗用强度，在同等能量输出的条件下，相比于传统化石能源，清洁能源需要耗费更多金属[33-34]。比如，纯电动车的金属需求量是燃油汽车的 6～7 倍（钢铁除外），海上风力发电机每单位发电能力的金属需求量是传统火电厂的 7～13 倍[35-36]。

行业发展迅猛，需要消耗更多金属。随着清洁能源相关行业的快速发展，预计包括铁、铜、铝、稀土、锂、钴等 20 余种金属面临供给不足压力[37]。以动力电池为例，未来十年，全球该行业锂金属需求量将翻倍[38]，给金属供给带来巨大压力。WANG 等[39] 研究表明：2020—2040 年我国能源部门对钴的需求量将增长 25 倍，对锂的年需求量将增长 18 倍，对镍的年需求量将增长 11 倍，对镝的年需求量将增长 14 倍，对钕的年需求量将增长 11 倍。

2）金属资源利用的环境约束。发达国家的经验表明工业化过程资源路线的成就和代价都是客观规律的表现，中国的工业化过程不可能也无法逾越这一规律，只享用工业化资源路线的利益而不承担任何代价[14]。长期以来，工业化资源高投入、高消耗的传统粗放型发展模式尽管带来了经济的高速发展，

但也带来了严重的环境污染和生态破坏。就金属而言，主要表现为金属矿产资源采选环节产生的尾矿、冶炼环节产生的废渣、产品使用过程中某些耗散性损失的金属流、产品报废后由于经济或技术限制而丢弃或填埋的部分，给人类赖以生存的生态环境带来的水资源污染、土壤退化、生物多样性散失等。

3.2　金属资源利用的结构性失衡

金属资源利用的结构性失衡表现为金属资源自然禀赋中载体金属与伴生金属的联合生产结构带来的伴生资源供给约束，即伴生金属供给面临结构性不确定性。

当开采载体金属时，伴生金属是否会被提取取决于能否获得经济效益。由于在大多数情况下，给定矿山的经济完全由载体金属或多个金属的经济效益决定。一种或多种子金属的价值，即使在单位重量的基础上很高，在整个矿山经济中也不太可能高到足以控制给定矿山是否将保持活跃或是否将进行提取伴生金属所需的资本投资。在开采环节，相关伴生矿产常常由于价值低、成本高，而导致直接不开采[4]。

伴生金属作为载体金属生产过程中的副产品，其原生供给严重依赖于载体金属原生产量。目前，载体金属需求陆续进入峰值期[40-42]，这给伴生金属的供给带来高度不确定性。以镓金属为例，伴生程度高达 90%，也即全球范围内 90% 以上的镓供给是从氧化铝生产过程中提取[43]，这就决定了镓金属的供给严重依赖于氧化铝的产量，若氧化铝产量降低或者从社会存量的循环利用中获取铝金属，则原生镓供给严重受限。

面对上述困境，业界普遍认为对潜在的伴生金属短缺的解决途径是寻求替代金属，然而，需要强调的是对于高技术含量的能源领域应用而言，可以替代的伴生金属之间往往具有相似的物理性质和化学性质，并且通常来自同一载体金属，也即可替代金属同样面临长期可持续问题[4]。

3.3　金属资源社会存量利用水平低

工业化的快速进程，伴随着制造业的不断创新和消费者需求的精细化、多样化，促使金属资源消耗急剧增加，越来越多金属进入终端产品，以社会存量的形式大量聚积。理论上，终端产品一旦寿命结束，便可通过一定的技术手段对其中的金属进行回收利用，并且完全有效的回收可以使金属得到无限循环利用[44]。然而现实中并不是所有金属的回收都很可观，GRAEDEL 等[44] 对 60 种金属回收率的研究结果显示：18 种金属（铝、钴、铬、铜、金、铁、铅、锰、铌、镍、钯、铂、铼、铑、银、锡、钛和锌）的回收率在 50% 以上，3 种金属（镁、钼、铱）的回收率为 25%～50%，3 种金属（钌、镉、钨）的回收率为 10%～25%，锑、汞的回收率为 1%～10%，其余金属回收率均低于 1%。当前，中国从社会存量中回收再利用金属的效率较低，就存在的问题而言，主要包括以下几个方面。

1）循环利用产业发展处于初期阶段。相较于欧美等发达国家而言，中国工业化进程相对较晚，前期快速消耗的金属资源，特别是铁、铜、铝等大宗金属，有相当大一部分还处在使用过程中。国内从社会存量中开发利用金属资源相关产业还处于初期阶段，回收基础设施、政策干预管理等均有待完善。2020 年，中国再生铝产量为 740 万 t，原铝产量为 3 708 万 t，再生铝在铝供应中的占比仅为 16.7%，同一年，铁、铜、铅的二次资源供给（新废与旧废合计）占总消费的比例分别为 22%、16%、39%[13]，均远低于 GRAEDEL 等[44] 提供的数据，未来提升空间较大。

2）缺乏金属回收利用的关键技术。目前有大量技术是服务于工业化进程的资源采选、冶炼、加工等环节，从工业化初期到现在，已经有一定的积累，且发展完善，技术相对成熟。相比较而言，开发社会存量的技术较为滞后。目前的技术往往侧重于回收具有高经济价值的金属，很多低价值、低含量或难以回收的金属往往因为不具备经济效益而被放弃回收再利用。总之，由于缺乏有效的回收和金属分离技术，且迫于经济效益，金属回收利用的积极性并不高。比如，对于一些新型合金而言，现有技术无法适应复杂多样的现代产品，通常只用在分离、相对无污染、经过再加工并作为特定合金或合金集重新使用的情况下才能回收[45]。

3）产品的多样化、复杂化阻碍了金属回收利用。随着技术的发展，产品功能的提升，各类产品种类愈加多样化、复杂化，各种不同种类的金属材料越来越多地混合在产品设计中，导致材料很难或不可能拆卸和分离。比如动力锂离子电池是设计复杂的产品，产品类型随着不断的技术突破而逐步更新，由铁、锰、铜、铝、锂、钴、镍等十多种材料制成[46-47]，每种材料都有自身特点，这种产品的多样化、复杂化给回收利用带来了极大困难。如果不进行适当的回收，产品的多样性和复杂性将加剧金属损失，而这部分损失的金属将进入生态环境。

4）缺乏基于金属回收的产品设计。由于缺乏基于产品生命周期的设计，导致大量金属不能及时被回收利用，比如半导体材料中的锗金属、耳机和硬盘驱动器中的钕金属等[48]。由于缺乏原始设计，产品很

少带有可用于识别金属存在的标签或成分描述，这给回收过程中的金属提取带来了巨大挑战。

4 “双碳”目标下金属资源利用路径

鉴于上述工业化进程中金属资源利用表现出的特征事实及存在问题，“双碳”目标下金属资源利用路径：需更加重视生态环境可持续发展；需更加重视金属资源全产业链系统性优化利用；需更加重视从社会存量中开发利用金属资源。

4.1 协调金属开发利用与生态文明建设

资源与环境的沉重约束促使我们重新审视资源消费与经济发展的关系，也促使我们意识到处理好生态文明建设与金属资源利用关系的重要性。因此，实现“双碳”目标的金属开发利用，亟需协调国内国际两个市场。

转变传统国内资源开采利用方式。随着国内新一轮找矿突破战略行动的逐步实行，重视从源头上实现环境友好、资源节约。建立基于全生命周期（找矿、开采、治理及恢复）的资源开发模式，形成低碳化的绿色供给。

增强境外多渠道金属资源供应链。把创新国际合作模式提升到战略高度，通过购买矿业权、联合开发、投资并购等途经来推进互惠共赢的协作方式。通过组建专业化且具有国际影响力的企业，集中力量整合国际资源的开发利用。

4.2 优化金属资源全产业链系统

优化金属资源全产业链系统是对金属全产业链系统的低碳、高效、均衡利用，是着眼于金属资源利用的效率提升、结构性调整，更利于社会经济的高质量发展。

优化金属资源（尤其是伴生金属资源）全产业链各环节利用效率，既符合“双碳”目标，也可以增加金属资源供给量。鉴于伴生金属在未来的预期需求将大大高于现在，保障其供应至关重要。具体而言，从伴生金属提取环节，通过升级技术手段，提升提取率等策略增加伴生金属原生供给量；在加工制造环节，通过提升金属材料利用效率，加强生产制造过程中切屑、碎片等资源再利用的方式减少损耗；在终端报废产品再利用环节，提升金属循环再利用效率的方式增加社会存量中金属供给。

4.3 加快开发利用社会存量

从社会存量中回收再利用金属资源，是实现“双碳”目标的必然选择，是保障资源有效供给的可靠途经。再生金属供给具有重要的乘数效应，充分发挥再生资源的作用，是提高资源利用效率的关键举措，同时也是减少金属损失、保护生态环境的必然举措。

1）建立发展金属循环利用产业的政策激励机制。从政策层面，制定合理的回收管理法规尤为重要，可以考虑从三方面着手：第一，提高消费者、生产者的回收意识，由于消费者的行为会影响报废产品的回收效率[49]，有必要通过教育提高消费者的意识，就生产者而言，应为各种材料设定回收目标，对未能通过执法达到目标的制造商和经销商处以罚款；第二，对于现阶段可以回收的金属，有必要建立有效的回收基础设施，包括收集、储存、分拣；第三，对于现阶段无法回收，以及经过回收流程后的残余部分，通过建立废物处理基地，进行堆肥、焚烧或填埋等途径解决。

2）提升开发社会存量的技术。理论上，几乎所有的金属或合金都可以通过最先进的工艺从社会存量中回收。然而，不同金属资源，或同一金属在不同终端产品中，均需要不同的回收技术路径。因此，回收技术的进步有助于增加金属资源的供给量，有必要开发新技术来提高社会存量中金属的整体回收效率。

3）通过早期设计实现金属回收。相关研究表明，在早期阶段做出的设计策略会影响金属在回收利用效率和生态环境可持续性方面的潜力，回收率会随着设计水平的提高而增加[4,50-51]。对此，在产品层面，应考虑推广益于循环、回收的设计；在材料应用层面，重视产品及其组件如何拆卸、分离并回收高端应用供应链的生命周期设计。这需要资源、材料、产品设计等多部门合作，设计易于拆卸的组成材料的回收和再利用，并尽可能地使用回收的金属材料或相关零件。注重早期设计，并坚持执行，可以补充资源供应。

5 结 语

工业化进程中金属资源利用表现出“双刃剑”特征，在发挥出重要支撑作用的同时，面临一系列诸如资源环境约束、结构性失衡、社会存量开发利用不足等问题。科学理性地认识工业化进程中金属资源利用的变化规律，从重数量、重速度向重效率、重均衡转变是解决金属资源利用过程中诸多问题的根本途径。当前，“双碳”目标下，发展高质量经济，是从工业化大国迈向工业化强国的必经阶段，金属资源利用种类、数量、模式均不同于以往。对外创新国际合作模式，构建多渠道金属资源供应链；对内加强新一轮找矿突破行动的同时,设计和实施有效的金属循环系统以支撑未来的技术和社会需求迫在眉睫。

参考文献（References）：

[1] LI F Q, WANG P, CHEN W, et al. Exploring recycling potential of

rare, scarce, and scattered metals: present status and future directions[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 30: 988-1000.

[2] 李芳琴, 李建武. 金属矿产资源经济重要性评估研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(12): 6-13.
LI Fangqin, LI Jianwu. Study on economic importance assessment of metal mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(12): 6-13.

[3] 陈伟强, 汪鹏, 钟维琼. 支撑"双碳"目标的关键金属供应挑战与保障对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1577-1585.
CHEN Weiqiang, WANG Peng, ZHONG Weiqiong. Challenges and security of China's critical metals supply for carbon neutrality pledge[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1577-1585.

[4] GRAEDEL T E. On the future availability of the energy metals[J]. Annual Review of Materials Research, 2011, 41: 323-335.

[5] JOHNSON J, HARPER E M, LIFSET R, et al. Dining at the periodic table: metals concentrations as they relate to recycling[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(5): 1759-1765.

[6] BAI R X, CAI G T, CHEN Y S, et al. The material implications and embodied emissions of clean power transition in Guangdong China from 1978 to 2050[J]. Journal of cleaner production, 2023, 422: 138512.

[7] VIEBAHN P, SOUKUP O, SAMADI S et al. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 655-671.

[8] GRAEDEL T E, HARPER E M, NASSAR N T, et al. On the materials basis of modern society[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(20): 6295-6300.

[9] SOVACOOL B K, ALI S H, BAZILIAN M, et al. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. Science, 2020, 367: 30-33.

[10] 于瑞, 张伟波, 张福良, 等. 2023 年全球矿业政策变化与启示[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 29-35.
YU Rui, ZHANG Weibo, ZHANG Fuliang, et al. Enlightenment on the global mining policy changes in 2023[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 29-35.

[11] European Commission. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study[R/OL]. (2020-09-17)[2024-08-20]. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1.

[12] The White House. Fact sheet: securing a made in America supply chain for critical minerals[R/OL]. (2022-02-22)[2024-08-18]. https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/02/22/fact-sheet-securing-a-made-in-america-supply-chain-for-critical-minerals/.

[13] 干勇, 彭苏萍, 毛景文, 等. 我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 1-9.
GAN Yong, PENG Suping, MAO Jingwen, et al. High-quality development strategy for the supply chain of critical minerals and its material industry in China[J]. Strategic study of CAE, 2022, 24(3): 1-9.

[14] 金碚. 中国工业化的资源路线与资源供求[J]. 中国工业经济, 2008(2): 5-19.
JIN Bei. Chinese industrialization: resource route and resource supply & demand[J]. China Industrial Economics, 2008(2): 5-19.

[15] 中国地质调查局, 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心. 2035 年中国 35 种矿产资源需求预测报告[R]. 2021.

[16] 范海宝, 高丹校, 李勇, 等. 刚果(金)SICOMINES 铜钴矿提高铜、钴选矿回收率研究与实践[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 206-212.
FAN Haibao, GAO Danxiao, LI Yong, et al. Research and practice on improving the recovery rate of cooper and cobalt in Congo(Kinshasa) SICOMINES Copper-Cobalt Mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(11): 206-212.

[17] 李德先, 刘家军, 黄凡, 等. 中国稀散金属矿产资源概况[J]. 中国矿业, 2024, 33(4): 13-22.
LI Dexian, LIU Jiajun, HUANG Fan, et al. Overview of dispersed metals resources in China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(4): 13-22.

[18] 宋慧玲, 王昶, 左绿水. 碳中和背景下清洁能源技术关键伴生金属可供性约束研究回顾与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 38-48.
SONG Huiling, WANG Chang, ZUO Lyushui. Review and prospects of the availability constraints of critical byproduct metals for clean energy technologies in the context of carbon neutrality goal[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(3): 38-48.

[19] HAGELÜKEN C, MESKERS CEM. Complex life cycles of precious and special metals[R]. Cambridge, MA: MIT Press, 2010: 163-197.

[20] 李芳琴, 黄莉, 李杰, 等. 铟资源供给与消费格局分析[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 297-304.
LI Fangqin, HUANG Li, LI Jie, et al. Analysis of indium resource supply and consumption pattern[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 297-304.

[21] ZENG X L, ALI S H, TIAN J P, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1544.

[22] SONG L L, WANG P, HAO M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978-2050[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262(20): 121393.

[23] 韩中奎, 代涛, 李强峰, 等. 基于动态物质流分析的中国铁二次资源回收潜力研究[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 315-324.
HAN Zhongkui, DAI Tao, LI Qiangfeng, et al. Research on the potential of China's secondary iron resource recovery based on dynamic material flow analysis[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 315-324.

[24] KAPUR A, GRAEDEL T E. Copper mines above and below the ground[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(10): 3135-2141.

[25] HAO M, WANG P, SONG L L, et al. Spatial distribution of copper in-use stocks and flows in China: 1978-2016[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261(10): 121260.

[26] 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 Bojie, DAI Tao, HAN Zhongkui, et al. Copper in-use stock and recycling potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023,

44(2): 325-332.

[27] 刘艳飞, 李颖, 林子芃, 等. 中国铝物质流历史变化分析和再生铝资源利用研究[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 333-340.
LIU Yanfei, LI Ying, LIN Zipeng, et al. Analysis of the historical changes in aluminum material flow and the utilization of secondary aluminum resources in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 333-340.

[28] DAI M, WANG P, CHEN W Q, et al. Scenario analysis of China's aluminum cycle reveals the coming scrap age and the end of primary aluminum boom[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226(20): 793-804.

[29] 周艳晶. 中国铟资源动态物质流研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.

[30] DAI T, LIU Y F, WANG P, et al. Unlocking dysprosium constraints for China's 1.5 ℃ climate target[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(38): 14113-14126.

[31] 蔡浚旭, 文博杰, 韩中奎, 等. 2000—2022 年中国钕动态物质流分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(9): 1-11.
CAI Junxu, WEN Bojie, HAN Zhongkui, et al. Dynamic material flow analysis of neodymium in China from 2000 to 2022[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(9): 1-11.

[32] 韩中奎. "双碳"目标背景下中国镓资源供需平衡及调控策略研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2024.

[33] The World Bank. Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition[R]. 2020.

[34] LÈBRE E, STRINGER M, SVOBODOVA K, et al. The social and environmental complexities of extracting energy transition metals[J]. Nature Communications, 2020, 11(9): 4823.

[35] International Energy Agency. The role of critical minerals in clean energy transitions[R/OL]. (2021-05-01)[2024-08-20]. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions.

[36] CRISTÓBAL J, JUBAYED M, WULFF N, et al. Life cycle losses of critical raw materials from solar and wind energy technologies and their role in the future material availability[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161: 104916.

[37] CHURCH C, CRAWFORD A. Green conflict minerals: the fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy[R]. Winnipeg, Manitoba, CAN: International Institute for Sustainable Development, 2018.

[38] 黄莉, 李芳琴, 代涛, 等. 锂金属回收潜力研究: 基于现有回收技术与工艺[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 31-37.
HUANG Li, LI Fangqin, DAI Tao, et al. Recycling potential assessment of lithium metal: based on existing recycling technology and process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 31-37.

[39] WANG P, WANG H M, CHEN W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus[J]. Fundamental Research, 2022, 2(3): 392-395.

[40] 杨建锋, 余韵, 马腾, 等. 工业革命驱动下能源与金属资源需求演变特征与前景分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 45-54.
YANG Jianfeng, YU Yun, MA Teng, et al. Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(12): 45-54.

[41] 王安建, 高芯蕊. 中国能源与重要矿产资源需求展望[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(3): 338-344.
WANG Anjian, GAO Xinrui. China's energy and important mineral resources demand perspective[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(3): 338-344.

[42] 王安建. 能源和矿产资源消费增长规律的再认识[J]. 中国矿业, 2021, 30(7): 1-7.
WANG Anjian. Recognition of the growth rule of energy and mineral resources consumption[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(7): 1-7.

[43] 王昶, 秦雅, 邵留国, 等. 基于系统动力学的清洁能源技术关键伴生金属可供性研究-以镓为例[J]. 系统工程, 2018, 36(5): 116-127.
WANG Chang, QIN Ya, SHAO Liuguo, et al. Key associated materials availability in clean energy technologies based on system dynamics: the case study of gallium[J]. Systems Engineering, 2018, 36(5): 116-127.

[44] GRAEDEL T E, RECK B K. Challenges in metal recycling[J]. Science, 2012, 337: 690-695.

[45] United Nations Environment Programme International Resource Panel. Recycling rates of metals: a status report[R]. 2011.

[46] 周圆圆, 方秀利, 杨国蕾, 等. 能源转型背景下全球镍资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 69-77.
ZHOU Yuanyuan, FANG Xiuli, YANG Guolei, et al. Analysis of supply and demand of nickel resources in global under the background of energy transition[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(7): 69-77.

[47] 李杰, 李芳琴, 黄莉, 等. 报废产品中钴金属回收潜力研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 2960-2969.
LI Jie, LI Fangqin, HUANG Li, et al. Study on the recycling potential of cobalt metal from end-of-life products[J]. China Environmental Science, 2023, 43(6): 2960-2969.

[48] BABBITT C W, ALTHAF S, RIOS F C, et al. The role of design in circular economy solutions for critical materials[J]. One Earth, 2021, 4(3): 353-362.

[49] KING S, BOXALL N J. Lithium battery recycling in Australia: defining the status and identifying opportunities for the development of a new industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 1279-1287.

[50] LI B Y, WANG Y, WANG Z. Managing a closed-loop supply chain with take-back legislation and consumer preference for green design[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 282: 124481.

[51] YU H, CHANG X Y, LIU W J. Cost-based subsidy and performance-based subsidy in a manufacturing-recycling system considering product eco-design[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 327: 129391.