

基于恒等式原理的中国钢铁工业铌资源需求预测研究

李天骄^{1,2)}, 刘新茹^{2,3)}, 刘越颀^{2,3)}, 袁小晶^{1,2)}, 李 颖^{1,2)*}, 李建武^{1,2)}

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

2) 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037;

3) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘 要: 铌主要应用于钢铁的生产, 含铌钢材广泛应用于航空航天、海洋工程、汽车与交通、能源化工及工程机械等高端制造领域。中国是当前世界第一大铌资源消费国, 供需矛盾极为突出, 严重依赖国外资源。为保障中国铌资源供应安全与钢铁产业结构调整提供依据, 本文基于恒等式原理构建了钢铁工业铌资源需求预测模型, 参考发达国家钢铁工业铌资源消费经验, 对中国钢铁工业铌需求进行了定量预测。研究结果表明: (1) 中国铌工业和钢铁工业现代化程度明显落后于发达国家; (2) 典型发达国家含铌钢产量占粗钢产量比例从最低值增长至最高值呈现出一定的规律性; (3) 到 2030 年, 中国钢铁工业铌资源需求将持续增长, 2025 年钢铁工业铌资源需求为 3.3~5.2 万 t, 2030 年为 4.0~7.1 万 t, 中国铌资源供应安全面临严峻挑战。为此, 本文建议持续扩大中国铌资源海外权益产量、提高国内储量、加强铌资源提取和二次资源回收技术研发来保障国内外铌资源稳定的供应, 同时推进国内铌相关产业建设。

关键词: 铌资源; 钢铁工业; 恒等式原理; 需求预测; 资源安全

中图分类号: F426 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.121902

Demand Forecast Research of Niobium Resources in China's Iron and Steel Industry Based on the Principle of Identity

LI Tian-jiao^{1,2)}, LIU Xin-ru^{2,3)}, LIU Yue-qi^{2,3)}, YUAN Xiao-jing^{1,2)}, LI Ying^{1,2)*}, LI Jian-wu^{1,2)}

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

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

3) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

Abstract: Niobium is mainly used in steel production, and niobium-containing steel is widely used in high-end manufacturing fields such as aerospace, ocean engineering, automobile and transportation, engineering machinery, and energy and chemical industries. China is currently the largest niobium consumer globally. The contradiction between supply and demand is extremely prominent in China, which results in a heavy dependence on foreign supplies. To provide a basis for ensuring the supply security of niobium in China and the adjustment of the steel industry structure, this study constructs a prediction model of niobium demand in the steel industry based on the principle of identity and makes a quantitative prediction of niobium demand in China's steel industry by referring to the experience of niobium consumption in the steel industry of developed countries. The results show that: (1) the modernization of China's niobium and steel industries lags behind that of developed countries; (2) in

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

收稿日期: 2022-09-09; 改回日期: 2022-12-07; 网络首发日期: 2022-12-23。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李天骄, 男, 1989 年生。博士, 助理研究员。主要从事矿产资源经济方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: hljltianjiao@163.com。

*通讯作者: 李颖, 女, 1979 年生。副研究员。主要从事矿产资源经济方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: liyinghzy@sina.com。

typical developed countries, the proportion of niobium-containing steel output to crude steel output increases from the lowest to the highest, showing a certain regularity; (3) the demand for niobium in China's iron and steel industry will continue to grow, the demand for niobium in the iron and steel industry will be 33 to 52 thousand tons in 2025, and 40 to 71 thousand tons in 2030. Therefore, China's niobium supply security is facing severe challenges. This study suggests the continuous expansion of China's overseas niobium equity production, expansion of domestic reserves, strengthened research and development of niobium extraction and secondary recovery technology to ensure the stable supply of niobium at home and abroad, and promotion of domestic niobium-related industries.

Keywords: niobium; iron and steel industry; identity principle; demand forecasting; resource security

铌(Nb)是一种银灰色、质地较软且具有延展性的稀有高熔点金属, 熔点 2468 °C, 沸点 5127 °C, 密度为 8.66 g/cm³, 具有耐腐蚀、抗变形、热传导性能好等特点, 被广泛用于钢铁及航空航天等工业领域(王佳营等, 2020), 是现代尖端电子、宇航、医疗、机械以及原子能工业中不可缺少的重要金属原料(谭东波等, 2018)。作为一种重要的微合金化元素(Sun et al., 2022), 全球约 85%~90%、美国 80%、日本 90%、欧洲 90%、中国 90%的铌应用在钢铁的生产中(郭青蔚, 2005; 曹飞等, 2019; 欧强, 2020; 安泰科, 2022; USGS, 2022)。在钢铁中仅加入 0.001%~0.1%的铌就能够明显改善钢铁的力学性能、拓展钢材的应用场景, 因此铌的消费量是衡量一个国家钢铁工业现代化程度的重要指标, 工业发达国家每吨钢平均消费铌约 50 g(郭青蔚, 2005)。

全球铌资源分布较为广泛, 但由于许多国家铌矿勘查程度低、品位低等原因, 导致全球铌储量和产量集中分布在巴西和加拿大两个国家(曹飞等, 2019)。过去半个多世纪, 巴西和加拿大的三座世界级铌矿山(巴西 Araxa 矿、Catalao 矿和加拿大 Niobec 矿)供应了全球约 99%的铌资源(张鑫, 2022)。2021 年, 全球铌储量超过 1700 万 t(金属量, 本文铌数据均为金属量), 其中巴西储量 1600 万 t、加拿大储量 160 万 t; 铌矿山产量 7.5 万 t, 其中巴西产量 6.6 万 t、加拿大产量 7400 t(USGS, 2022)。按 2021 年全球铌矿开采金属量 7.5 万 t/年计, 全球铌矿资源的静态保障年限达到 227 年, 能够满足全球经济长期发展所需。但考虑到全球铌矿山产量的高度集中性以及在现代高科技领域中的重要作用, 美国、欧盟、日本、加拿大和澳大利亚纷纷将其列为关键性矿产(曹庭语, 2011; 彭齐鸣, 2017; Blengini, 2017; Nassar and Fortier, 2021; 刘文浩, 2021; DISER, 2022)。

2021 年, 全球铌消费为 7.1 亿 t(安泰科, 2022)。目前, 中国是全球最大的铌资源消费国(JOGMEC, 2021), 欧洲、美国、日本、韩国也是主要铌资源消费的国家或地区。近几年来, 我国铌表观消费量为 2~3 万 t, 由于国内铌资源禀赋差, 国内铌产量仅

50 t 左右, 对外依存度将近 100%。我国海外铌资源供应主要来自于巴西和加拿大, 从巴西和加拿大进口量分别约占我国进口总量的 94%和 6%。我国铌资源供需矛盾极为突出, 高需求量、高对外依存度、高进口集中度和极低的国内供应能力导致我国铌资源供应风险极高。一旦海外铌资源断供, 将对我国铌相关产业产生极大的影响, 尤其是钢铁工业。

钢铁工业是电力、煤炭消费大户, 2019 年我国钢铁工业碳排放量占全国总排放量的 15%左右(姚同路等, 2022)。为实现 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的“双碳”目标, 我国钢铁行业的低碳技术必不可少(孟凡君, 2022)。崔志峰等(2022)认为国内钢铁企业拟定的减排目标更高, 减排力度更大, 未来有可能将引领世界钢铁行业的低碳发展。作为钢铁行业降低碳排放主要方向之一, 通过调整钢铁产品结构(即将产品高端化), 利用高强度钢替代低强度钢产品, 实现钢材轻量化发展, 能够降低钢材消费, 减少生产钢铁所用的材料和能源消耗, 助力碳减排。可见, 提高含铌钢产量占粗钢产量的比例对我国钢铁行业实现“双碳”目标具有一定的促进作用。

在钢铁工业高质量发展、低碳转型的背景下, 我国钢铁工业未来还需要多少铌资源是我国学者必须回答的现实问题。国内外资源需求预测的方法可大致划分为数学模型法、投入产出法、类比法、部门分析法和情景分析法等(王安建等, 2010; 王京等, 2015)。矿产资源需求预测的研究对象主要以石油、天然气、铁、铜、铝、硫、磷、钾等大宗矿产为主(代涛等, 2017), 随着战略新兴矿产资源需求量快速增长, 近年来稀土(郑明贵等, 2018)、钨(唐萍芝等, 2021)、钼(周园园等, 2018)、锂(袁小晶等, 2019; 张泽南等, 2020)、钴(邢佳韵等, 2019; 王京等, 2019)、钽(王修等, 2022)等稀有金属矿产需求预测研究得到了相对提升。然而, 目前国内外学者对于铌资源需求预测的研究较少, 何海洋等(2018)、欧强(2020)分别采用二阶向量自回归(VAR(2))模型和部门需求预测法对我国 2025 年、2030 年的铌需求进行了研

究,但存在重要参数设置缺乏依据,无法结合钢铁工业发展质量开展更为深入的讨论分析等缺点,铌资源需求预测方法亟待提高。由于铌主要应用于钢铁生产中,其消费量与钢铁产量关系密切。为此,在进行钢铁工业铌资源需求时,同时评估我国钢铁工业发展质量,本文尝试借助恒等式的原理构建钢铁工业铌资源需求预测模型将二者合并研究,在一定程度上丰富了稀有金属矿产的需求预测方法。

1 恒等式原理

恒等式是一个数学概念,是指无论其变量如何取值,等式永远成立的算式。在能源矿产资源领域,常见的恒等式主要包括 IPAT 恒等式和 Kaya 恒等式(渠慎宁, 2019)。

IPAT 恒等式最开始用于反映人口对环境压力的影响,于 1970 年由 Ehrlich 和 Holdren 提出(York et al., 2003),将环境影响(Impact)和人口规模(Population)、人均财富(Affluence)以及环境相关的技术水平(Technology)联系起来,进而建立四者间的恒等式,详见公式(1)。

$$I = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{I}{GDP} = P \times A \times T \quad (1)$$

式中: I 代表环境影响; P 代表人口; A 代表人均财富; T 代表技术或经济活动的效率。人均财富(A)为经济增长(GDP)与人口(P)的比值,技术或经济活动的效率(T)为环境影响(I)与经济增长(GDP)的比值。

在 Ehrlich 和 Holdren 提出的 IPAT 恒等式基础上, Waggoner and Ausubel(2002)和 York et al.(2002)对其进行改进和修正,分别提出了 ImPACT 恒等式和 STIRPAT 模型。

与 IPAT 恒等式相比, Kaya 恒等式是一种将经济、政策和人口等因素与碳排放进行联系的恒等式(Tavakoli, 2018),能够反映能源消费结构与经济结构对碳排放量的影响,进而发掘碳排放发生变化的深层次因素,详见公式(2)。

$$CO_2 = \frac{CO_2}{PE} \times \frac{PE}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP = IC \times IE \times G \times POP \quad (2)$$

式中: CO_2 代表碳排放量; PE 代表一次能源消费总量; GDP 代表国内生产总值; POP 代表人口数量; IC 代表能源结构碳排放强度; IE 代表单位 GDP 能源强度; G 代表人均国内生产总值。

由于 Kaya 恒等式较好的拓展性,能够根据不同情况对各种因素进行进一步分解,在研究碳排放影响因素时得到了广泛的应用(袁路和潘家华, 2013; 戴小文等, 2015; 王长建等, 2016; Ortega-Ruiz et al., 2020)。

陆钟武和毛建素(2003)运用 IPAT 方程推导出了环境负荷与 GDP 之间的关系。陆钟武等(2011)在此

基础上推导出了 IGT 脱钩模型,该模型的优点在于能够确定脱钩与否的临界值,为相关部门规划给予信息支持。诸大建和邱寿丰(2007)认为 IGT 脱钩模型的优势在于能够为制定政策提供定量的依据。根据陆钟武等(2011),本文简要介绍 IGT 脱钩模型利用恒等式原理的推导过程。

首先,根据 IPAT 方程推导出 IGT 模型基本公式为:

$$I = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{I}{GDP} = P \times A \times T = G \times T \quad (3)$$

式中: I 为矿产资源消费量; P 为人口; A 为人均 GDP ; T 为单位 GDP 的矿产资源消费量。

进一步对 IGT 模型进行推演,设基期年矿产资源消费量为 I_0 ,则存在方程:

$$I_0 = G_0 \times T_0 \quad (4)$$

式中: G_0 为基期年 GDP ; T_0 为基期年单位 GDP 的矿产资源消费量。

基期年后第 n 年的矿产资源消费量 I_n 为:

$$I_n = G_n \times T_n \quad (5)$$

式中: G_n 为基期年后第 n 年的 GDP ; T_n 为基期年后第 n 年单位 GDP 的矿产资源消费量。

相对于基期年,基期年后第 n 年 GDP 和单位 GDP 的矿产资源消费量的变化率可分别写成:

$$G_n = G_0 \times (1+g)^n \quad (6)$$

$$T_n = T_0 \times (1-t)^n \quad (7)$$

公式(6)和(7)中: g 为基期年到基期年后第 n 年 GDP 的年均增长率; t 为同期内单位 GDP 的矿产资源消费量的年均下降率。

将公式(6)和(7)带入公式(5)中,得到:

$$I_n = G_n \times T_n = G_0 \times T_0 \times [(1+g) \times (1-t)] \quad (8)$$

最终, IGT 模型的脱钩指数 D_r 表达式为:

$$D_r = t \times (1+g) / g \quad (9)$$

根据脱钩指数 D_r 与 GDP 变化率的值,可以分为三种脱钩状态,分别为绝对脱钩($g > 0$ 且 $D_r \geq 1$, 或 $g < 0$ 且 $D_r \leq 0$)、相对脱钩($g > 0$ 且 $0 < D_r < 1$, 或 $g < 0$ 且 $0 < D_r < 1$)和未脱钩($g < 0$ 且 $D_r \geq 1$, 或 $g > 0$ 且 $D_r \leq 0$)。

前人学者提出和广为应用的 IPAT 恒等式和 Kaya 恒等式正是基于恒等式原理,将环境影响、碳排放量或资源消费量与经济、政策、人口、技术进步等因素结合起来开展了一系列研究,其内在联系在于上述因素决定了环境影响、碳排放量或资源消费量。类似地,钢铁工业是铌资源最重要的消费部门,也可以借助恒等式的原理将铌资源消费量与钢铁工业建立起关系。通常,吨钢铌消费强度是用于衡量铌资源在钢铁工业中的消费程度的指标(即生产单位钢铁的铌消费量),也可以用于钢铁工业发展质量评价。然而,由于钢材种类繁多,同时钢铁产量与铌消费量间存在数万倍的数量级差异,导致

时间序列上的吨钢铌消费强度的变化范围较大, 直接利用该指标进行铌资源需求预测将会出现很大偏差甚至错误。并且, 从钢铁工业宏观管理的角度出发, 不区分钢材种类的吨钢铌消费强度并不是一个容易观察的指标。相比之下, 含铌钢产量占粗钢产量的比例的变化范围较为稳定, 同时也是一个更具有操作性的调控指标。为此, 可将钢铁工业铌资源消费量与粗钢产量、含铌钢产量占粗钢产量比例、每吨含铌钢的铌消费强度建立恒等式关系来预测未来钢铁工业的铌资源需求。利用该方法不仅能够提高未来钢铁工业铌资源需求预测的精度, 也能够用于评价过去钢铁工业的发展质量和把握未来钢铁工业宏观调控方向。

综上所述, 由于铌资源在钢铁工业和高科技领域的重要性、资源供应的集中性, 以及我国铌资源供需矛盾尤为突出的现实情况, 利用恒等式原理评估我国钢铁工业发展质量及钢铁工业铌资源需求趋势, 对于保障我国铌资源安全、提高我国钢铁工业发展质量具有重要意义。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 钢铁工业铌资源需求预测模型的构建

为了深入揭示钢铁工业与铌资源之间的关系, 预测未来我国钢铁工业铌资源需求量, 本文基于恒等式原理并采用陆钟武等(2011)提出的 IGT 脱钩模型形式来构造钢铁工业铌资源需求预测模型。该模型既能够根据钢铁工业发展规律来估计铌资源需求, 也能够根据钢铁工业发展规划来调控铌工业发展进程。

根据中国钢铁工业铌资源消费量与粗钢产量、含铌钢产量占粗钢产量比例、每吨含铌钢的铌消费强度的关系建立中国钢铁工业铌资源需求预测模型, 如公式(10):

$$C_{Nb} = I_{Nb} \times S_{Nb-Steel} \times P_{CS} = \frac{C_{Nb}}{P_{Nb-Steel}} \times \frac{P_{Nb-Steel}}{P_{CS}} \times P_{CS} \quad (10)$$

式中: C_{Nb} 为钢铁工业铌资源消费量, I_{Nb} 为每吨含铌钢的铌消费强度, $S_{Nb-Steel}$ 为含铌钢产量占粗钢产量比例, P_{CS} 为粗钢产量, $P_{Nb-Steel}$ 为含铌钢产量。

通常, 前人学者对粗钢需求预测研究较多且方法较为成熟, 钢铁产量预测研究则较为薄弱(刘兰娟和谢美萍, 2004; 张惠丽和郭进平, 2006; 高蕊蕊和王安建, 2010; 郭华和张天柱, 2012; 张艳飞等, 2015), 因此将公式(10)调整为:

$$C_{Nb} = I_{Nb} \times S_{Nb-Steel} \times P_{CS} = \frac{C_{Nb}}{P_{Nb-Steel}} \times \frac{P_{Nb-Steel}}{P_{CS}} \times \alpha C_{CS} \quad (11)$$

式中: C_{CS} 为粗钢表观消费量; α 为经验系数, 用于表征粗钢产量与粗钢需求量之间的比例关系, 可利用历史粗钢产量与粗钢表观消费量进行估计。

通常, 含铌钢中铌金属的添加量为 0.02%~0.04%(ASM, 2001), 因此 I_{Nb} 的取值范围在 0.02%和 0.04%之间。

含铌钢产量占粗钢产量比例($S_{Nb-Steel}$)是重要的参数, 其影响因素较多。为了简化模型, 本文采用参数设置法进行处理。假设含铌钢产量占粗钢产量比例($S_{Nb-Steel}$)为 S_0 , 则从基期年到基期年后的第 n 年的含铌钢产量占粗钢产量比例 S_n 可表示为:

$$S_n = S_0 \times (1 + r_s)^n \quad (12)$$

式中: r_s 为从基期年到基期年后第 n 年含铌钢产量占粗钢产量比例的年均增长率。

因此, 公式(11)可改写为:

$$C_{Nb} = I_{Nb} \times S_0 \times (1 + r_s)^n \times \alpha C_{CS} \quad (13)$$

综上, 根据前人学者对中国粗钢消费量(C_{CS})的预测结果, 结合含铌钢产量占粗钢产量比例($S_{Nb-Steel}$), 便可以预测未来中国钢铁工业铌资源的需求量。由于含铌钢产量占粗钢产量比例($S_{Nb-Steel}$)并非无限增长, 并且由于中国铌工业发展与发达国家相比差距较大(何季麟和张宗国, 2006), 可通过参考发达国家含铌钢产量占粗钢产量的比例($S_{Nb-Steel}$)进行估计。

利用恒等式的原理构建的钢铁工业铌资源需求预测模型将能够更好地估计中国未来钢铁工业铌资源需求, 对比我国与发达国家间的铌工业和钢铁工业的差距, 进而为我国相关行业的规划提供依据。

2.2 数据来源

为了开展本次研究, 需要梳理 2000—2019 年中国和典型发达国家铌资源消费和粗钢产量数据。美国铌表观消费量和铌在钢铁领域消费占比数据来源于美国地质调查局(USGS)。日本铌表观消费量数据来自日本金属和能源安全组织(JOGMEC)。由于欧洲、韩国和中国铌表观消费量数据缺失, 采用联合国贸易数据库(UN Comtrade, <https://comtrade.un.org/data/>)进行估算, 并且由于铌铁是铌资源国际贸易的最重要载体(殷为宏等, 1998), 为了简化计算流程, 本文采用的铌铁(HS 编码为 720293, 按铌含量 65%折算)的净进口量对欧洲、韩国和中国进行表观消费量估算。欧洲、日本、韩国和中国铌在钢铁领域消费占比均按 90%进行假设。美国、欧洲、日本、韩国和中国粗钢产量数据来自于世界钢铁协会(<https://worldsteel.org/>)(表 1)。需要说明的是, 中国粗钢产量数据不包括中国香港和中国台湾。

与此同时, 为了进行中国钢铁工业铌资源需求预测, 经验系数 α 估算采用的粗钢表观消费量数据也均来自世界钢铁协会。由于世界钢铁协会 2019

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

	铌表观消费量	钢铁铌消费占比	含铌钢产量	粗钢产量
美国	USGS	USGS		
日本	JOGMEC		按铌金属添加量 0.03%估算	世界钢铁协会
欧洲		90%		
韩国	UN Comtrade			
中国			中信微合金化技术中心, 2019	

年中国粗钢表观消费量数据缺失, 为了补充数据, 2019 年中国粗钢消费量数据来源于中国钢铁工业协会(2020)。未来中国粗钢需求量来源于全球矿产资源战略研究中心。

3 结果与讨论

3.1 中国及典型发达国家铌资源消费特征

美国、欧洲、日本、韩国和中国等 5 个国家或地区是全球铌资源的主要消费国家, 2000—2019 年累积铌表观消费量 75 万 t。据美国地质调查局数据, 2000—2019 年全球铌累积矿山产量为 108 万 t, 上述 5 个国家和地区 20 年铌累积表观消费量占全球铌累积矿山产量的 69.4%。

2000—2019 年, 上述 5 个国家或地区铌表观消费量整体呈上升趋势, 从 15 556 t 增长至 61 562 t, 年均增长率为 7.1%(图 1)。中国对全球铌资源消费拉动作用明显, 发达国家消费趋于稳定。中国、韩国、美国、欧洲和日本铌表观消费量年均增长率分别为 19.9%、11.6%、4.0%、3.4%和 1.9%。受 2008 年金融危机影响, 除韩国以外, 欧洲、美国、日本和中国铌表观消费量均出现了下降趋势, 欧洲、美国、日本 3 个国家或地区降幅达到了 49.9%, 中国下降了 22.3%, 韩国则增加了 50.4%。

中国铌工业发展起步较晚, 比世界滞后将近 40 年(殷为宏等, 1998; 何季麟和张宗国, 2006), 但产业发展迅速, 目前是全球第一大铌资源消费国。

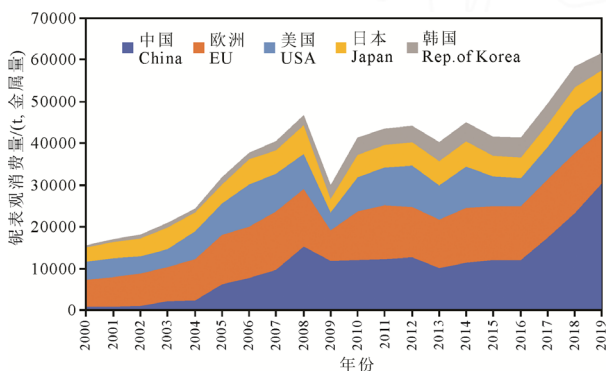


图 1 2000—2019 年中国及典型发达国家铌表观消费量
Fig. 1 Apparent consumption of niobium in China and typical developed countries from 2000 to 2019

2008 年, 中国以 15 312 t 的铌表观消费量超越了欧洲, 成为世界第一大铌消费国。2019 年, 中国、欧洲、美国、日本和韩国的铌资源表观消费量分别为 30 296 t、12 817 t、9370 t、5085 t 和 3994 t, 中国消费量占其他 4 个国家消费量之和的 96.9%。

从铌在钢铁领域的应用来看, 中国钢铁工业现代化程度要落后于发达国家。2000—2019 年, 美国、欧洲、韩国、日本和中国每吨钢铌消费强度均呈上涨趋势。由于钢铁种类繁多, 导致不同时间阶段每吨钢铌消费强度变化范围较广。2000—2019 年, 美国、欧洲、韩国、日本和中国每吨钢铌消费强度变化范围分别为 42~117 g/t、31~69 g/t、10~70 g/t、33~58 g/t、6~31 g/t(图 2)。2019 年, 美国、欧洲、韩国、日本和中国每吨钢铌消费强度分别为 107 g/t、65 g/t、56 g/t、51 g/t 和 30 g/t。

美国、欧洲、韩国、日本和中国是全球主要的钢铁生产国家或地区。据世界钢铁协会数据显示, 2000 年以来这 5 个国家或地区平均每年钢铁产量合计约占全球钢铁产量的 75%。2019 年, 中国、欧洲、美国、日本和韩国含铌钢产量分别为 8000 万 t、3845 万 t、2436 万 t、1526 万 t 和 1198 万 t, 这五个国家或地区合计生产含铌钢 17 005 万 t。

近年来, 美国、欧洲、韩国和日本含铌钢占粗钢产量比例范围在 15%~26%, 明显高于中国的 7%。2000—2019 年, 美国、欧洲、韩国、日本和中国含铌钢产量占粗钢产量比例变化范围分别为 11%~30%、9%~21%、3%~21%、10%~17%、2%~8%(图 3)。2014—2019 年, 发达国家含铌钢产量占粗钢产量比例较为稳定, 美国、欧洲、韩国和日本的含铌钢占粗钢产量比例维持在 26%、20%、20%和 15%, 中国的比例稳定在 7%左右。

发达国家含铌钢产量占粗钢产量比例从最低值增长至最高值呈现出一定的规律。2000 年以来, 美国含铌钢产量占粗钢产量的比例从 11%增长至

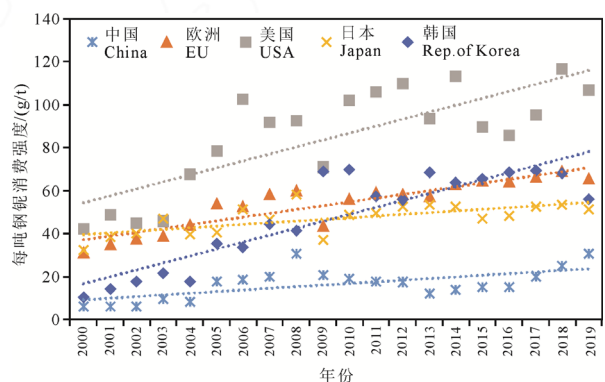


图 2 2000—2019 年中国及典型发达国家每吨钢铌消费强度
Fig. 2 Consumption intensity of niobium per ton of steel in China and typical developed countries from 2000 to 2019

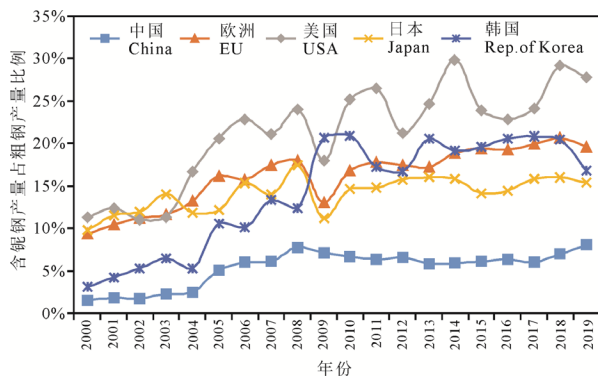


图3 2000—2019年中国及典型发达国家含铌钢产量占粗钢产量比例

Fig. 3 The proportion of niobium-containing steel production in China and typical developed countries in crude steel production from 2000 to 2019

21%用了5年时间(平均每年扩大2.0个百分点),增长至30%的最大值用了14年时间(平均每年扩大1.4个百分点);欧洲从9%增长至21%的最大值用了18年时间(平均每年扩大0.7个百分点);韩国从3%增长至11%用了5年时间(平均每年扩大1.6个百分点),增长至21%的最大值用了9年时间(平均每年扩大2.0个百分点);日本从10%增长至17%的最大值用了8年时间(平均每年扩大0.9个百分点)。尽管不同国家的工业化发展程度具有差异,但发达国家含铌钢产量和粗钢产量比例对我国钢铁工业和铌工业的现代化发展仍具有一定的参考价值。

3.2 中国钢铁工业未来铌资源需求预测

将2019年作为基期年,利用前文构建的需求预测模型(公式6),结合全球矿产资源战略研究中心基准情景下的中国钢铁未来需求进行中国钢铁工业铌资源需求预测。在进行预测之前,需要对模型中的重要参数每吨含铌钢的铌消费强度(I_{Nb})、经验系数(α)、从基期年到基期年后第 n 年含铌钢产量占粗钢产量比例的年均增长率(r_s)进行假设。其中,每吨含铌钢的铌消费强度(I_{Nb})范围为0.02%~0.04%;经验系数(α)根据2000—2019年中国粗钢产量和表观消费量估计;基期年到基期年后第 n 年含铌钢产量占粗钢产量比例的年均增长率(r_s)参考发达国家进行设置。重要参数设置情况详见表2。

2000—2019年,中国粗钢产量和表观消费量变化趋势几乎一致。粗钢产量从2000年的12 850万t增长至2019年的99 542万t,年均增长率11.4%;粗钢表观消费量从13 809万t增长至95 325万t,年均增长率10.7%(图4)。2000—2005年,中国粗钢产量略低于表观消费量,产量与表观消费量的比例在0.86~0.98之间变化。中国钢铁产品对外贸易格局在2006年时发生了历史性转变,由钢材净进口国转变为钢材净出口国(戚向东,2007)。自2006年开始,中

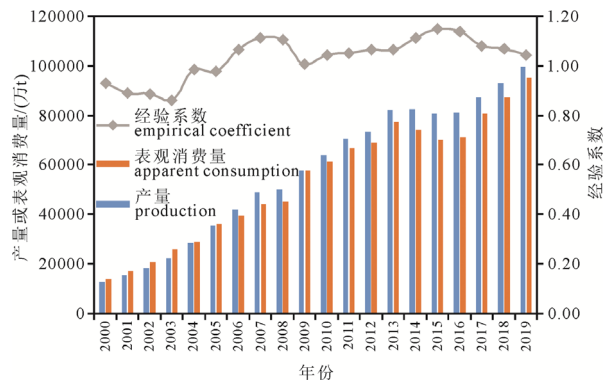


图4 2000—2019年中国粗钢产量和表观消费量间的关系

Fig. 4 The relationship between crude steel production and apparent consumption in China from 2000 to 2019

国的粗钢产量开始大于表观消费量,产量与表观消费量的比例在1~1.15之间变化。由于2015年国内钢铁行业表现出高产能、高出口、低需求、低价格、低效益的特征,中国钢材消费量自1995年以来首次下降,导致当年粗钢产量与表观消费量的比例高达1.15。为此,将经验系数(α)设置为2000—2019年粗钢产量与表观消费量比例的均值1.03,即未来我国粗钢产量和表观消费量基本持平。

根据中国“第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议”中的到2035年“基本实现社会主义现代化”、“基本实现新型工业化”、“人均国内生产总值达到中等发达国家水平”,以及顺利实现“双碳”目标的时代背景下,届时我国钢铁工业必然发生巨大的变化。为此,参考发达国家模式来设置中国含铌钢产量占粗钢产量的比例增长情景。按照不同增速,中国含铌钢产量占粗钢产量的比例增长速度的情景分为发达国家低增长情景、发达国家中增长情景和发达国家高增长情景。若按照发达国家低增长情景,中国2035年含铌钢产量占粗钢产量的比例为20.8%,届时将超过日本,达到目前欧洲和韩国发展水平;按发达国家中增长情景,中国2033—2034年将达29.0%~30.5%,达到美国2014年30%的最高值;按发达国家高增长情景,中国2030年的比例为30%,2035年将达到40%。

以2019年为基期,将2035年中国钢铁需求预测和重要参数带入钢铁工业铌资源需求预测模型(公式6)进行2035年中国钢铁工业铌资源需求预测,结果见表3、表4、图5。

表2 钢铁工业铌需求预测模型重要参数设置
Table 2 Important parameter setting of niobium demand forecasting model in the iron and steel industry

	I_{Nb}	α	r_s
发达国家低增长情景			6.1%
发达国家中增长情景	0.02%~0.04%	1.03	9.0%
发达国家高增长情景			10.6%

表 3 中国钢铁工业铌资源需求预测结果及对比(单位: 万 t, 金属含量)
Table 3 Prediction results and comparison of demand for niobium resources in China's iron and steel industry
(unit: 10 000 tons, metal content)

预测学者	2020 年表观消费量	需求预测		
		2020 年	2025 年	2030 年
何海洋等, 2018		1.4~1.7	1.8~2.6	2.4~3.4
欧强, 2020	1.8	2.0	2.6	-
本次研究		1.9~2.2	3.3~5.2	4.0~7.1

2020 年和 2021 年中国粗钢表观消费量分别为 10.5 亿 t 和 9.95 亿 t(中国钢铁工业协会, 2021, 2022), 根据模型测算的 2020 年和 2021 年中国钢铁工业铌资源需求量结果为: ①发达国家低增长情景, 19 085 t 和 24 691 t; ②发达国家中增长情景, 20 597 t 和 28 278 t; ③发达国家高增长情景, 21 677 t 和 30 840 t。以联合国贸易数据库(UN Comtrade)估算, 2020 年和 2021 年中国铌资源表观消费量分别为 20 019 t 和 26 254 t, 按中国钢铁工业铌消费结构 90%估算, 中国钢铁工业铌资源消费量约 18 017 t 和 23 629 t, 模型预测的结果比发达国家低增长情景预测的结果低 1000 t 左右, 考虑到疫情的影响, 本次需求预测模型的参数设置较为合理。

由于前人学者并未考虑我国钢铁工业发展质量提升的问题, 导致对我国未来钢铁工业铌资源需求量预测结果偏低。何海洋等(2018)将 2025 年和 2030 年的吨钢铌消费强度分别设置为 29~41 g/t 和 42~60 g/t, 根据本文的预测结果显示 2025 年和 2030 年的吨钢铌消费强度分别为 40~62 g/t 和 52~93 g/t。欧强(2020)认为与铌相关的行业部门如建筑及大型钢结构、油气管道和不锈钢的铌消费量呈上升趋势, 但在进行年均增长率假设时存在一定的缺陷。本文的预测结果充分考虑了国外典型发达国家的发展经验、我国钢铁工业发展规律以及国家发展战略等因素, 具有较高的综合性和科学性。

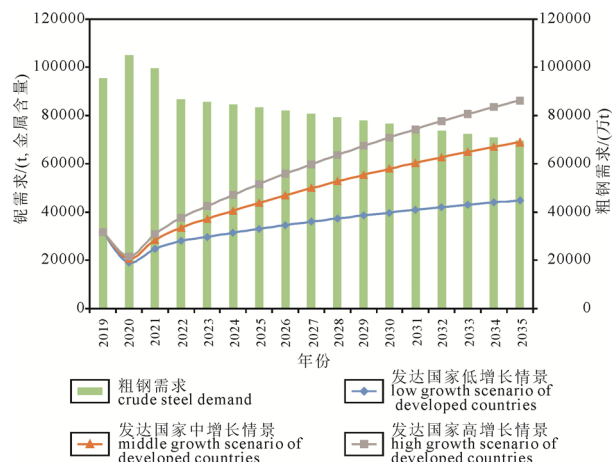


图 5 2035 年中国钢铁工业铌资源和粗钢需求预测结果
Fig. 5 Forecast results of niobium and crude steel demand in China's iron and steel industry in 2035

表 4 中国钢铁工业未来不同时段铌资源累积需求
(单位: t, 金属含量)

Table 4 China's iron and steel industry's cumulative demand for niobium in different periods in the future
(unit: ton, metal content)

	发达国家低 增长情景	发达国家中 增长情景	发达国家高 增长情景
2022—2025 年	122 117	155 091	178 643
2026—2030 年	186 101	262 891	317 741
2031—2035 年	214 697	323 950	401 988

由于含铌钢产量占粗钢产量比例的提升, 中国钢铁工业未来铌资源需求并未随着粗钢需求量的降低而减少。在发达国家低增长情景的条件下, 2025 年、2030 年和 2035 年中国钢铁工业铌资源需求量分别为 33 057 t、39 768 t、44 843 t; 发达国家中增长情景的条件下, 分别为 43 873 t、57 956 t、68 947 t; 发达国家高增长情景的条件下, 分别为 51 598 t、70 946 t、86 164 t。2022—2025 年, 中国钢铁工业铌资源累积需求范围为 12~18 万 t; 2026—2030 年, 累积需求范围为 19~32 万 t; 2031—2035 年, 累积需求范围为 21~40 万 t。

与未来巨大的铌资源需求相比, 中国铌资源供应面临着严峻的挑战。首先, 受资源禀赋限制, 中国几乎没有可供经济开发利用的铌矿资源, 目前国内铌精矿供应几乎全部来自于进口(安泰科, 2022); 其次, 尽管全球铌资源储量可供人类利用百年, 但资源分布高度集中, 一旦发生自然灾害或地缘政治事件, 可能会对国际铌资源供应链造成冲击; 最后, 如果全球铌资源开发产能得不到有效的提升, 那么中国在获取国际铌资源时面临的竞争程度将会明显上升。

4 结论及认识

本文通过总结分析典型发达国家钢铁工业铌资源消费特征, 基于恒等式原理构建了中国钢铁工业铌资源需求预测模型, 对中国 2035 年钢铁工业铌资源进行了需求预测研究, 取得的主要结论和认识如下:

(1)前人学者对中国钢铁工业的铌资源需求预测研究并未建立起铌资源消费量与钢铁产量的直接联系, 忽略了未来中国含铌钢产量在钢铁产量中的

地位,可能导致需求预测结果偏低,本文基于恒等式原理构建的中国钢铁工业铌资源需求预测模型对于把握我国钢铁工业未来铌资源需求状况是一次有益的尝试。

(2)中国铌工业和钢铁工业现代化程度明显落后于发达国家。2019年,中国每吨钢铌消费强度分别为美国、欧洲、韩国和日本的28%、46%、54%和59%;含铌钢产量占粗钢产量的比例仅为8%,比美国、欧洲、韩国和日本分别低20%、12%、9%和7%。近年来,美国、欧洲、韩国和日本含铌钢占粗钢产量比例范围在15%~26%,明显高于中国的7%。

(3)典型发达国家含铌钢产量占粗钢产量比例从最低值增长至最高值呈现出一定的规律性。通过对2000—2019年的数据观察,美国和韩国的含铌钢产量占粗钢产量比例的增长模式较为相似,低增速时该比例每年扩大范围在1.4%~1.6%之间,高增速时每年可扩大2.0%;欧洲和日本的增长模式较为相似,含铌钢产量占粗钢产量比例每年扩大范围在0.7%~0.9%之间。发达国家经验表明,含铌钢产量占粗钢产量的比例得“翻番”式增长的时间范围在5~18年。

(4)在实现“2035”远景目标和“双碳”目标的时代背景下,中国钢铁工业铌资源需求将持续增长,铌资源供应安全面临挑战。发达国家中增长情景预测结果显示,2025年、2030年和2035年中国钢铁工业铌资源需求量分别为43 873 t、57 956 t和68 947 t。然而,受资源禀赋限制,当前中国铌资源几乎全部依赖境外资源。未来一段时间,中国铌对外依存度仍将保持高位。2021年,中国铌业和洛阳钼业两家公司全球铌资源产量份额达到了23%,仅次于巴西CBMM公司。即便如此,国际地缘政治等因素的影响仍对我国未来铌资源供应带来了巨大的风险。

5 政策建议

(1)继续扩大中国铌资源海外权益产量,保证中国铌资源海外供应稳定。目前,中国企业已经在海外获得了一定的权益。中国铌业公司拥有巴西CBMM公司Araxa矿15%的权益,洛阳钼业拥有巴西Catalao矿100%的权益。2021年巴西CBMM公司铌资源产量占全球的75%,洛阳钼业铌资源产量占全球的11%(洛阳钼业,2022)。粗略估算,中国占有全球17 024 t的铌资源产量份额,占全球铌产量的比例约23%。但是,这一数量仅为中国2025年、2030年和2035年的39%、29%和25%。为此,中国应维护好“中巴关系”、加强含铌商品相关技术研发

合作,进一步扩大铌资源海外权益。

(2)加强国内铌资源找矿勘查力度,加快铌资源提取和二次资源回收的技术研发,提高国内铌资源保障程度。首先,增大地质勘查投入,尝试寻找高品质的铌资源,提高铌资源的储量和品位。其次,加强低品位铌矿的采选技术和工艺研发,提高铌矿开发利用效率,降低生产成本。再次,鼓励利用二次资源,对相应企业给予一定补贴。倪航星(2022)认为利用铌回收料生产铌铁合金能够给企业带来经济效益,经试验成本概算后,利用1 t铌回收料生产铌铁合金可为企业创造6万元的利润。目前,美国铌二次资源利用量占其表观消费量的比例最高已经达到了20%(USGS, 2022)。虽然中国对铌二次原料回收较为重视(戴艳阳等, 2002),但仍以钽为主,铌的二次回收情况鲜见报道。

(3)利用当前全球铌资源消费格局,加快国内铌资源相关产业建设。当前欧盟、美国、日本和韩国等发达国家铌铁资源消费增速缓慢,俄罗斯和印度铌铁消费能力较低。随着中国经济市场结构升级,钢材应用将逐步从普通钢向高强度钢转移,钢材将从低端产品迈向高端,国防现代化建设及高新技术制造业的快速发展带动专用特殊钢的需求快速增长,对传统特殊钢材料的更新换代和产品结构升级优化提出了迫切要求。为此,中国应加快完善基础设施建设,推动钢铁消费结构转型升级,以便于降低未来与其他国家发生铌资源争夺的压力。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 92162321, 72088101, 71991480, and 71991485).

参考文献:

- 安泰科. 2022. 2021年有色金属市场发展报告——钽铌[R]. 北京: 北京安泰科信息股份有限公司.
- 曹飞, 杨卉芃, 张亮, 王威. 2019. 全球钽铌矿产资源开发利用现状及趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 56-67, 89.
- 曹庭语. 2011. 日本稀有金属保障战略[J]. 国土资源情报, (4): 42-46.
- 崔志峰, 徐安军, 上官方钦. 2022. 国内外钢铁行业低碳发展战略分析[J]. 工程科学学报, 44(9): 1496-1506.
- 代涛, 文博杰, 梁靓, 姜含璐. 2017. 铅消费规律探索及中国需求预测[J]. 地球学报, 38(1): 61-68.
- 戴小文, 何艳秋, 钟秋波. 2015. 中国农业能源消耗碳排放变化驱动因素及其贡献研究——基于Kaya恒等扩展与LMDI指数分解方法[J]. 中国生态农业学报, 23(11): 1445-1454.
- 戴艳阳, 钟海云, 李荐, 李庆奎. 2002. 从二次原料中回收钽铌[J]. 矿产综合利用, (1): 32-36.
- 高蕊蕊, 王安建. 2010. 基于“S”规律的中国钢需求预测[J]. 地

- 球学报, 31(5): 645-652.
- 郭华, 张天柱. 2012. 中国钢铁与铁矿石资源需求预测[J]. 金属矿山, (1): 5-9.
- 郭青蔚. 2005. 铌在钢铁工业中的应用[J]. 稀有金属快报, 24(3): 31-34.
- 何海洋, 何敏, 李建武. 2018. 我国铌矿资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 27(11): 1-5.
- 何季麟, 张宗国. 2006. 中国钽铌工业的现状与发展[J]. 中国金属通报, (48): 2-8.
- 刘兰娟, 谢美萍. 2004. 非线性动态系统的递归神经网络预测研究——对我国钢铁产量的预测分析[J]. 财经研究, 30(11): 26-33.
- 刘文浩. 2021. 加拿大公布 31 种关键矿产清单[EB/OL]. [2022-08-04]. http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2021kjqykb/kjqykb202105/202108/t20210809_6155215.html.
- 陆钟武, 毛建素. 2003. 穿越“环境高山”——论经济增长过程中环境负荷的上升与下降[J]. 中国工程科学, (12): 36-42.
- 陆钟武, 王鹤鸣, 岳强. 2011. 脱钩指数: 资源消耗、废物排放与经济增长的定量表达[J]. 资源科学, 33(1): 2-9.
- 洛阳钼业. 2022. 洛阳栾川钼业集团股份有限公司 2021 年度报告[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://file.finance.sina.com.cn/211.154.219.97:9494/MRGG/CNSESHTOCK/2022/2022-3/2022-03-19/7898105.PDF>.
- 孟凡君. 2022. 低碳技术助力钢铁行业实现“双碳”目标[N/OL]. 中国工业报, 2022-05-10(002). [2022-08-04]. 10.28076/n.cnki.ncgyb.2022.000611.
- 倪航星. 2022. 铌回收料生产铌铁合金工艺研究[J]. 铁合金, 53(2): 28-30, 34.
- 欧强. 2020. 中国铌资源需求趋势分析及供应风险研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 彭齐鸣. 2017. 提高战略性矿产供应能力, 推动新兴产业快速发展——在“战略性矿产供需形势分析研讨会”上的讲话[J]. 国土资源情报, (1): 1-3, 41.
- 戚向东. 2007. 2006 年我国钢铁行业运行情况与 2007 年供需形势分析[J]. 中国钢铁业, (3): 5-11.
- 渠镇宁. 2019. 碳排放分解: 理论基础、路径剖析与选择评判[J]. 城市与环境研究, (3): 98-112.
- 谭东波, 李东永, 肖益林. 2018. “孪生元素”铌—钽的地球化学特性和研究进展[J]. 地球科学, 43(1): 317-332.
- 唐萍芝, 王寿成, 王京. 2021. 全球钨消费历史分析及需求预测[J]. 中国国土资源经济, 34(1): 55-59, 83.
- 王安建, 王高尚, 陈其慎, 于汶加. 2010. 矿产资源需求理论与模型预测[J]. 地球学报, 31(2): 137-147.
- 王佳营, 俞弼安, 李志丹. 2020. 三头六臂的“铌”兄“钽”弟——走近稀有金属“铌钽”[J]. 国土资源科普与文化, 23(2): 14-18.
- 王京, 石香江, 牛丽贤, 张浩钰. 2015. 基于情景分析法的我国铜资源需求预测[J]. 中国国土资源经济, 28(5): 53-57.
- 王京, 石香江, 王寿成, 唐萍芝. 2019. 未来中国钴资源需求预测[J]. 中国国土资源经济, 32(10): 28-33.
- 王修, 李天骄, 王安建, 刘冲昊, 范凤岩. 2022. 基于主要产品产量的我国钽资源需求预测[J]. 矿业研究与开发, 42(6): 191-196.
- 王长建, 汪菲, 张虹鸥. 2016. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素——基于扩展的 Kaya 恒等式[J]. 生态学报, 36(8): 2151-2163.
- 邢佳韵, 陈其慎, 张艳飞, 龙涛, 郑国栋, 王琨. 2019. 新能源汽车发展下锂钴镍等矿产资源需求展望[J]. 中国矿业, 28(12): 67-71.
- 姚同路, 吴伟, 杨勇, 贺庆, 孟华栋, 林腾昌. 2022. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报, 34(6): 505-513.
- 殷为宏, 陈秦元, 傅俊岩, 褚幼义, 邵志俊. 1998. 中国铌加工工业和铌制品[J]. 稀有金属材料与工程, (1): 1-8.
- 袁路, 潘家华. 2013. Kaya 恒等式的碳排放驱动因素分解及其政策含义的局限性[J]. 气候变化研究进展, 9(3): 210-215.
- 袁小品, 马哲, 李建武. 2019. 中国新能源汽车产业锂资源需求预测及建议[J]. 中国矿业, 28(8): 61-65.
- 张惠丽, 郭进平. 2006. 中国铁矿石需求预测系统动力学模型研究[J]. 金属矿山, (2): 22-25.
- 张鑫. 2022. 2021 年全球及中国铌资源开发利用现状分析, 铌铁进口贸易规模进一步扩大[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://huaon.com/channel/trend/804683.html>.
- 张艳飞, 陈其慎, 于汶加, 柳群义, 李颖, 谭化川. 2015. 2015-2040 年全球铁矿石供需趋势分析[J]. 资源科学, 37(5): 921-932.
- 张泽南, 张照志, 吴晴, 潘昭帅, 徐恒逸. 2020. 中国锂矿资源需求预测[J]. 中国矿业, 29(7): 9-15.
- 郑明贵, 王佳男, 徐冰. 2018. 中国稀土中长期需求预测及政策建议——基于协整误差修正模型[J]. 稀土, 39(2): 148-158.
- 中国钢铁工业协会. 2020. 2019 年中国钢铁行业经济运行报告[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/gzdt/202005/W020200528770641871558.pdf>.
- 中国钢铁工业协会. 2021. 2020 年中国钢铁行业经济运行报告[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202107/W020210723348607215248.pdf>.
- 中国钢铁工业协会. 2022. 2021 年中国钢铁行业经济运行报告[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202205/W020220511403031962228.pdf>.
- 中信微合金化技术中心. 2019. 铌钢春秋(II)(1979-2019)[M]. 北京市: 科学技术文献出版社.
- 周园园, 王京, 唐萍芝. 2018. 钨消费规律分析及未来 10 年中国需求预测[J]. 资源与产业, 20(6): 24-29.
- 诸大建, 邱寿丰. 2007. 城市循环经济规划的分析工具及其应用——以上海为例[J]. 城市生态规划, 31(3): 64-69.

References:

- Antaike. 2022. 2021 nonferrous metals market development report-tantalum and niobium[R]. Beijing: Beijing Antaike Information Co., Ltd(In Chinese).
- ASM. 2001. High-strength low-alloy steels[EB/OL]. [2022-08-04]. https://www.asminternational.org/documents/10192/3466171/06117_chapter%203b.pdf/a764507a-3499-4d23-b348-5536d31c0ba2.
- BLENGINI G A, BLAGOEVA D, DEWULF J, DE TORRES M C, NITA V, VIDAL-LEGAZ B, LATUNUSSA C E L, KAYAM Y, TALENS P L, BARANZELLI C, MANFREDI S, MANCINI L, NUSS P, MARMIER A, ALVES-DIAS P, PAVEL C, TZIMAS E, MATHIEUX F, PENNINGTON D, CIUPAGEA C. 2017. As-

- essment of the methodology for establishing the EU list of critical raw materials[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- CAO Fei, YANF Hui-peng, ZHANG Liang, WANG Wei. 2019. Current situation and trend analysis of global tantalum and niobium mineral resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(5): 56-67, 89(in Chinese with English abstract).
- CAO Ting-yu. 2011. Japan's rare metal security strategy[J]. Land and Resources Information, (4): 42-46(in Chinese).
- CHINA IRON & STEEL ASSOCIATION. 2020. 2019 economic operation report of China's iron and steel industry[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/gzdt/202005/W020200528770641871558.pdf>(in Chinese).
- CHINA IRON & STEEL ASSOCIATION. 2021. 2020 economic operation report of China's iron and steel industry[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202107/W020210723348607215248.pdf>(in Chinese).
- CHINA IRON & STEEL ASSOCIATION. 2022. 2021 economic operation report of China's iron and steel industry[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202205/W020220511403031962228.pdf>(in Chinese).
- CITIC-CBMM MICROALLOYING TECHNOLOGY CENTER. 2019. The Nb-steel legend in China(II)(1979-2019)[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press(in Chinese).
- CMOC GROUP LIMITED. 2022. CMOC Group Limited annual report in 2021[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://file.finance.sina.com.cn/211.154.219.97:9494/MRGG/CNSESHTOCK/2022/2022-3/2022-03-19/7898105.PDF>(in Chinese).
- CUI Zhi-feng, XU An-jun, SHANGGUAN Fang-qin. 2022. Low-carbon development strategy analysis of the domestic and foreign steel industry[J]. Chinese Journal of Engineering, 44(9): 1496-1506(in Chinese with English abstract).
- DAI Tao, WEN Bo-jie, LIANG Liang, JIANG Han-lu. 2017. A tentative discussion on the law of lead consumption and a prediction of China's lead demand[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(1): 61-68(in Chinese with English abstract).
- DAI Xiao-wen, HE Yan-qiu, ZHONG Qiu-bo. 2015. Driving factors and their contributions to agricultural CO₂ emission due to energy consumption in China: Based on an expended Kaya identity and LMDI decomposition method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 23(11): 1445-1454(in Chinese with English abstract).
- DAI Yan-yang, ZHONG Hai-yun, LI Jian, LI Qing-kui. 2002. Recovery of tantalum and niobium from secondary material[J]. Multi-purpose Utilization of Mineral Resources, (1): 32-36(in Chinese with English abstract).
- DISER. 2022. 2022 critical minerals strategy[EB/OL]. [2022-08-04]. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/March%202022/document/2022-critical-minerals-strategy.pdf>.
- GAO Xin-rui, WANG An-jian. 2010. The prediction of China's steel demand based on S-shaped regularity[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(5): 645-652(in Chinese with English abstract).
- GUO Hua, ZHANG Tian-zhu. 2012. Prediction of demand for China steel and iron ore resources[J]. Metal Mine, (1): 5-9(in Chinese with English abstract).
- GUO Qing-wei. 2005. Application of niobium in iron and steel industry[J]. Rare Metals Letters, 24(3): 31-34(in Chinese).
- HE Hai-yang, HE Min, LI Jian-wu. 2018. Analysis of the niobium resources supply and demand pattern in China[J]. China Mining Magazine, 27(11): 1-5(in Chinese with English abstract).
- HE Ji-lin, ZHANG Zong-guo. 2006. Current situation and development of tantalum and niobium industry in China[J]. China Metal Bulletin, (48): 2-8(in Chinese).
- JOGMEC. 2021. 2020 mineral resources material flow-niobium(Nb)[EB/OL]. [2022-08-04]. https://mrhc.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2021/06/material_flow2020_Nb.pdf(in Japanese).
- LIU Lan-juan, XIE Mei-ping. 2004. Prediction research of the recursive neural network of nonlinear dynamic system prediction analysis of the iron and steel output in China[J]. Journal of Finance and Economics, 30(11): 26-33(in Chinese with English abstract).
- LIU Wen-hao. 2021. Canada publishes list of 31 critical minerals[EB/OL]. [2022-08-04]. http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2021kjqykb/kjqykb202105/202108/t20210809_6155215.html(in Chinese).
- LU Zhong-wu, MAO Jian-su. 2003. Crossing "Environmental Mountain"—On the increase and decrease of environment impact in the process of economic growth[J]. Engineering Science, (12): 36-42(in Chinese with English abstract).
- LU Zhong-wu, WANG He-ming, YUE Qiang. 2011. Decoupling indicators: Quantitative relationships between resource use, waste emission and economic growth[J]. Resources Science, 33(1): 2-9(in Chinese with English abstract).
- MENG Fan-jun. 2022. Low-carbon technologies help the steel industry achieve the "dual carbon" goal[N/OL]. China Industry News, 2022-05-10(002) [2022-08-04]. 10.28076/n.cnki.ncgyb.2022.000611(in Chinese).
- NASSAR N T, FORTIER S M. 2021. Methodology and technical input for the 2021 review and revision of the U.S. critical minerals list: U.S. Geological Survey open-file report[R]. Washington D.C.: U.S. Geological Survey.
- NI Hang-xing. 2022. Study on production of ferroniobium from niobium reclaimed material[J]. Ferro-alloys, 53(2): 28-30, 34(in Chinese with English abstract).
- ORTEGA-RUIZ G, MENA-NIETO A, GARCÍA-RAMOS J E. 2020. Is India on the right pathway to reduce CO₂ emissions? Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990–2016[J]. Science of The Total Environment, 737: 139638.
- OU Qiang. 2020. Demand analysis and supply risk of niobium resources in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- PENG Qi-ming. 2017. Increase the deliverability of strategic minerals, promote rapid development of emerging industry—Speech on the "Analysis and Discussion Conference of Supply and Demand Situations of Strategic Minerals"[J]. Land and Resources Information, (1): 1-3, 41(in Chinese with English abstract).

- QI Xiang-dong. 2007. Operation of China's iron and steel industry in 2006 and analysis of supply and demand in 2007[J]. *China Steel*, (3): 5-11(in Chinese).
- QU Shen-ning. 2019. Decomposition of carbon emissions: Theoretical basis, path analysis and selection evaluation[J]. *Urban and Environmental Studies*, (3): 98-112(in Chinese with English abstract).
- SUN Lu-yan, LIU Xiang, LEI Shu-wei, LI Hui-gai, ZHAI Qi-jie. 2022. Review on niobium application in microalloyed steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research: International*, 29(10): 1513-1525.
- TAN Dong-bo, LI Dong-yong, XIAO Yi-lin. 2018. Geochemical characteristics of niobium and tantalum: A review of twin elements[J]. *Earth Science*, 43(1): 317-332(in Chinese with English abstract).
- TANG Ping-zhi, WANG Shou-cheng, WANG Jing. 2021. Historical analysis and demand forecast of global tungsten consumption[J]. *Natural Resource Economics of China*, 34(1): 55-59, 83(in Chinese with English abstract).
- TAVAKOLI A. 2018. A journey among top ten emitter country, decomposition of "kaya identity"[J]. *Sustainable Cities and Society*, 38: 254-264.
- USGS. 2022. Mineral commodity summaries 2022[R]: Washington D.C.: U.S. Geological Survey.
- WAGGONER P E, AUSUBEL J H. 2002. A framework for sustainability science: A renovated IPAT identify[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12): 7860-7865.
- WANG An-jian, WANG Gao-shang, CHEN Qi-shen, YU Wen-jia. 2010. The mineral resources demand theory and the prediction model[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(2): 137-147(in Chinese with English abstract).
- WANG Chang-jian, WANG Fei, ZHANG Hong-ou. 2016. The process of energy-related carbon emissions and influencing mechanism research in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(8): 2151-2163(in Chinese with English abstract).
- WANG Jia-ying, YU Reng-an, LI Zhi-dan. 2020. The "niobium" and the "tantalum" brother with three heads and six arms-approaching the rare metal "niobium and tantalum"[J]. *Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources*, 23(2): 14-18(in Chinese).
- WANG Jing, SHI Xiang-jiang, NIU Li-xian, ZHANG Hao-yu. 2015. Cooper resources demand forecasting by scenario analysis in China[J]. *Natural Resource Economics of China*, 28(5): 53-57(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing, SHI Xiang-jiang, WANG Shou-cheng, TANG Ping-zhi. 2019. Demand forecast of China's cobalt resource in the future[J]. *Natural Resource Economics of China*, 32(10): 28-33(in Chinese with English abstract).
- WANG Xiu, LI Tian-jiao, WANG An-jian, LIU Chong-hao, FAN Feng-yan. 2022. The forecast of tantalum resource demand based on the output of major industrial products in China[J]. *Mining Research and Development*, 42(6): 191-196(in Chinese with English abstract).
- XING Jia-yun, CHEN Qi-shen, ZHANG Yan-fei, LONG Tao, ZHENG Guo-dong, WANG Kun. 2019. Related mineral demand forecast under the development of global new energy automobile[J]. *China Mining Magazine*, 28(12): 67-71(in Chinese with English abstract).
- YAO Tong-lu, WU Wei, YANG Yong, HE Qing, MENG Hua-dong, LIN Teng-chang. 2022. Analysis on low-carbon development of China's steel industry under "dual-carbon" goal[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 34(6): 505-513(in Chinese with English abstract).
- YIN Wei-hong, CHEN Qin-yuan, FU Jun-yan, CHU You-yi, SHAO Zhi-jun. 1998. Fabrication industry of niobium and its products in China[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, (1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- YORK R, ROSA E A, DIETZ T. 2002. Bridging environmental science with environmental policy: Plasticity of population, affluence and technology[J]. *Social Science Quarterly*, 83(1): 18-34.
- YORK R, ROSA E A, DIETZ T. 2003. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 46(3): 351-365.
- YUAN Lu, PAN Jia-hua. 2013. Disaggregation of carbon emission drivers in Kaya identity and its limitations with regard to policy implications[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 9(3): 210-215(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xiao-jing, MA Zhe, LI Jian-wu. 2019. Forecast and suggestions of lithium resources demand for new energy vehicles in China[J]. *China Mining Magazine*, 28(8): 61-65(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hui-li, GUO Jin-ping. 2006. System dynamics model for forecasting China's iron ore demand[J]. *Metal Mine*, (2): 22-25(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xin. 2022. Analysis of the status quo of development and utilization of niobium resources in the world and China in 2021, the scale of ferroniobium import will be further expanded[EB/OL]. [2022-08-04]. <http://huaon.com/channel/trend/804683.html>(in Chinese).
- ZHANG Yan-fei, CHEN Qi-shen, YU Wen-jia, LIU Qun-yi, LI Ying, TAN Hua-chuan. 2015. Global iron ore supply and demand trend analysis, 2015-2040[J]. *Resources Science*, 37(5): 921-932(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ze-nan, ZHANG Zhao-zhi, WU Qing, PAN Zhao-shuai, XU Heng-yi. 2020. Chinese lithium mineral resource demand forecast[J]. *China Mining Magazine*, 29(7): 9-15(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Ming-gui, WANG Jia-nan, XU Bing. 2018. Forecast of medium and long-term demand of rare earth in China and policy suggestions based on co-integration and error correction model[J]. *Chinese Rare Earths*, 39(2): 148-158(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yuan-yuan, WANG Jing, TANG Ping-zhi. 2018. Consumption regularity of molybdenum and its demand forecast of China in next decade[J]. *Resources & Industries*, 20(6): 24-29(in Chinese with English abstract).
- ZHU Da-jian, QIU Shou-feng. 2007. Analytical tool for urban circular economy planning and its preliminary application: A case of Shanghai[J]. *City Ecological Planning*, 31(3): 64-69(in Chinese with English abstract).