

doi: 10.12029/gc20220909002

张照志, 潘昭帅, 车东, 闫强, 吴晴. 2024. 中国铬矿资源特征及 2021—2035 年铬供需形势分析[J]. 中国地质, 51(4): 1191–1209.

Zhang Zhaozhi, Pan Zhaoshuai, Che Dong, Yan Qiang, Wu Qing. 2024. Chromite ore resources characteristic and analysis of supply and demand situation from 2021 to 2035 in China[J]. Geology in China, 51(4): 1191–1209(in Chinese with English abstract).

中国铬矿资源特征及 2021—2035 年铬供需形势分析

张照志, 潘昭帅, 车东, 闫强, 吴晴

(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)

摘要:【研究目的】铬矿作为我国关键性矿产之一, 是支撑我国战略性新兴产业发展的重要矿种。我国铬矿资源匮乏, 资源禀赋不佳, 产量低, 长期以来, 铬矿石对外依存度高。研究铬矿未来供需情况, 对于铬矿资源产业良性持续发展至关重要。【研究方法】本文对我国铬矿床地质、空间分布和资源储量等特征进行了总结, 分析了我国铬矿资源开发利用的历史数据。在此基础上预测了我国铬供应量, 并进一步利用铬部门消费法、人均不锈钢产量“S”形法、ARIMA 模型法(不锈钢)等预测方法, 分高、中、低 3 种情景对我国 2021—2035 年不锈钢产量和铬需求量进行了预测。【研究结果】(1)2021—2035 年我国矿山铬年预测产量(矿石量)为 15~20 万 t, 二次铬预测产量(铬金属量)在 182~284 万 t 内;(2)在中情景下, 2021—2035 年我国铬需求量呈现先增后降的趋势, 峰值点为 2030 年。2021—2030 年我国人均不锈钢产量呈上升趋势, 2030 年到达峰值点, 届时人均不锈钢产量 35 kg, 不锈钢产量 5005 万 t, 折铬总需求量 945.39 万 t; 之后逐渐下降, 到 2035 年人均不锈钢产量降至 30 kg, 不锈钢产量 4280 万 t, 铬总需求量 808.44 万 t。(3)2021—2035 年, 我国铬供需形势严峻, 矿山铬对外依存度 99% 以上, 若利用二次铬产量, 则铬对外依存度降至 69% 以上。【结论】2021—2035 年我国铬供需形势仍将严峻, 缺口仍需大量进口矿石来补充。据此, 提出加强铬矿地质勘查工作力度、力争实现铬矿找矿突破, 重视二次铬回收利用、发展二次铬回收产业, 加强铬矿产品储备、保障铬矿产品供应安全, 优化铬矿产品结构, 利用境外铬矿资源产品等对策结论。本文所形成的认识结论、对策建议对我国编制矿产资源规划、制定铬矿资源管理政策等具有一定的现实意义。

关键词: 铬矿资源; 人均不锈钢产量; 不锈钢产量“S”形法; 需求预测; 供需形势; 矿产勘查工程; 中国

创新点: (1)系统分析了不同情景下 2021—2035 年我国铬供需趋势; (2)综合了部门消费法、人均不锈钢产量“S”形法、ARIMA 模型(不锈钢)等多方法优点, 提高了预测的精度。

中图分类号: F426.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)04-1191-19

Chromite ore resources characteristic and analysis of supply and demand situation from 2021 to 2035 in China

ZHANG Zhaozhi, PAN Zhaoshuai, CHE Dong, YAN Qiang, WU Qing

(MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Chromium, as one of the critical minerals in China, supports the development of China's emerging industries. China is short of chromium ore resources, poor resource endowment and low production. For a long time, the chrome ore has been highly

收稿日期: 2022-09-09; 改回日期: 2022-12-15

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211405, DD20221694)资助。

作者简介: 张照志, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事资源产业经济研究工作; E-mail: 1264124110@qq.com。

通讯作者: 潘昭帅, 男, 1994 年生, 博士生, 主要从事资源产业经济研究工作; E-mail: 996817743@qq.com。

dependent on foreign countries. It is important for the healthy and sustainable development of chromium ore resource industry to study the future supply and demand of chrome ore. **[Methods]** This paper summarizes the geology, spatial distribution, resource reserves and other characteristics of chromium deposits in China, and analyzes the historical data of the development and utilization of chromium resources in China. On this basis, the chromium supply in China is analyzed and predicted. And the stainless steel production and chromium demand in 2021–2035 in China are predicted under three scenarios, namely high, medium and low, by using chromium sector consumption method, S-curve of per capita stainless steel production, ARIMA model method (stainless steel) and other prediction methods. **[Results]** (1) The production of chromium in China will be 150,000–200,000 tons, and the secondary chromium will be 1.82–2.84 million tons from 2021 to 2035; (2) Under the medium scenario, the demand for chromium in China from 2021 to 2035 is projected to follow an increasing and then decreasing trend, with the peak occurring in 2030. And, the per capita stainless steel production will keep an upward trend from 2021 to 2030, and will reach its peak in 2030. At that time, the per capita stainless steel production will be 35 kg, the stainless steel production will be 50.05 million tons, and the chromium demand will be 9.45 million production; After that, it will gradually decline. By 2035, the per capita stainless steel production will drop to 30 kg, the stainless steel production will be 42.8 million tons, and the chromium demand will be 8.07 million tons; (3) The supply and demand situation is severe in China from 2021 to 2035, and the external dependence rate of chromium will exceed 99%. If secondary chromium production is used, the external dependence rate of chromium will drop to more than 69%. **[Conclusions]** The supply and demand situation of chromium in China will still be severe, and the gap still needs to be supplemented by a large number of imported ores from 2021–2035. On this basis, it is proposed to strengthen the geological exploration of chromium ore, strive to achieve a breakthrough in chromium ore prospecting, attach importance to the secondary chromium recovery, develop the secondary chromium recovery industry, strengthen the reserves of chromium ore products, ensure the safety of chromium ore product supply, optimize the structure of chromium ore products, and make use of overseas chromium ore resources and products. The conclusions and suggestions formed in this paper are of practical significance to the compilation of mineral resources planning and the formulation of chromium mineral resources management policies in China.

Key words: chromium ore resources; per capita stainless steel production; S-curve (per capita stainless steel); demand forecast; supply and demand situation; mineral exploration engineering; China

Highlights: (1) The supply and demand trends of chromium ore in China from 2021 to 2035 under different scenarios are systematically analyzed and discussed; (2) The advantages of multiple methods such as sectoral consumption method, the S-curve of per capita stainless steel production, and ARIMA modularity were combined to improve the prediction accuracy.

About the first author: ZHANG Zhaozhi, male, born in 1967, researcher, doctoral supervisor, engaged in the mineral resource industry economy; E-mail: 1264124110@qq.com.

About the corresponding author: PAN Zhaoshuai, male, born in 1994, Ph.D. candidate, engaged in the resource industry economy; E-mail: 996817743@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20211405, No.DD20221694).

1 引 言

铬是一种银白色金属,具有质硬、耐磨、耐高温,且化学性质稳定的特性。铬绝大多数以尖晶石类的氧化物存在,属亲石元素。铬矿作为我国关键性矿产之一,是支撑我国战略性新兴产业发展的重要矿种。澳大利亚(2020)、美国内政部(2018)、日本(2009)等国家将铬列为关键矿产或关键原材料。铬矿石、铬铁合金、不锈钢、重铬酸钠等各类铬矿产品广泛应用于冶金(不锈钢)、耐火材料、铸造等产业。

本文将铬矿资源产业分为传统产业和新兴产

业,传统产业主要包括:铬矿资源开采、选矿、铬铁合金生产、不锈钢和合金钢的生产、重铬酸钠等化工产品的生产、耐火材料生产等;在不锈钢生产中,铬尚不能被其他金属所替代。在我国战略性新兴产业中,铬主要应用于新材料产业,用于先进钢铁、有色金属材料制造与加工,主要产品为高性能轴承、齿轮用钢、高品质不锈钢、铜合金、靶材(铬靶)、粉末等,这些新材料产品最终应用于航空航天、造船、汽车以及国防工业生产枪炮、导弹、火箭、舰艇以及特种合金,制造飞机引擎、核能器械等领域。2020年我国铬表观消费量(Cr)569.29万t,其中,传统铬矿资源产业铬消费量398.5万t,占比

约 70%; 战略性新兴产业中铬消费量 170.79 万 t, 占比达 30%(国家统计局, 2018; 鞠建华等, 2022)。我国铬矿石产量很少(小于 20 万 t), 而 2020 年铬铁和不锈钢产量均分别占世界的 42.77% 和 59.01%, 均具世界第一位。

2015 年, 原国土资源部组织开展了我国铬矿资源 2020—2030 年保障程度论证, 对铬矿可供性及保障程度进行了研究。朱明玉等(2013)、张炜(2016)、王登红等(2018)等对我国铬矿床的特征、矿床类型、矿床成因、成矿规律、潜力评价、典型铬矿床等进行研究。刘璇(2015)、郑明贵和袁雪梅(2018)、张泽南等(2019)等利用灰色神经网络等方法对我国的铬需求进行了预测, 分析了铬矿资源供应安全态势, 并对全球铬矿石资源国对中国供应安全度进行了分析。铬矿保障程度论证与可供性论证是基于 2014 年的数据开展的, 与目前我国铬矿生产供应现状已不相符合。

长期以来, 我国铬矿产品的对外依存度高, 2020 年达到 99%, 是严重依赖境外铬矿产品的矿种, 需要掌握未来一段时期内我国铬需求量和可供性, 现有预测方法多为线性外推, 方法单一, 造成预测数据不够准确。本文对我国铬矿床地质、资源储量、空间分布等特征进行了综述与综合研究, 利用多种方法、相互印证, 分析预测了我国 2021—2035 年铬矿资源供需形势。本文所形成的认识结论、对策建议对我国编制铬矿资源战略规划、制定矿政管理政策, 支撑国家资源决策等具有一定的意义。

2 研究方法及技术路线

利用不同预测方法, 分铬供应侧和铬(消费)需求侧开展供需形势分析(图 1)。

2.1 2021—2035 年我国铬供应量预测方法

就铬需求预测而言, 已有文献预测时间较短, 且结果也不尽合理, 如类比法预测结果认为 2020 年我国不锈钢产量达到滞胀(鹿宁, 2018), 也就是所说的零增长点, 但由于选取对比参数存在一定不确定性, 导致预测结果与 2020 年的现状产生了偏差; 灰色神经网络预测法的预测结果基本上是线性增长(黄大荣和黄丽芬, 2009), 与我国不锈钢产业发展的现状不符。本文利用铬部门消费法、人均不锈钢产量“S”形法、ARIMA 模型(不锈钢)等预

测方法, 互相印证, 对我国 2021—2035 年铬需求量进行预测, 在一定程度上弥补前人研究方法的不足。

铬供应量预测。在综述我国铬矿床地质、资源储量和空间分布特征的基础上, 对我国铬矿石供应量进行预测: (1)对国内铬矿石产量进行预测。利用我国铬矿石产量发展变化历史与现状, 利用专家经验和对比分析法, 结合我国铬矿山生产的生命周期, 综合预测我国 2021—2035 年铬矿石产量, 折算出矿山铬产量。(2)二次铬产量预测。利用美国等不锈钢回收历史较长国家不锈钢回收利用的历史经验及相关数据, 结合我国铬消费量历史与现状数据, 利用对比法, 测算出我国不锈钢 2021—2035 年回收量, 折算为预测的二次铬产量。(3)矿山铬产量与二次铬产量相加, 得到 2021—2035 年全国预测的铬供应总量。

铬需求量预测。利用铬部门消费法、人均不锈钢产量“S”形法、ARIMA 模型(不锈钢)等预测方法, 对我国 2021—2035 年铬需求量进行了预测。其中, 参考借鉴人均矿产资源消费“S”形法成果(王安建和王高尚, 2002; 王安建等, 2008; 陈其慎等, 2010; 高蕊蕊和王安建, 2010; Wang et al., 2015)等。

本文探索性地利用人均不锈钢产量“S”形法, 预测了不锈钢非线性的预测产量。ARIMA 模型(不锈钢)也是首次在不锈钢产量预测中探索使用。

本文不锈钢产量采集时段为 1980—2020 年, 共 40 年, 选择了日本、美国、韩国、比利时、意大利、芬兰、瑞典、德国、法国、西班牙、中国台湾等 11 个国家和地区。中国不锈钢产量和铬表观消费量采集时段为 1952—2020 年。

2.2 2021—2035 年我国铬需求量预测

根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(以下简称“国家十四五规划”), 确定开展需求预测所需的经济指标为: 相关国家或地区 GDP 总量及年均增长率, 人均 GDP 及年均增长率, 人口、人均铬消费量, 单位 GDP 铬消费量等。

利用铬部门消费法, 将铬消费量占比达 90% 的不锈钢产量进行预测, 分别采用了 ARIMA 模型法(不锈钢)和不锈钢人均产量“S”形法, 综合预测 2021—2035 年我国不锈钢产量, 折合为全国铬需求量, 确定铬需求的起飞点、转折点、零增长点等

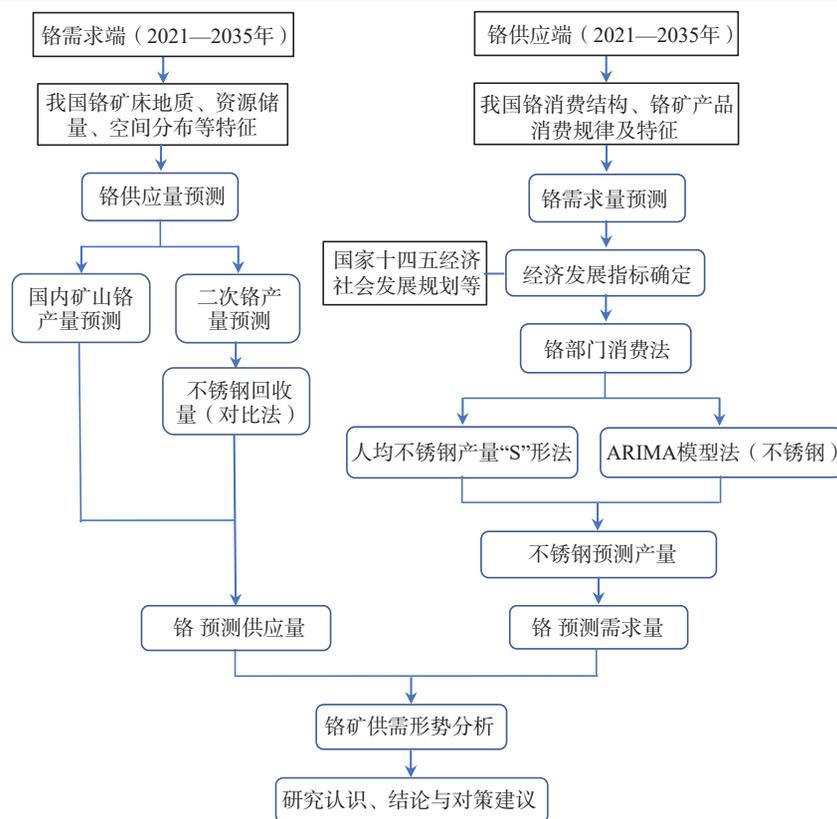


图1 中国铬矿供需形势分析研究技术路线与方法

Fig.1 Diagram of research technology route and method of chromium ore supply and demand situation analysis

位置。

2.3 2021—2035年我国铬供需形势分析

利用2021—2035年我国铬供应量和需求量预测结果,对我国铬矿供需形势进行分析,明确铬供需缺口,测算未来我国铬需求的对外依存度,铬矿资源保障程度等,形成若干研究认识与结论,提出相关对策建议。

3 我国铬矿资源特征

3.1 铬矿床类型

世界上现有层状、蛇绿岩型豆荚状、基性—超基性岩型似层状和外生4种铬矿床类型,我国只发现蛇绿岩型豆荚状、基性—超基性岩型似层状2种铬矿床类型(自然资源部矿产资源保护监督司和自然资源部矿产资源储量评审中心,2021)。

3.1.1 蛇绿岩型豆荚状铬矿床

该类型是中国铬矿床的主要类型,与造山带蛇绿岩带(套)密切相关。铬矿体多赋存于以斜辉辉橄岩为主的纯橄岩、斜辉辉橄岩等镁质超基性岩体

中,这些岩体的 $M/F > 8$ 。在靠近纯橄岩岩相接触带的一定距离内,由厚度不大的斜辉辉橄岩、纯橄岩频繁交替出现,且蛇纹石化较强,还伴随有较多的构造破碎带、片理化带和辉长—辉绿岩脉,构成“含矿构造岩相带”,成为该岩体内豆荚状铬矿体产出的主要部位。该岩相带内铬矿体常成群、成带集中,在平面上多雁行式展布,剖面上叠瓦状排列,具有分支复合、尖灭再现和沿侧伏方向延伸等特征。近矿围岩以斜辉辉橄岩为主,纯橄岩次之,铬矿体与围岩界限清楚。铬矿体产状多变,形态复杂,形态复杂,常呈豆荚状、雪茄状、囊状、透镜状或其他不规则状产出。

这类铬矿床有两种堆晶岩岩石组合,一种是在堆晶岩中出现辉石类,岩体由地幔橄辉岩和辉石岩、辉长岩等组成,如罗布莎岩体,含矿性好,矿石质量高,主要赋存冶金级铬矿石,查明资源量较大;另一种是在堆晶岩中出现橄长岩类,岩体由地幔橄辉岩和含有斜长石的橄辉长岩等组成,如新疆哈古勒楞岩体、内蒙古贺根山岩体等。

铬矿石常具他形—半自形粒状结构、碎裂结构、包橄结构、交代网脉状结构、塑性变形结构等。矿石构造有致密块状、浸染状、豆状、瘤状构造等。

蛇绿岩型豆荚状铬矿床的铬矿石中一部分铬矿石品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 在 45% 以上, $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\omega(\text{FeO}) > 3.5$; 另一部分铬矿床矿石中 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 在 20%~35%, $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\omega(\text{FeO})$ 为 2~2.7。典型铬矿床: 罗布莎铬矿、东巧铬矿、萨尔托海铬矿、鲸鱼铬矿、贺根山铬矿等。截至 2019 年末, 这类铬矿床的铬矿查明资源储量占全国的 88.28%, 铬矿石平均品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为 38.66%(自然资源部, 2021a)。

3.1.2 基性—超基性岩型似层状铬矿床

该类矿床成矿专属性强, 产于地台区受断裂控制的高温橄榄岩中, 含铬矿岩体为超基性—基性岩, 岩体多为纯橄岩为主的纯橄岩—单斜辉石岩杂岩体。铬矿体多赋存于纯橄岩相内的粗粒—伟晶纯橄岩中, 与围岩呈渐变过渡关系。铬矿体形态复杂, 多呈扁豆状、透镜状、脉状和不规则团块状(鲍佩声等, 1999)。

已发现铬矿床规模均为小型, 铬矿体一般长几十米, 最长 200 m 左右, 厚 0.5~7 m。金属矿物主要为铬铁矿, 其次为少量磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿。矿石结构主要为自形、半自形、他形细粒—中粒结构。矿石构造主要为不同类型的浸染状、块状、条带状构造, 还常见显微环状、斑点状构造。铬矿石中 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 在 5%~20%, $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\omega(\text{FeO}) < 2$ 。该类型铬矿床的资源量在我国铬矿资源量中占比很少, 且基本上为贫矿石, 需经选矿后在工业上得到利用。典型铬矿床: 河北高寺台铬矿、毛家厂铬矿, 北京的放马峪铬矿和平顶山铬矿等。截至 2019 年末, 这类铬矿床的保有查明资源储量占全国的 11.72%, 铬矿石平均品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 13.68%。这类贫矿经选矿后可作为耐火材料使用(自然资源部, 2021a, b)。

3.2 铬矿资源储量特征

2021 年, 世界商品级铬矿的储量为 5.7 亿 t。世界铬矿石资源分布高度集中, 南非、哈萨克斯坦、印度、芬兰、土耳其 5 国的储量占比合计超过 99%(表 1)。

中国铬矿资源匮乏, 铬矿石质量差。根据《2020 年全国矿产资源储量统计表》(自然资源部,

表 1 2021 年世界铬铁矿分布

Table 1 Distribution of chromium reserves in the world in 2021

国家	储量*/万t	储量分布/%
南非	20000	35.1%
哈萨克斯坦	23000	40.4%
印度	10000	17.5%
芬兰	2600	4.6%
土耳其	1300	2.3%
世界总量	57000	100.0%

注: *储量为商品级铬矿石量(保有量); 除美国铬矿石品位 Cr_2O_3 归一化为 7%、芬兰铬矿石品位 Cr_2O_3 归一化为 26%, 其他国家的铬矿石品位 Cr_2O_3 一律归一化为 45%; 数据来源: USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2022, Chromium。

2021a), 截至 2020 年末, 我国铬矿保有查明储量(矿石量, 下同) 276.97 万 t, 分布在西藏、甘肃、新疆和河北等 4 省区, 占比分别为 75.61%、17.73%、5.60% 和 1.06%。截至 2019 年末, 我国铬矿区 63 个, 查明资源储量 1210.75 万 t, 主要分布在西藏、新疆、甘肃、内蒙古等 14 省(自治区、直辖市)。2006—2019 年, 我国铬矿查明资源储量年均增长率 1.42%, 2019 年铬矿勘查增加查明资源储量 24.4 万 t, 自 2010 年以来, 我国铬矿查明资源储量略有下降(自然资源部, 2021b)。从铬矿石质量看, 我国铬矿查明资源储量的平均品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为 27.13%(统计我国 54 个铬矿区查明资源储量加权平均数), 平均品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 32\%$ 的富铬矿查明资源储量 288.7 万 t, 约占全国的 23.85%。按规模分, 中型铬矿床 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为 35.7%, 小型 20.69%。铬矿中常伴生钼、铌、钽等铂族金属以及镍、钴、金等元素, 当铂族总量大于 0.2 g/t, Co 大于 0.02%, Ni 大于 0.2% 时, 应作出评价(《矿产资源工业要求手册》编委会, 2010)。铬矿体围岩纯橄岩、斜方辉石岩、蛇纹岩等可作耐火材料和钙镁磷肥的配料, 当达到矿床综合评价工业指标时, 开展综合勘查、综合评价、综合利用, 提高铬矿资源综合利用率。

4 中国铬供应量分析预测

在系统综述中国铬矿床地质、资源储量和空间分布特征的基础上, 开展我国铬供应量预测。

4.1 国内铬矿石(铬)供应量分析

4.1.1 矿山铬产量发展演变

中国铬矿石产量很少, 2020 年我国铬矿石产量 14.63 万 t(折铬产量 4.47 万 t), 占世界的 0.36%。1958—2020 年 63 年间, 铬矿石(原矿)累计产量

612.94 万 t(折铬产量 187.44 万 t), 铬矿石产量呈现波浪式增长与下降的曲线, 1958—1987 年为低增长阶段, 产量在 0.3~7.5 万 t 间波动; 1988—2007 年为快速增长阶段, 铬矿石产量由 1988 年的 3.7 万 t 增长到 2007 年的历史最高值 28.15 万 t, 之后逐渐下降, 2018 年降至 2.3 万 t(图 2), 但 2019—2020 年有增长的趋势。

4.1.2 2021—2035 年矿山铬产量预测

据对西藏、新疆的调研, 结合我国铬矿资源及其开发利用特点, 预测 2021—2035 年我国矿山铬

矿石供应量大约在 15~20 万 t, 按照截至 2020 年末我国铬矿保有储量(矿石量)225.26 万 t 测算(加上部分铬矿查明资源储量转化的储量), 依据原国土资源部公布的矿产资源合理开发利用“三率”指标, 铬矿地下矿山开采回采率不低于 85% 计算, 2021—2035 年我国铬矿石年产量在 14~20 万 t, 呈现先升后降的态势, 2021 年铬矿石产量预计 15 万 t, 2028 年升至 20 万 t, 2035 年降至 14 万 t(图 3)。这与矿山生产的生命周期基本相符, 若没有新增储量, 到 2035 年末, 这部分铬矿查明保有储量将消耗殆尽。

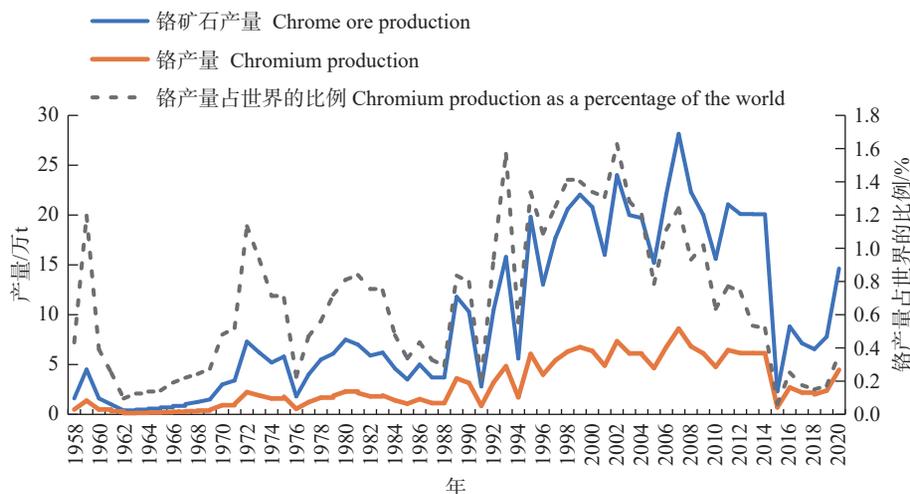


图 2 1958—2020 年我国矿山铬矿石(铬)产量及其在世界的比例(数据来源: USGS, 1996—2022, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>; 《中国铬矿志》编辑委员会, 1996; 朱训, 1999)

Fig.2 Mine production of chromium ore in China and proportion in the world from 1958 to 2020 (Data source: USGS, 1996—2022, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>; Editorial Committee, *Chronicles of Chromium Mines in China*, 1996; Zhu Xun, 1999)

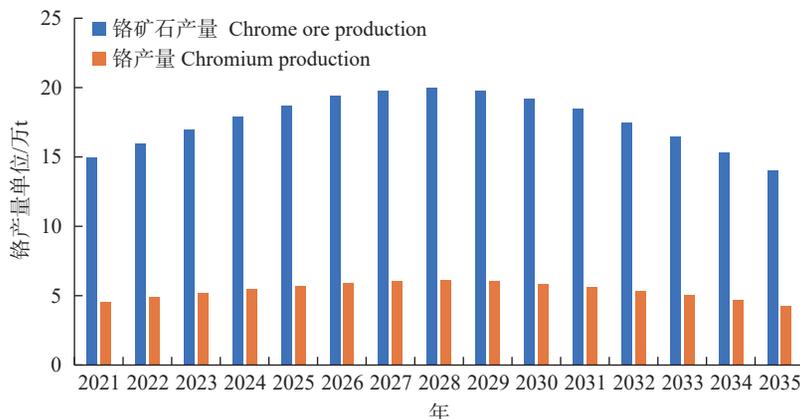


图 3 2021—2035 年我国铬矿石(铬)产量预测(数据来源: USGS, 2000—2020, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information> 调研数据)

Fig.3 Prediction of chromium ore (chromium) production in China from 2021 to 2035 (Data source: USGS, 2000—2020, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>, mine survey)

4.2 中国二次铬产量分析预测

按照不锈钢的一般技术指标, 不锈钢铬含量约 17%, 二次铬回收主要通过不锈钢的回收而得到。

二次铬产量=铬表观消费量×(二次铬产量占铬表观消费量的比例)

其中, 铬表观消费量通过不同预测方法测算得到, 二次铬产量占铬表观消费量的比例通过与美国铬回收量比例对比得出。

美国不锈钢回收历史较长, 本文统计了 1962—2020 年二次铬产量数据资料。本文利用美国二次铬产量与铬表观消费量的比例, 类比我国在其相同发展阶段的比例, 测算出我国二次铬产量。2020 年我国人口 14.05 亿, GDP 总值 101.6 万亿元(折 23.09 亿美元, 1990 GK 美元, 下同), 人均 GDP 7.2 万元(折 1.63 万 GK 美元/人)。1972 年美国人均 GDP 约 1.63 万 GK 美元, 与中国 2020 年人均 GDP 相当, 当年美国二次铬产量约占其铬表观消费总量的比例 23.92%, 中国按照 25% 的回收量的比例测算(图 4)。1972 年美国人均 GDP(1999GK 美元)值与中国 2020 年的人居 GDP 值大体相当, 也就是两国折算到同一时点的现值(Höök et al., 2011; Wang et al., 2015; Gao et al., 2018; Michael, 2022)。

中国二次铬产量测算结果。中国 2020 年二次铬产量 142.32 万 t。1952—2020 年二次铬累计产量 1366.83 万 t。1952—2003 年我国二次铬产量很

低, 大约 0.7~5.38 万 t 范围, 2004 年超过 10 万 t, 2010 年升至 53.15 万 t, 2019 年增至 138.83 万 t。2004—2020 年二次铬产量年均增长率 17.25%(图 5, 图 6)。

我国不锈钢产业的发展经历启动期(1952—2000 年)和发展期(2001 年至今)两个阶段。不锈钢产量从 1952 年的不足 20 万 t 上升至 1978 年的 22.97 万 t, 2000 年增至 60 万 t, 这一阶段为我国不锈钢的启动期, 产量低、品种不全。2001—2020 年为我国不锈钢的发展期, 从 2001 年开始, 不锈钢产量进入快速发展增长阶段, 当年不锈钢产量 73 万 t, 2010 年增至 1125.6 万 t, 2020 年达到 3013.9 万 t。2001—2020 年不锈钢产量年均增长率达 21.63%。1952—2020 年我国不锈钢累计产量 2.9 亿 t, 其中 2011—2020 年累计产量 2.29 亿 t, 约占总累计产量的 78.97%。随着我国不锈钢累计产量的增加, 按照不锈钢生命周期 20 年测算, 废不锈钢回收量将逐渐增加, 由于社会蓄积量不断增加, 二次铬产量将会相应增加(图 6)。

2021—2035 年我国二次铬产量预测。

二次铬产量=当期铬表观消费量×二次铬产量占铬表观消费量的比例

其中, 铬表观消费量通过不同预测方法测算得到, 二次铬产量占铬表观消费量的比例通过与美国铬回收量比例对比得出。

利用国别间的类比法, 与美国二次铬生产规律对比, 1972 年美国二次铬产量约占其铬表观消费总

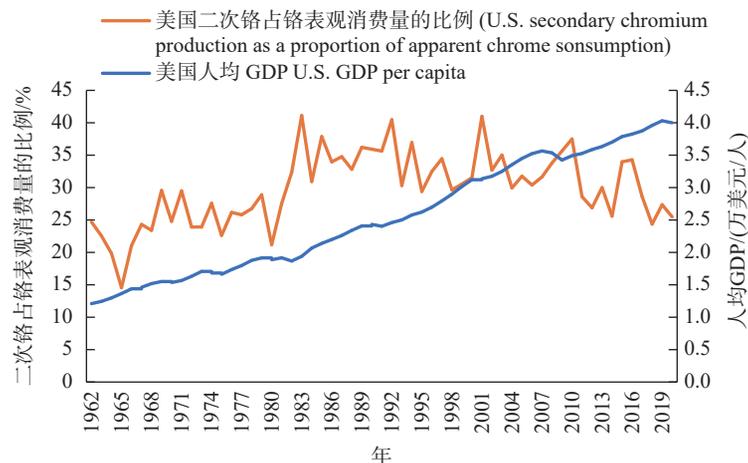


图 4 1962—2020 年美国二次铬产量占铬表观消费量的比例与人均 GDP(基础数据来源: 二次铬 USGS, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>, 人均 GDP 世界银行)
Fig.4 Proportion of secondary chromium production in apparent chromium consumption and per capita GDP in the United States from 1962 to 2020 (Data source : USGS, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>, GDP per capita from the World Bank)

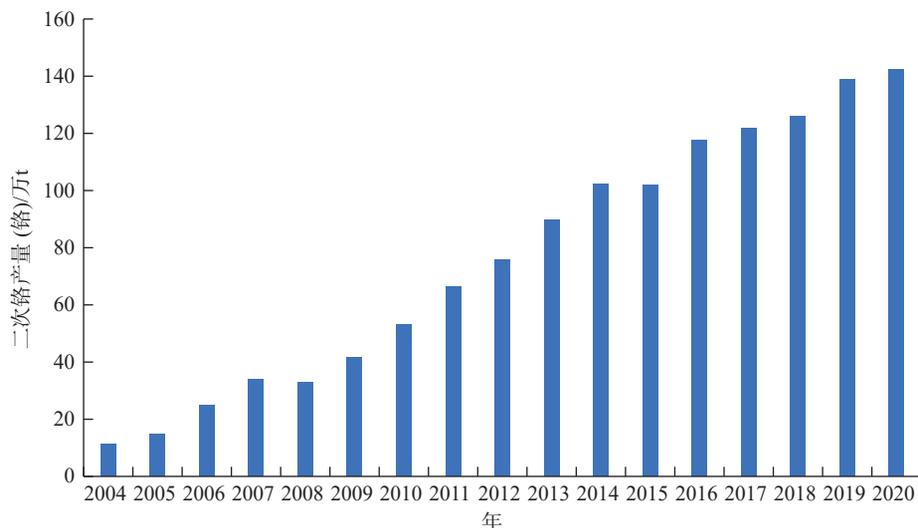
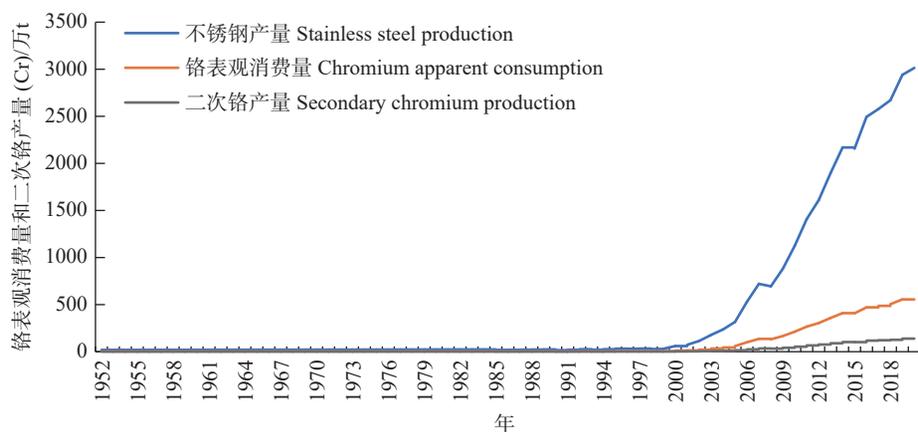


图 5 2004—2020 年我国二次铬产量变化

Fig.5 Productions of secondary chromium in China from 2004 to 2020

图 6 1952—2020 年我国二次铬、铬表观消费量和不锈钢产量变化(不锈钢产量数据来源: World Bureau of Metal Statistics, 1979—2021, <https://world-bureau.co.uk/publications-services/metals-database/>)Fig.6 Secondary chromium, chromium apparent consumption and stainless steel production in China from 1952 to 2020 (Data source: World Bureau of Metal Statistics from 1979 to 2021, <https://world-bureau.co.uk/publications-services/metals-database/>)

量的比例 23.92%，2020 年中国按照 25% 比例测算，考虑到回收技术进步、铬产业发展、科技创新、政策等驱动发展因素对二次铬回收利用的复合影响，2021—2035 年中国二次铬产量占铬表观消费量的比例取 30%。2021—2035 年预测的我国二次铬产量、人均二次铬产量的趋势呈先升后降的态势。2021 年预测的二次铬产量 182.18 万 t，人均二次铬产量 1.29 kg，2025 年、2030 年和 2035 年预测的二次铬产量分别为：249.28 万 t、283.62 万 t 和 242.53 万 t，人均二次铬产量分别为：1.75 kg、1.98 kg 和 1.70 kg(图 7)。

5 铬需求量预测

5.1 1952—2020 年我国铬表观消费量测算

2020 年我国铬表观消费量 569.29 万 t。铬消费结构：不锈钢铬消费量占比 90%，合金钢占比 4%，耐火材料与铸造占比 3.39%，化学工业占比 2.25%，其他占比 0.33%。本文采取铬部门消费法加不锈钢产量法测算铬表观消费量，预测结果较准确。

按照铬部门消费结构，铬在不锈钢中的消费量占比约 90%，铬在不锈钢中的平均含量为 17%，生产 1 t 不锈钢大约消费 0.17 t 的铬。据此测算出我

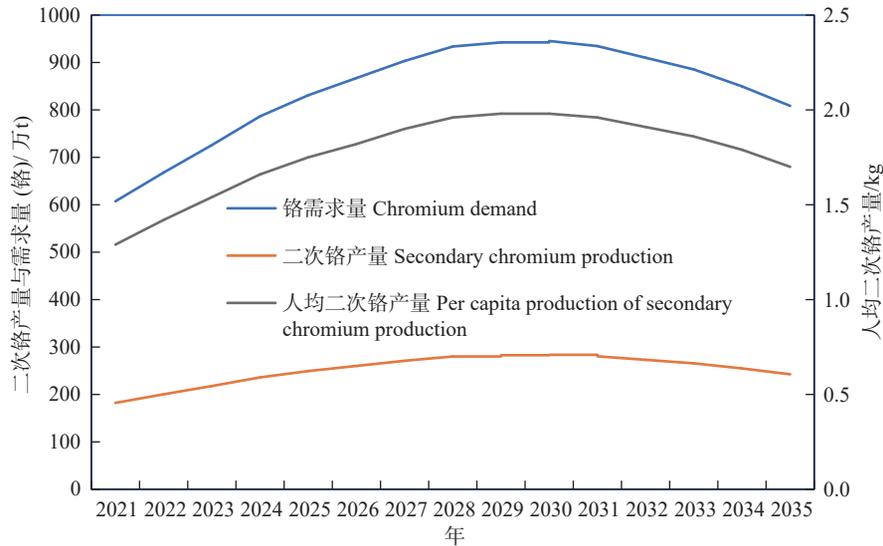


图 7 2021—2035 年中国预测的二次铬回收量与人均二次铬产量变化图

Fig.7 Projected secondary chromium production and per capita production of secondary chromium production in China from 2021 to 2035

国铬表观消费量, 测算公式为:

$$\text{铬表观消费量} = \text{不锈钢产量} \times 0.17 \div 0.90。$$

通过这种测算方法, 铬表观消费量的预测结果较准确, 本文采用这种方法测算出的铬表观消费量数据。测算结果表明: 2020 年我国铬表观消费量 569.29 万 t。1958—2020 年 63 年间, 我国累计铬表观消费量 5467.31 万 t。1952—1999 年间, 我国铬表观消费量很低, 在 3.59~6.27 万 t 范围内波动, 年均增长率 0.99%, 属于低增长期。2000 年后, 随着我国不锈钢产量的增加, 我国铬表观消费量不断攀升, 步入高增长期, 2000 年不锈钢产量 60 万 t, 2010 年增至 212.61 万 t, 2019 年增至 555.33 万 t; 2000—2020 年我国铬表观消费量年均增长率为 21.63% (图 6)。

5.2 2021—2035 年我国铬需求量预测

利用我国铬部门消费法、人均不锈钢产量“S”形法、ARIMA 模型法(不锈钢)等预测方法, 对我国 2021—2035 年铬需求量进行预测。

利用铬部门消费法, 将铬消费量占比 90% 的不锈钢产量进行预测, 分别采用了不锈钢人均产量“S”形法和 ARIMA 模型法(不锈钢)等预测方法, 经综合研究、客观分析, 预测出 2021—2035 年我国不锈钢产量, 其中消费的铬, 可折算为全国铬需求量, 同时为确定铬需求起飞点、转折点、零增长点等位置提供支撑。

5.2.1 人均不锈钢产量“S”形法

预测经济指标的选择: 以 2020 年为铬需求量预测基准年, 选取指标: 人口数据参考联合国人口司预测数据, 因测算人均 GDP、人均铬消费量等人均指标时, 需要人口数据的支撑; GDP 增速参考世界银行(The World Bank)和国际货币基金组织(IMF)预测指标, 结合《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中的相关发展指标, 本文确定 2021—2025 年 GDP 增长率 5%, 2026—2030 年 4%, 2031—2035 年 3%; 3 个预测时段人均 GDP 年均增长率分别为 4.8%、3.9% 和 3.1%。铬需求量预测指标: 1980—2020 年不锈钢产量, 不锈钢中铬平均含量(17%)等。

国家或地区选择: 2020 年世界上共有 23 个国家或地区生产不锈钢, 不锈钢总产量 5091.61 万 t, 其中有 12 个国家为发达国家。因为不锈钢规模化生产历史较短, 不锈钢产量数据采集时段为 1980—2020 年 40 年, 选择了日本、美国、韩国、比利时、意大利、芬兰、瑞典、德国、法国、西班牙、中国台湾等 11 个国家和地区, 按照横坐标为人均 GDP(1999 GK 美元)、纵坐标为人均不锈钢产量, 编制人均不锈钢产量与人均 GDP 散点图, 通过对每个国家或地区描绘趋势线, 显示出与我国大宗矿产资源“S”形消费规律和倒“U”形变化规律(图 8, 图 9)。

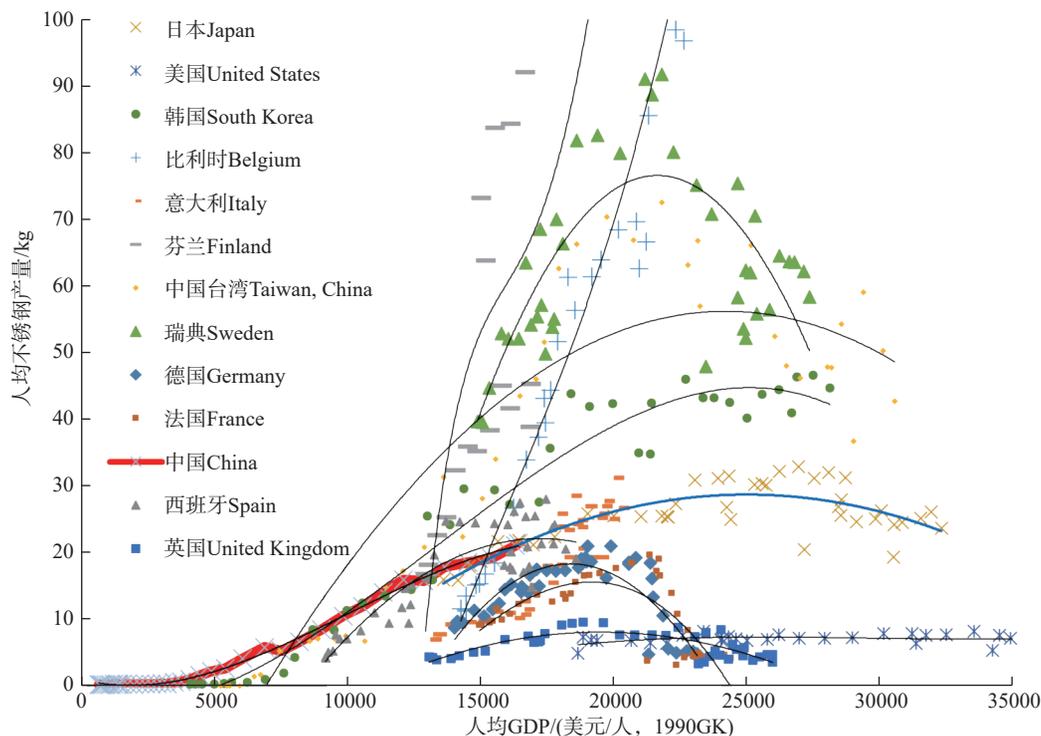


图8 世界主要国家或地区不同发展阶段人均GDP与人均不锈钢产量“S”形曲线图(红色粗线为中国未来人均不锈钢产量演进趋势线,其他线条为不同国家人均不锈钢产量演进的趋势线)

Fig.8 S-shaped curve between GDP per capita and stainless steel production of the main countries and regions in their different stages of development in the world (The red bold line represents the evolution trend of per capita stainless steel production in China in the future, while the other lines represent the trend lines of per capita stainless steel production evolution in different countries)

人均不锈钢产量“S”形曲线的高度刻画出人均不锈钢产量在不同发展阶段的产量强度,位置越高表示在某一发展阶段人均产量越高,据此可划分为3类国家或地区,具体特征见表2。

(1)高“S”形国家和地区。人均GDP和人均产量经过了峰值点。这类国家和地区包括:瑞典、中国台湾和韩国。如瑞典在2001年前后到达峰值点,人均GDP 2.12~2.18万美元,人均不锈钢产量75~78 kg,之后沿“S”形轨迹下降,2020年人均不锈钢产量降至56.42 kg,人均GDP 2.59万美元。中国台湾在2007年前后到达峰值点,人均GDP 2.1~2.3万美元,人均不锈钢产量55~58 kg,之后沿“S”形轨迹下降,2020年人均不锈钢产量降至36.65 kg,人均GDP 2.9万美元。韩国于2015年前后到达峰值点,人均GDP 2.56~2.75万美元,人均不锈钢产量43~46 kg,之后下降,之后沿“S”形轨迹下降,2020年降至40.93 kg,人均GDP 2.67万美元。比利时和芬兰由于是不锈钢强国,生产历史长,人口总量少,显示出其特殊性,高人均GDP、高人均产

量,且显示仍在增长的趋势。比利时不锈钢产量由1980年11万t升至2020年的135.73万t,人均产量由11.17 kg升至117.18 kg;芬兰不锈钢产量由1980年8万t升至118.58万t,人均产量由16.74 kg升至213.06 kg。作为不锈钢主要生产国,两个国家生产的不锈钢有相当大的比例用于出口。1999—2020年,比利时不锈钢出口量峰值为34万t(2000年),低谷时仅有6866 t(2014年),人均出口量约6 kg/人。芬兰不锈钢产业链体系完整,生产铬矿石、铬铁和不锈钢产品。1990—2020年,芬兰不锈钢出口量峰值可达40万t(2004年),低谷时不足百吨,人均出口量可达到66 kg/人。

(2)中“S”形国家或地区。主要以日本为典型。日本于2000年左右达到峰值点,人均GDP 2.44~2.56万美元,人均不锈钢产量28~30 kg,之后沿“S”形轨迹下降,2020年人均不锈钢产量降至19.28 kg,人均GDP 3.05万美元。日本曾于1910—1993年间生产过铬矿石,1974—2020年一直生产铬铁,铬铁产量由1974年54.2万t降至2020年

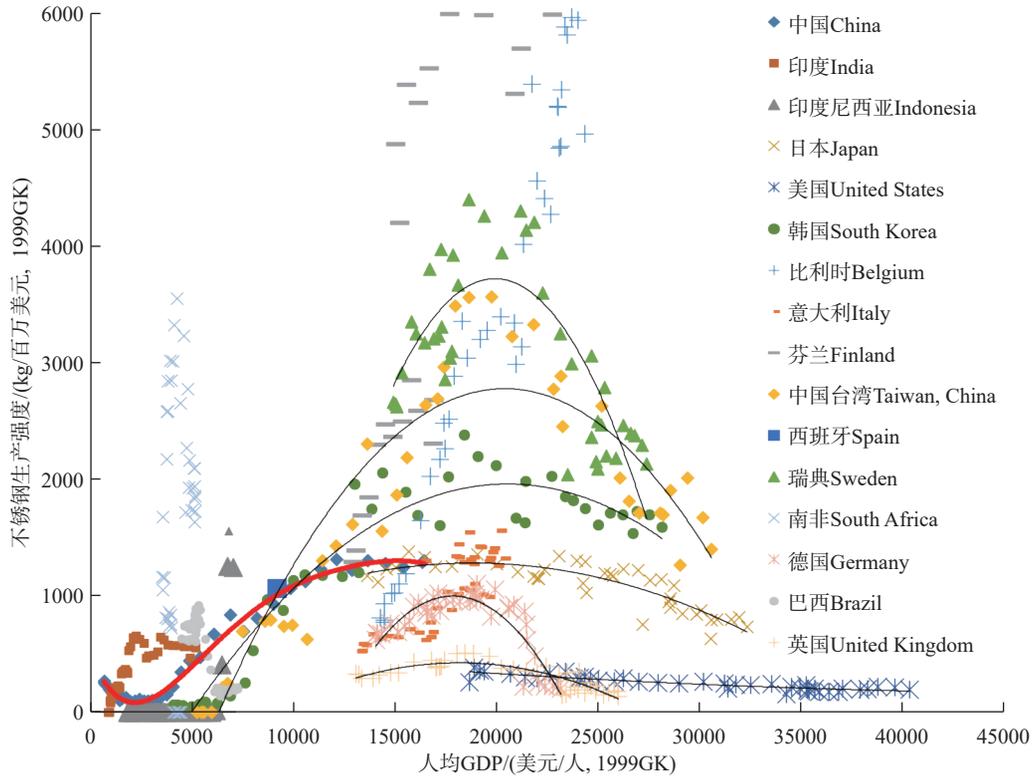


图 9 典型国家或地区不锈钢产量强度和人均 GDP 的关系图(倒“U”形曲线)(红色粗线为中国未来不锈钢产量强度演进趋势线,其他线条为不同国家不锈钢产量强度演进的趋势线)

Fig.9 Relationships between GDP per capita and stainless steel production intensity of the typical countries or regions (Inverted U-shaped curves) (The red bold line represents the trend line in the evolution of stainless steel production intensity in China in the future, while the other lines represent the trend lines of stainless steel production intensity evolution in different countries)

表 2 三种“S”形情景下典型国家和地区人均不锈钢产量、人均 GDP 及人均铬需求量

Table 2 Per capita stainless steel production, per capita GDP and per capita chromium demand in typical countries and regions under three scenarios

情景	参考国家或地区	峰值点/年	人均GDP/ (万美元/人, 1990 GK 美元)*	人均不锈钢产量/kg	人均铬需求量/kg
高情景(高“S”形)	瑞典	2001	2.12~2.18	75~78	12.75~13.26
	中国台湾	2007	2.1~2.3	55~58	9.35~9.86
	韩国	2015	2.56~2.75	43~46	7.31~7.82
中情景(中“S”形)	日本	2000	2.44~2.56	29~33	4.93~5.61
低情景(低“S”形)	德国	2001	1.8~1.9	19~21	3.23~3.57
	法国	1994	1.86~1.89	15~17	2.55~2.89
	英国	1994	1.81~1.88	8~9	1.36~1.53

注: *1999盖凯美元,以1990年美元为标准,将各国GDP折算成统一化的货币标准——盖凯美元,便于对比研究分析。

1.3 万 t 左右。中国铬矿资源产业发展的路径与日本具有相似性。

(3)低“S”形国家或地区。以德国、法国和英国最为典型。德国于 2001 年前后到达峰值点,人均 GDP 1.8~1.9 万美元,人均不锈钢产量 18~19 kg,之后沿“S”形轨迹快速下降,2020 年人均不锈钢产量降至 4.66 kg,人均 GDP 2.13 万美元。法国大约于

1994 年到达峰值点,人均 GDP 1.86~1.89 万美元,人均不锈钢产量 15~17 kg,之后沿“S”形轨迹下降,2020 年人均不锈钢产量降至 3.73 kg,人均 GDP 2.13 万美元。英国大约于 1994 年到达峰值点,人均 GDP 1.81~1.88 万美元,人均不锈钢产量为 8~9 kg,之后沿较偏平的“S”形下降,2020 年人均不锈钢产量降至 3.32 kg,人均 GDP 2.32 万美元。美国人均不

锈钢产量与人均 GDP 的轨迹几乎呈一条直线, 分析与美国铬矿产业结构较稳定有关, 美国 1900—1962 年有铬矿石生产, 特别是“一战”、“二战”及朝鲜战争时期铬矿石产量位居世界前列; 1974—1997 年美国有铬铁生产, 目前已不生产; 不锈钢生产所需铬几乎依靠进口, 1980—2020 年不锈钢产量呈稳定而低速的增长。

通过对比 3 种情景典型国家或地区不同发展阶段不锈钢产量“S”形曲线, 结合铬矿资源产业发展现状与趋势, 我国 2021—2035 年不锈钢产量的发展曲线(图 8 种红色虚线所示)参考借鉴日本的不锈钢产量“S”形曲线。根据“S-curve”模型构建方法(Wang et al., 2015), 编制了日本人均不锈钢产量和人均 GDP 的“S”形拟合图(图 10), 构建了日本人均不锈钢产量“S”形拟合函数。

日本人均不锈钢产量“S”形拟合函数如下:

$$S = 26 + 50 \frac{\exp[-5.67 \times 10^{-5}(G-20000)] - \exp[1.02 \times 10^{-4}(G-20000)]}{2 \cosh[1.22 \times 10^{-4}(G-20000)]}$$

式中: S 表示预测年份的需求量, G 表示预测年份的人均 GDP(美元, 1999 GK)。

从参考国家来看, 中国经济发展轨迹与日本有很多相似之处: (1)两国同属政府主导型不完全竞争经济; (2)两国都制订了适合本国情况发展的中长期规划; (3)两国都在短时期内实现了适当的产业升级; (4)两国都确立了有秩序的对外开放体制; (5)两国都实行培养高素质科技人员和劳动力的方针; (6)

两国在初期都以廉价劳动力因素为竞争手段, 且日本的工业化进程相对较短(韦伟强, 2006)。在不锈钢产业发展方面, 中国和日本几乎处于同一发展时期, 中国于 1952 年生产出不锈钢, 日本则于 1953 年进行不锈钢生产, 且目前都是不锈钢生产大国。因此, 参照日本不锈钢发展模式对 2021—2035 年中国人均不锈钢产量预测值的讨论。从高、中、低“S”形人均不锈钢产量模型和函数(日本), 得出我国高情景、中情景和低情景 3 种预测方案, 并得出预测结果(图 11)。

(1)高情景方案。主要参考借鉴了中国台湾和韩国的人均不锈钢产量高“S”形曲线进行预测。结果表明: 中国大约在 2032 年前后达到峰值点, 届时人均不锈钢产量 45.00 kg/人, 人均 GDP 1.43 万美元, 不锈钢产量 6434 万 t, 折铬需求量 1093.78 万 t。2035 年人均不锈钢产量 30 kg/人, 人均 GDP 1.4267 万美元, 不锈钢产量 4280 万 t, 折铬需求量 727.6 万 t。

(2)中情景方案。主要参考了日本的人均不锈钢产量中“S”形曲线, 利用了“S”形拟合函数, 预测出不锈钢产量。结果表明: 中国大约在 2030 年前后到达峰值点, 届时人均不锈钢产量 35 kg/人, 人均 GDP 1.43 万美元, 不锈钢产量 5005 万 t, 折铬需求量 850.85 万 t。2035 年人均不锈钢产量 30 kg/人, 人均 GDP 1.4267 万美元, 不锈钢产量 4280 万 t, 折铬需求量 727.6 万 t。

(3)低情景方案。主要参考了德国、法国、英国和美国的人均不锈钢产量低“S”形曲线预测出不锈

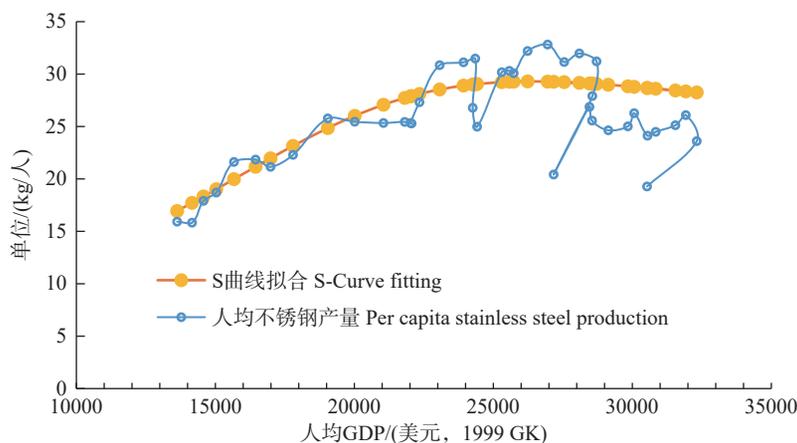


图 10 日本人均不锈钢产量和人均 GDP 的“S”形拟合图
Fig.10 S-curve simulation of per capita stainless steel production and GDP in Japan

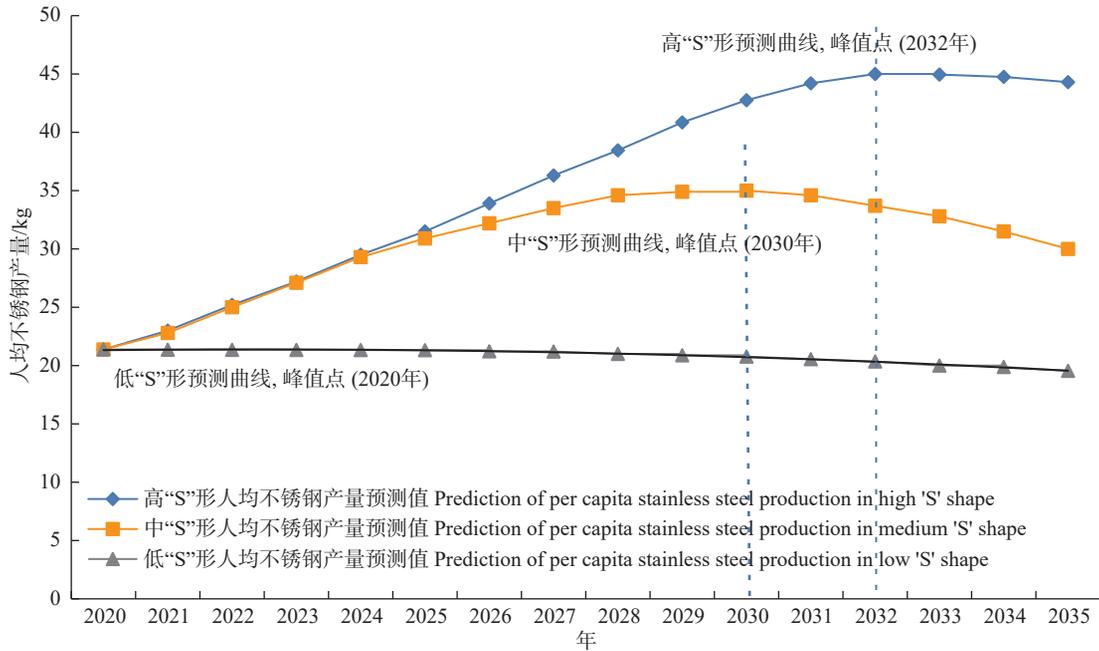


图 11 三种情景下 2021—2035 年中国人均不锈钢产量预测值
Fig.11 Prediction results of per capita stainless steel production in China from 2021 to 2035 under three scenarios

钢产量。结果表明: 中国大约在 2020 年已到达峰值点, 人均不锈钢产量 21.38 kg/人, 人均 GDP 1.405 万美元, 不锈钢产量 3004.79 万 t, 折铬需求量 510.81 万 t。低情景下, 中国人均不锈钢产量低“S”形曲线形态类似于美国的, 但中国人均不锈钢产量相比美国要高(图 8, 图 11)。

5.2.2 ARIMA 模型法 (不锈钢)

整合移动平均自回归模型 (Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA) 是一种应用时间序列的过去式, 当期值及之后扰动项的加权来“解释”时间序列变化规律的一种模型。通过平稳性检验、模型选取和参数估计, 选取了 ARIMA(2, 2, 1) 模型, 预测了 2021—2035 年我国不锈钢产量(表 3, 表 4)。从拟合结果看, 模型的拟合效果较好、优度较高、误差较小(图 11)。

5.3 我国 2021—2035 年铬需求综合分析及预测结果

综合中国人均不锈钢产量预测的两种方法、三

种情景, 得出 2021—2035 年我国不锈钢产量综合预测结果(表 5)。需要说明的是, ARIMA 模型法(不锈钢)预测出的不锈钢产量一直是增长的, 没有峰值点, 采用了其前半段(2021—2030)的预测结果, 与“S”形预测结果进行了平均(中情景方案)。其他两种情景均采用“S”形预测结果。后半段选用“S”形预测结果的主要原因是, 除比利时、芬兰少数国家外, 典型国家人均不锈钢产量在不同的经济发展阶段(人均 GDP)的轨迹呈现“S”形轨迹(规律)。高“S”情景下 2032 年为不锈钢产量的峰值点; 中“S”情景下, 2030 年为不锈钢产量的峰值点; 低“S”情景下, 2020 年为不锈钢产量的峰值点。

中情景方案预测结果为: 2021—2030 年人均不锈钢产量呈上升趋势, 2030 年到达峰值点, 届时人均不锈钢产量 35.00 kg, 不锈钢产量 5005 万 t, 折铬需求量 850.85 万 t; 之后逐渐下降, 到 2035 年人均不锈钢产量降至 30.00 kg, 不锈钢产量 4280 万 t, 折铬需求量 727.6 万 t。

表 3 中国不锈钢产量 ARIMA 模型法拟合统计量
Table 3 ARIMA model statistics of stainless steel production in China

模型	预测变量数	模型拟合统计量							
		平稳的 R^2	R^2	RMSE	MAPE	MAE	MaxAPE	MaxAE	正态化的 BIC
ssconsumption-模型_1	1	0.340	0.995	49.232	36.895	28.946	85.180	214.552	8.107

注: RMSE、MAPE、MAE 和 BIC 分别表示均方根误差、平均绝对百分比误差、平均绝对误差和贝叶斯信息准则。

表 4 2021—2035 年中国不锈钢产量预测结果 (不锈钢产量/万 t)

年份	拟合值 (不锈钢产量)	置信下限**	置信上限**
2021	3126.06	3027.87	3224.25
2022	3383.07	3231.93	3534.2
2023	3646.11	3453.44	3838.78
2024	3919.96	3692.11	4147.81
2025	4205.72	3946.68	4464.75
2026	4503.78	4216.31	4791.26
2027	4814.44	4500.54	5128.33
2028	5137.92	4799.17	5476.67
2029	5474.49	5112.14	5836.84
2030	5824.38	5439.47	6209.3
2031	6187.84	5781.23	6594.45
2032	6565.11	6137.56	6992.65
2033	6956.43	6508.6	7404.26
2034	7362.05	6894.52	7829.58
2035	7782.21	7295.49	8268.93

注: **95%的置信水平。

6 中国 2021—2035 年铬供需形势分析

利用 2021—2035 年我国铬供应量和铬需求量预测结果,对我国铬供需形势进行分析与综合研究(图 12,图 13,图 14,表 6)。

(1)2021—2035 年,我国矿山铬供应量很小,随着我国不锈钢产量的增加,铬总需求量大不断增长,2030 年需求量到达峰值点。不含二次铬产量,我国铬供需形势严峻,对外依存度 99% 以上;若含二次铬产量,对外依存度也在 69% 以上,铬供需形势依然严峻。

(2)2021—2035 年,我国矿山铬对铬总需求保障率 0.53%~0.76%,铬矿资源保障率极低。若含二次铬产量,则铬保障率升至 30.53%~30.76%。通过不锈钢回收,增加二次铬产量,是提高我国铬对需求保障率的有效途径。

(3)2021—2035 年,若不考虑二次铬产量,我国铬供需缺口在 602.69~939.52 万 t;若考虑二次铬产量,则供需缺口降至 402.51~655.9 万 t。铬供需缺口主要依靠进口解决。

7 讨论与建议

依据对铬矿床地质特征、资源现状和未来铬供需趋势分析,为了保障我国铬矿资源产业的稳定发展,得出如下需重点关注的研究结论,并提出相关对策建议:

(1)根据我国铬矿山生产的生命周期,若没有新增储量,到 2035 年末,我国铬矿保有资源储量将消耗殆尽。2021—2035 年,预计我国矿山铬对铬总需求的保障率仅为 0.53%~0.76%,不足 1%,国内铬矿产品供应不足已成定局,并将长期持续。建议在铬矿基础地质、地质调查和矿产勘查、新一轮找矿突破战略行动与深部找矿专项中,进一步加强铬矿基础地质工作,强化铬矿地质勘查工作,加大铬矿资源勘查特别是精查力度,探索勘查新铬矿床类型、对现有铬矿山探边摸底,充分发挥各类市场主体作用,努力实现铬矿找矿突破,增加铬矿查明资源储量,切实增强我国铬矿资源保障能力。

(2)重视二次铬的回收利用,建议国家给予二次铬回收产业的政策支撑。主要通过废不锈钢的回收来回收二次铬。预测 2021—2035 年,我国累计铬总供应量 3860 万 t,其中累计二次铬产量 3780 万 t,占比近 98%。预测我国二次铬产量呈现先升后降的趋势,大约维持在 180~285 万 t。若包括二次铬产量,预测 2025 年、2030 年和 2035 年我国铬对外依存度分别降至 69.31%、69.38% 和 69.47%。可见,二次铬产量在铬供应中占据非常重要的地位。建议加强铬矿产品全生命周期管理,构建科学合理铬物质流体系,通过强化废不锈钢的回收利用,增加二次铬产量,要参考借鉴美国等国家二次铬回收经验,从国家层面重视发展二次铬回收产业,建议从经济、行政、法律等方面制定促进二次铬良性回收的产业政策。

(3)加强铬矿产品储备,保障铬矿产品供应安全。我国铬供需形势严峻,2021—2035 年,若不含二次铬产量,预计我国铬对总需求的保障率为 0.53%~0.76%,不足 1%;若含二次铬产量,预计我国铬对总需求的保障率升至约 31%。2021—2035 年,国内铬矿资源难以满足生产建设需求,建议进一步加大铬矿产品的储备力度,按照铬矿石、铬铁、金属铬、不锈钢等不同产品、结构、规模有序开展储备,保障紧急状态下我国铬矿资源安全。

(4)进一步优化铬矿产品结构,提高铬矿产品附加值。铬铁是生产不锈钢的重要原材料,同时铬铁合金的生产是高耗能、高排放的产业。2020 年我国铬铁和不锈钢产量均分别占的世界的 42.77% 和

表 5 2021—2035 年中国不锈钢产量预测结果

Table 5 Prediction results of stainless steel production in China from 2021 to 2035

情景	年份	人均不锈钢产量“S”形法		ARIMA (2, 2, 1) 模型法 (不锈钢)		不锈钢综合预测结果	
		人均产量/ (kg/人)	产量/ 万t	人均产量/ (kg/人)	产量/万t (拟合值)	人均产量/ (kg/人)	产量/ 万t
高情景方案 (参考高“S”形预测)	2020	21.38	3004.79	21.38	3004.79	21.38	3004.79
	2021	23.00	3244	25.06	3534.2	22.58	3185
	2022	25.20	3564	27.14	3838.78	24.56	3474
	2023	27.20	3857	29.25	4147.81	26.46	3751
	2024	29.50	4192	31.42	4464.75	28.54	4056
	2025	31.50	4484	33.65	4791.26	30.52	4345
	2026	33.90	4833	35.97	5128.33	32.74	4669
	2027	36.30	5181	38.37	5476.67	35.01	4998
	2028	38.45	5493	40.85	5836.84	37.21	5316
	2029	40.85	5839	43.44	6209.3	39.57	5657
	2030	42.75	6113	46.12	6594.45	41.74	5969
	2031	44.20	6320	48.90	6992.65	43.74	6254
	2032 (1)	45.00	6434	51.79	7404.26	45.46	6499
	2033	44.95	6424	54.79	7829.58	44.95	6424
	2034	44.75	6391	57.90	8268.93	44.75	6391
2035	44.30	6320	24.77	3534.2	44.30	6320	
中情景方案 (参考中“S”形预测, 利用了日本 人均不锈钢预测函数)	2020	21.38	3004.79	21.38	3004.79	21.38	3004.79
	2021	22.80	3215	22.17	3126.06	22.80	3215
	2022	25.00	3536	23.92	3383.07	25.00	3536
	2023	27.10	3843	25.71	3646.11	27.10	3843
	2024	29.30	4164	27.59	3919.96	29.30	4164
	2025	30.90	4399	29.54	4205.72	30.90	4399
	2026	32.20	4591	31.59	4503.78	32.20	4591
	2027	33.50	4782	33.73	4814.44	33.50	4782
	2028	34.60	4943	35.96	5137.92	34.60	4943
	2029	34.90	4989	38.30	5474.49	34.90	4989
	2030 (2)	35.00	5005	40.73	5824.38	35.00	5005
	2031	34.60	4948	43.27	6187.84	34.60	4948
	2032	33.70	4818	45.92	6565.11	33.70	4818
	2033	32.80	4687	48.68	6956.43	32.80	4687
	2034	31.50	4498	51.55	7362.05	31.50	4498
2035	30.00	4280	54.55	7782.21	30.00	4280	
低情景方案 (参考低“S”形预测)	2020 (3)	21.38	3004.79	21.38	3004.79	21.38	3004.79
	2021	21.36	3012	22.92	3231.93	21.36	3012
	2022	21.35	3020	24.42	3453.44	21.35	3020
	2023	21.34	3026	26.03	3692.11	21.34	3026
	2024	21.33	3031	27.78	3946.68	21.33	3031
	2025	21.32	3035	29.61	4216.31	21.32	3035
	2026	21.22	3025	31.57	4500.54	21.22	3025
	2027	21.20	3026	33.62	4799.17	21.20	3026
	2028	21.00	3000	35.78	5112.14	21.00	3000
	2029	20.88	2985	38.05	5439.47	20.88	2985
	2030	20.77	2970	40.43	5781.23	20.77	2970
	2031	20.55	2939	42.92	6137.56	20.55	2939
	2032	20.35	2909	45.52	6508.6	20.35	2909
	2033	20.00	2858	48.25	6894.52	20.00	2858
	2034	19.88	2839	51.08	7295.49	19.88	2839
2035	19.55	2789	22.65	3231.93	19.55	2789	

注: (1) 高情景方案下的峰值点。(2) 中情景方案下的峰值点。(3) 低情景方案下的峰值点。2020年各指标为实际值。

59.01%, 位居世界第一。建议通过调整铬矿产品结构, 如减少高耗能、高排放的铬铁产量、降低质量一般的不锈钢产量, 延长铬矿资源产业链, 提高产品附加值。

(5) 充分利用境外铬矿资源产品。世界铬矿资

源丰富, 铬矿产品结构体系较完善, 充分利用国家“一带一路”倡议, 满足我国铬矿资源产业、特别是不锈钢产业良性发展。若不含二次铬产量, 2021—2035年预测我国铬供需累计缺口量 1.25 亿 t, 几乎要通过利用境外铬矿产品解决。一般情况下我国

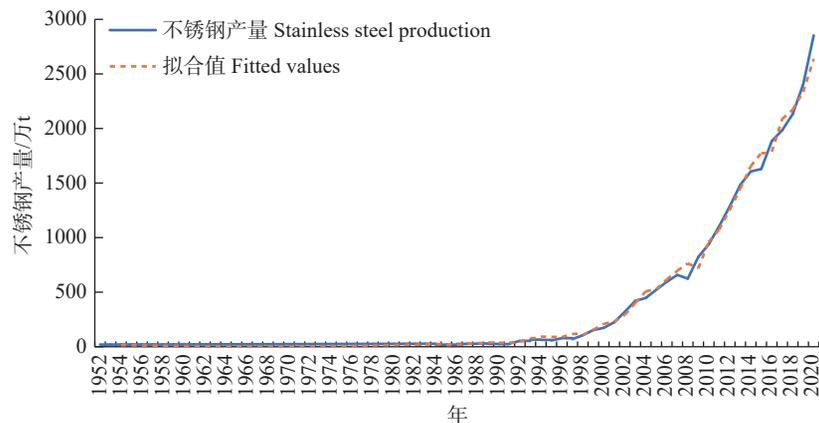


图 12 1952—2020 年中国不锈钢产量 ARIMA 模型法拟合结果
Fig.12 ARIMA simulation results of stainless steel production in China

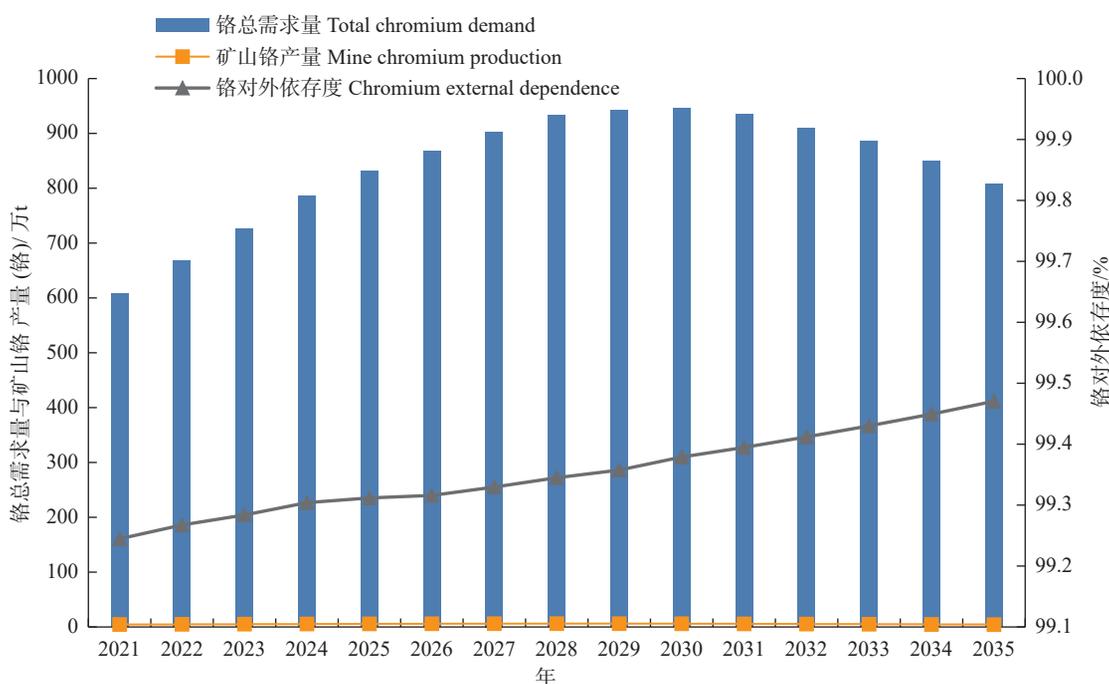


图 13 中国 2021—2035 年铬供需趋势(不含二次铬产量)
Fig.13 Supply and demand trend of chromium in China from 2021 to 2035 (excluding secondary chromium)

通过进口境外铬矿产品能够满足我国铬矿、不锈钢产业发展,但也要未雨绸缪,做好特殊条件下的铬矿产品保障。建议进一步利用南非、哈萨克斯坦、印度等铬矿资源丰富的国家铬矿产品,保障我国铬矿资源产业健康持续发展。

8 结 论

(1) 铬矿具有很强的成矿专属性。迄今,我国只发现蛇绿岩型豆荚状、基性—超基性岩型似层状两

种铬矿床类型。前者是我国主要铬矿床类型,分布在西藏、新疆等省区,88.28%的查明资源储量赋存于其中,铬矿石总体品质不佳,铬矿石平均品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 38.66%,冶金级铬矿石主要产出于此类矿床;后者铬矿岩体为超基性—基性岩,矿床规模均为小型,11.72%的查明资源储量赋存于其中,铬矿石为贫矿,平均品位 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 13.68%,可作为耐火材料使用。

(2) 我国矿山铬矿石产量很少,2020年我国铬

表 6 2021—2035 年中国铬矿供需形势综合分析表

Table 6 Comprehensive analysis of supply and demand situation of chromium ore in China from 2021 to 2035

项目 (中情景)	铬预测结果	2021年	2025年	2030年	2035年
铬需求侧	不锈钢需求量 (万t)	3215	4399	5005	4280
	折铬需求量 (万t) *	546.55	747.83	850.85	727.60
	铬总需求量 (万t) **	607.28	830.92	945.39	807.33
	累计铬需求量 (万t)	607.28	19157	43467	66698
			(2021—2025)	(2021—2030)	(2021—2035)
铬供给侧	矿山铬产量 (铬 万t)	4.59	5.72	5.87	4.28
	累计矿山铬产量 (铬 万t)	4.59	25.87	55.90	80.92
			(2021—2025)	(2021—2030)	(2021—2035)
	二次铬产量 (万t) ***	182.18	249.27	283.62	242.20
		1085.86	2463.13	3779.55	
		(2021—2025)	(2021—2030)	(2021—2035)	
综合	对外依存度 (%) (不含二次铬产量)	99.24	99.31	99.38	99.47
	对外依存度 (%) (含二次铬产量)	69.24	69.31	69.38	69.47
	供需缺口 (不含二次铬产量)	602.69	825.20	939.52	804.16
	供需缺口 (含二次产量)	420.51	575.93	655.90	561.63
	铬对需求的保障率 (%) (不含二次铬产量)	0.76	0.69	0.62	0.53
	铬对需求的保障率 (%) (含二次铬产量)	30.76	30.69	30.62	30.53

注: *不锈钢中的含铬量按17%测算; **按铬在不锈钢中消费量占比90%测算; ***按二次铬产量占铬表观消费量比例的30%测算。需求的保障率=(国内供应量/总需求量)×100%, 对外依存度=(1-国内供应量/总需求量)×100%。

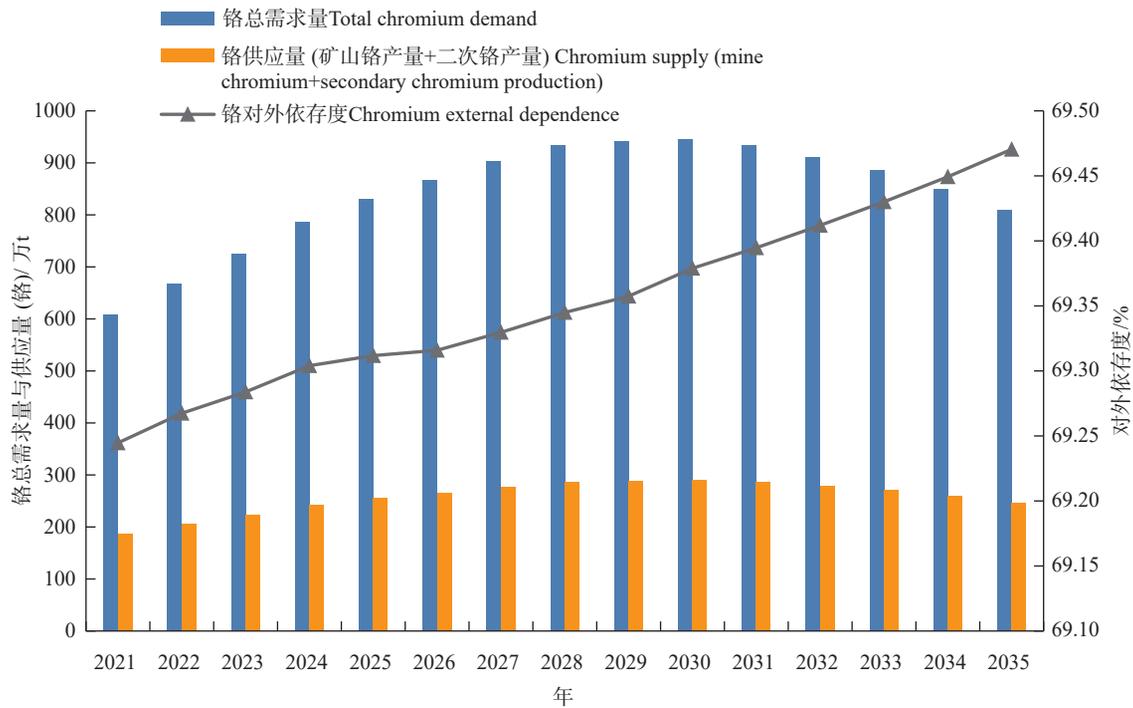


图 14 中国 2021—2035 年铬供需趋势(含二次铬产量)

Fig.14 Supply and demand trend of chromium in China from 2021 to 2035 (including secondary chromium)

矿石仅占世界的 0.36%。预计 2021—2035 年我国矿山铬矿石产量在 14~20 万 t, 且呈现先升后降的态势, 若无新增铬矿资源储量, 2035 年后将无铬矿资源可采。

(3) 本文利用铬部门消费法、人均不锈钢产量

“S”形法、ARIMA 模型法(不锈钢)等预测方法, 设定高中低三种情景, 考察 2021—2035 年我国铬矿产品需求情况, 研究表明: 在中情景下, 预测 2021—2030 年人均不锈钢产量呈上升趋势, 2030 年到达峰值点, 届时人均不锈钢产量 35.00 kg, 不锈

钢产量 5005 万 t, 折铬需求量 850.85 万 t; 之后逐渐下降, 到 2035 年人均不锈钢产量降至 30.00 kg, 不锈钢产量 4280 万 t, 折铬需求量 727.6 万 t。

(4) 铬矿作为我国战略新兴产业矿产, 2021—2035 年铬供需形势严峻, 国内矿山铬对外依存度超过 99%, 建议加强铬矿地质勘查与找矿工作力度, 力争实现铬矿找矿突破。2020 年在我国战略性新兴产业(主要是新材料产业)中, 铬消费量 170.79 万 t, 占比达 30%。2021—2035 年, 我国矿山铬供应量很小, 随着我国不锈钢产量的增加, 铬总需求量大且不断增长, 2030 年铬总需求量到达峰值点。若不含二次铬产量, 预测 2025 年、2030 年和 2035 年我国铬对外依存度(不含二次铬产量)分别为: 99.31%、99.38% 和 99.47%, 预测 2025 年、2030 年和 2035 年我国铬供需缺口(不含二次铬产量)分别: 825.20 万 t、939.52 万 t 和 804.16。预测 2025 年、2030 年和 2035 年我国铬对需求的保障率(不含二次铬产量)分别为: 0.69%、0.62% 和 0.53%。

References

- Bao Peisheng, Wang Xibin, Peng Genyong, Chen Fangyuan. 1999. Chromium Iron Deposits in China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Chen Qishen, Wang Gaoshang, Wang Anjian. 2010. An analysis of the three turning points in the “S-shape” rule of copper and aluminum demand[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(5): 659–665 (in Chinese with English abstract).
- Department of Mineral Resources Protection And Supervision, Ministry of Natural Resources, Mineral Resources Reserve Evaluation Center, Ministry of Natural Resources. 2021. Compilation of Technical Standards for Mineral Resources Reserves[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1232–1233 (in Chinese).
- Editorial Committee, Chronicles of Chromium Mines in China. 1996. Chronicles of Chromium Mines in China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese).
- Editorial Committee, Handbook of Industrial Requirements for Mineral Resources. 2010. Handbook of Industrial Requirements for Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Gao Xinrui, Wang Anjian. 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).
- Gao X R, Wang A J, Liu G W, Liu C H, Yan K. 2018. Expanded S-curve model of a relationship between crude steel consumption and economic development: Empiricism from case studies of developed economies[J]. Natural Resources Research, 28: 547–562.
- Ju Jianhua, Zhang Zhaozhi, Pan Zhaoshuai, Che Dong, Li Houmin. 2022. Determination of mineral resources in China’s strategic emerging industries and analysis of the demand of the “14th five-year plan” [J]. China Mining Magazine, 31(9): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Lu Ning. 2018. Prediction and analysis of stainless steel production in 2020 and 2025, China[J]. Metallurgical Economy and Management, (3): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- Höök M, Li J C, Oba N, Snowden S. 2011. Descriptive and predictive growth curves in energy system analysis[J]. Natural Resources Research, 20: 103–116.
- Huang Darong, Huang Lifan. 2009. Present situation and development tendency of grey system theory in fault forecast application[J]. Journal of Gun Launch & Control, (3): 88–92 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuan, Chen Qishen, Zhang Yanfei, Gao Tianming. 2015. Chinese chromium demand forecasting and resource supply security[J]. Resources Science, 37(5): 933–943 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources. 2021a. Statistical Table of National Mineral Resources Reserves [EB/OL]. [http://www.mnr.gov.cn/\(in Chinese\)](http://www.mnr.gov.cn/(in Chinese)).
- Ministry of Natural Resources. 2021b. China Mineral Resources (2020) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Michael A K. 2022. Product innovation, diffusion and endogenous growth[J]. Review of Economic Dynamics, 48: 178–201.
- Wang A J, Wang G S, Chen Q S, Yu W J, Yan K, Yang H B. 2015. S-curve model of relationship between energy consumption and economic development[J]. Natural Resources Research, 24(1): 53–64.
- Wang Anjian, Wang Gaoshang. 2002. Mineral Resources and National Economic Development [M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Anjian, Wang Gaoshang, Chen Qishen, Yu Wenjia, Yan Qiang, Han Shuqin, Zhang Zhaozhi, Niu Jianying, Zhou Fengying, Geng Nuo, Wang Lili, Liu Sha, Na Danni. 2008. Energy and National Economic Development [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhang Shaohua, Xiong Xianxiao. 2018. Geological Records of Mineral Resources in China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wei Weiqiang. 2006. The reason of Japan’s development and stagnate in economy and its inspiration to that of China[J]. Aroud Southeast Asia, (11): 69–74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei. 2016. Demand analysis and prediction of world chrome resource[J]. Resources & Industries, 18(4): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zenan, Zhang Zhaozhi, Pan Zhaoshuai, Wu Qing, Xu Hengyi. 2019. Analysis of China’ supply safety by global chromium ore resources countries[J]. Chinese Mining Magazine, 28(10): 69–76

- (in Chinese with English abstract).
- Zheng Minggui, Yuan Xuemei. 2018. Demand forecasting of China's chrome ore from 2020 to 2030 based on grey neural network[J]. Resources Development & Metal, 34(6): 747–752 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Mingyu, Wang Chenghui, Wang Denghong, Li Lixing, Zhang Jian, Wang Guorui, Zhou Xiang. 2013. The major Chromium concentration areas in China and a discussion on their resource potential[J]. Geology in China, 40(4): 995–1006 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xun. 1999. China Mining Situation (Volume 2 Metal Minerals) [M]. Beijing: Science Press, 1–665 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 陈方远. 1999. 中国铬铁矿床[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈其慎, 王高尚, 王安建. 2010. 铜、铝需求“S”形规律的三个转变点剖析[J]. 地球学报, 31(5): 659–665.
- 高芯蕊, 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.
- 国家统计局. 2018. 战略性新兴产业分类 (2018)[EB/OL]. [2021–11–05] http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201811/t20181126_1635848.html
- 《矿产资源工业要求手册》编委会. 2010. 矿产资源工业要求手册 [M]. 北京: 地质出版社.
- 鞠建华, 张照志, 潘昭帅, 车东, 李厚民. 2022. 我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析[J]. 中国矿业, 31(9): 1–11.
- 鹿宁. 2018. 2020 年和 2025 年我国不锈钢产量预测分析[J]. 冶金经济与管理, (3): 43–48.
- 黄大荣, 黄丽芬. 2009. 灰色系统理论在故障预测中的应用现状及其发展趋势[J]. 火炮发射与控制学报, (3): 88–92.
- 刘璇, 陈其慎, 张艳飞, 高天明. 2015. 中国铬需求预测及资源供应安全态势分析[J]. 资源科学, 37(5): 0933–0943.
- 王安建, 王高尚. 2002. 矿产资源与国家经济发展[M]. 北京: 地震出版社.
- 王安建, 王高尚, 陈其慎, 于汶加, 闫强, 韩淑琴, 张照志, 牛建英, 周凤英, 耿诺, 汪莉丽, 刘莎, 那丹妮. 2008. 能源与国家经济发展 [M]. 北京: 地质出版社.
- 王登红, 章少华, 熊先孝. 2018. 中国矿产地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 韦伟强. 2006. 日本经济发展、停滞原因及对中国经济的启示[J]. 东南亚纵横, (11): 69–74.
- 张炜. 2016. 世界铬矿资源需求分析及预测[J]. 资源与产业, 18(4): 87–91.
- 张泽南, 张照志, 潘昭帅, 吴晴, 徐恒逸. 2019. 全球铬矿石资源国对中国供应安全度分析[J]. 中国矿业, 28(10): 69–76.
- 郑明贵, 袁雪梅. 2018. 基于灰色神经网络的中国 2020–2030 年铬矿需求预测[J]. 资源开发与市场, 34(6): 747–752
- 朱明玉, 王成辉, 王登红, 李立兴, 张建, 王国瑞, 周详. 2013. 中国铬矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 40(4): 995–1006.
- 朱训. 1999. 中国矿情 (第二卷 金属矿产)[M]. 北京: 科学出版社, 1–665.
- 《中国铬矿志》编辑委员会. 1996. 中国铬矿志[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 自然资源部. 2021a. 全国矿产资源储量统计表 [EB/OL]. [2021–12–01] <http://www.mnr.gov.cn/>.
- 自然资源部. 2021b. 中国矿产资源报告 (2020)[M]. 北京: 地质出版社.
- 自然资源部矿产资源保护监督司, 自然资源部矿产资源储量评审中心. 2021. 矿产资源储量技术标准汇编 [M]. 北京: 地质出版社, 1232–1233.