

doi: 10.12029/gc20221113002

潘昭帅, 张照志, 车东, 张涛, 张兰英, 杨巍. 2024. 中国银矿资源特征及新能源背景下需求分析[J]. 中国地质, 51(5): 1554–1569.

Pan Zhaoshuai, Zhang Zhaozhi, Che Dong, Zhang Tao, Zhang Lanying, Yang Wei. 2024. Characteristics and demand analysis of silver resources in China under the background of new energy[J]. Geology in China, 51(5): 1554–1569(in Chinese with English abstract).

中国银矿资源特征及新能源背景下需求分析

潘昭帅¹, 张照志¹, 车东¹, 张涛², 张兰英³, 杨巍⁴

(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. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 中国价格协会冶金价格分会, 北京 100730; 4. 冶金工业信息中心, 北京 100010)

摘要:【研究目的】银作为重要的贵金属,兼具工业属性和金融属性,对促进国家经济和社会发展至关重要。系统性地分析中国银矿资源特征,研究未来需求趋势,对中国银产业减排布局、资源安全具有重要意义。【研究方法】本文从银产业发展的角度入手,通过分析中国银的应用、地质、供需和市场等特征,总结了银矿的资源现状。根据工业银和非工业银的需求驱动差异,运用 S-curve 和 ARIMA 模型预测了 2022—2035 年中国银的需求。【研究结果】根据银矿的资源现状和需求预测结果,得出如下认识:(1)中国银矿具有“四多四少”的地质特征,即总量多、可利用资源少;小矿多、大矿少;贫矿多、富矿少;共生矿床多,独立矿床少;(2)随着银应用领域的不断增长,国内的矿山资源和再生资源已经不能满足需求,需进口银矿产品和其他精矿(用于生产副产银,如铅精矿、锌精矿等)来补充缺口;(3)2022—2035 年,中国银的需求将持续增长,从 5800 t 增长到 9500 t,年均增长率约为 3.7%;(4)2022—2035 年,中国工业银需求将迎来较快增长,从 3800 t 增长到 7000 t,年均增长率为 4.4%,光伏是拉动工业银需求增长的主要领域;(5)2022—2035 年,中国非工业银的需求将缓慢增长,从 2000 t 增长到 2500 t,年均增长率为 1.7%。【结论】基于以上研究,为了更好地促进银产业发展,提出如下建议:(1)高度重视并提升银在未来国民经济中的地位和作用;(2)多手段保障银矿资源供应能力;(3)加大技术创新,开展深加工,提高工业银的产品附加值,为能源转型和高端制造提供保障;(4)建立国家与民间双重银储备与保障体系,避免银价大起大落。

关键词: 银;资源特征;需求预测;新能源背景;矿产勘查工程;中国

创新点: (1)根据中国银的消费特点,运用 S-curve 和 ARIMA 模型预测了中国银的需求;(2)总结提出了发达国家工业银消费的两期“S”形波次递进规律,并将该规律应用于中国工业银的需求预测。

中图分类号: P618.52; F426.1; F832.54 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1554-16

Characteristics and demand analysis of silver resources in China under the background of new energy

PAN Zhaoshuai¹, ZHANG Zhaozhi¹, CHE Dong¹, ZHANG Tao², ZHANG Lanying³, YANG Wei⁴

(1. Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Metallurgical Price Branch of China Price Association, Beijing 100730, China; 4. Metallurgical Industry Information Center, Beijing 100010, China)

收稿日期: 2022-11-13; 改回日期: 2023-01-04

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221694)资助。

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

通讯作者: 张照志,男,1967年生,研究员,主要从事矿产资源经济研究;E-mail: 1264124110@qq.com。

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

[Objective] Silver, as an important precious metal, has both industrial and financial properties and is crucial to promote national economic and social development. It is important to systematically analyze the characteristics of silver resources and demand trends for emission reduction and resource security in China. **[Methods]** From the perspective of the development of the silver industry, the characteristics of the application, geology, supply and demand and market of silver are summarized in China. According to the demand driven difference between industrial silver and non-industrial silver, the demand of silver is predicted using S-curve and ARIMA models in China from 2022 to 2035. **[Results]** Based on the resource status and demand forecast results of silver mines, the following results are obtained: (1) Silver mines have the geological characteristics of "four more and four less". It means that the total amount of resources is large and the available resources are few; more small deposits, less large deposits; more lean ore, less rich ore; more concomitant deposits, fewer independent deposits; (2) With the continuous growth of silver application field, domestic mine resources and renewable resources cannot meet the demand, so it is necessary to import silver ore and other concentrates (used to produce silver by-products, such as lead concentrates, zinc concentrates, etc.) to supplement the gap; (3) From 2022 to 2035, the demand for silver in China will continue to grow, from 5800 t to 9500 t, with an average annual growth rate of about 3.7%; (4) From 2022 to 2035, the demand for industrial silver in China will grow rapidly, from 3800 t to 7000 t, with an average annual growth rate of 4.4%. Photovoltaic systems are the main field driving the growth of industrial silver demand; (5) From 2022 to 2035, the demand for non-industrial silver in China will grow slowly, from 2000 t to 2500 t, with an average annual growth rate of 1.7%. **[Conclusions]** Based on the above research results, in order to promote the development of the silver industry chain, the following suggestions are put forward: (1) The position and role of silver in the future national economy should be paid more attention; (2) A variety of ways should be adopted to ensure the supply capacity of silver resources; (3) The added value of industrial silver products should be improved to provide guarantee for energy transformation and high-end manufacturing by increasing technological innovation and carrying out deep processing; (4) The national and private silver reserve and security system should be established to avoid large fluctuations in silver prices.

Key words: silver; resource characteristics; demand forecast; new energy background; mineral exploration engineering; China

Highlights: (1) According to the resource characteristics and consumption status of silver in China, the demand is predicted using the S-curve and ARIMA models; (2) The two-phase S-curve wave of industrial silver consumption in developed countries was summarized and proposed, and the law is applied to the demand forecast of industrial silver in China.

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

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

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20221694).

1 引言

中国在 2020 年召开的第 75 届联合国大会上提出, 中国的二氧化碳(CO₂)排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。目前, 全球已进入能源革命时代, 石化能源增速放缓, 光伏、风电等新能源增速提高, 终端能源消费中电气化水平的提升早已成为此次革命的重要内容(马冰等, 2021; 王欢等, 2021)。作为导电性能最优异的金属——银, 无疑将成为这次变革的重要参与者(李琦, 2021)。

银, 化学性质稳定, 具有极好的导热、导电性, 质软, 富延展性, 反光性能好, 广泛应用于电子电器、珠宝及装饰品、货币、感光材料、医药抗菌以及新技术等领域, 且由于银的属性特殊, 在工业领域的应用较难被替代(毛佳等, 2017)。银还是实现新能源转型不可或缺的金属, 特别是在光伏太阳能领域, 银浆作为晶硅太阳能电池的金属电极, 发挥着汇集和导出光生载流子、粘连等作用, 其产品性能直接关乎电池片的光电转化效率。仅在“十四五”期间, 中国光伏太阳能装机量就预计增长一倍, 达到 600 GW 左右, 未来光伏太阳能产业的高景气增

长必将带动光伏用银的需求(鞠建华等, 2022)。此外, 银作为一种投资贵金属, 还具有保值及抵制通胀功能。因而, 银对于促进国家科技、经济和社会发展, 推动能源转型, 维护国家安全稳定具有重要作用。

由于银在市场交易地位弱于金和铂, 而地质上又多为共伴生矿物, 导致专门针对银矿种的研究成果较少, 只是在一些综合性专著和部分论文里被提及。虽然近年来对银的研究热度有所上升, 但仍缺乏系统性、规模性研究。目前, 国内外对于银的研究主要集中在地质特征与新材料制造(Godbole et al., 2005; 陈毓川等, 2010; 江彪等, 2015, 2020; Hammed and Mola, 2020), 其次为资源利用、供需分析、价格投机等方面(毛佳等, 2017; 王莹, 2018; 王家鹏等, 2021), 而从产业发展和实现能源转型的角度对银产业进行分析的文献几乎处于空白。

在此背景下, 本文系统总结了银的地质特征和供需现状, 定量预测了未来中国对银的需求, 旨在为中国新能源发展、高端电气制造, 乃至科学规划银产业发展路径提供参考。

2 中国银矿的地质特征

2.1 资源简况

自然界中所发现的银矿物大约有 200 种, 自然界中有单质银存在, 但绝大部分是以化合态形式存在于银矿石中。银最常见于方铅矿、黄铜矿、闪锌矿等矿物中(张亮等, 2016)。2021 年, 世界银矿的

储量为 53 万 t, 集中分布于秘鲁(22.6%)、澳大利亚(17.0%)、波兰(12.6%)、俄罗斯(8.5%)、中国(7.7%)等国家(USGS, 2022)。中国银矿资源比较丰富, 分布广泛。根据《中国矿产资源报告 2021》, 截至 2020 年末, 中国银矿储量 50672.26 t, 居世界第 5 位, 主要分布在内蒙古、江西、安徽、湖北、广东、湖南、云南 7 个省(自治区), 占全国总储量的 75% 以上(江彪等, 2020; 自然资源部, 2021)。

中国银矿床成矿作用复杂, 类型众多, 包括独立、共生及伴生银矿床, 主要具有以下特点: ①资源分布广泛, 但相对集中; ②大中型矿床数量少, 但资源储量占比大; ③共伴生银资源丰富, 产地多, 但贫矿多, 富矿少; ④矿床类型多样, 资源潜力大(Jiang et al., 2015)。

2.2 矿床类型

中国银矿的工业类型共分为 6 类: ①碳酸盐岩型银(铅锌)矿床; ②泥岩-碎屑岩型银矿床; ③海相火山岩和火山-沉积岩型银矿床; ④千枚岩和片岩型银矿床; ⑤陆相火山和次火山岩型银矿床; ⑥脉状银矿床(与铅锌矿工业类型相同)。各类矿床特征如表 1 所示。

2.3 时空分布

根据中国地质历史演化阶段和区域成矿作用的特点, 可将银矿床的成矿时代划分为太古宙、元古宙、早古生代、晚古生代、中生代、新生代 6 个银矿成矿时代(王静纯等, 1994)。中国银矿床的主要成矿期是中生代, 其查明储量占全国银矿总储量的

表 1 中国银矿床主要工业类型

Table 1 Major industrial types of silver deposits in China

工业类型	成矿地质特征	矿体形状	规模及品位	常见金属矿物	矿床实例
碳酸盐岩型(铅锌)	产于大理岩、白云岩、灰岩、纯灰岩中, 大致沿层产出	层状、似层状、透镜状等	大、中、小型均有, 品位贫富兼有	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿等	广东凡口铅锌(银)矿
泥岩-碎屑岩型	产于含碳质黑色页岩、泥岩夹薄层泥灰岩中, 大致沿层产出	层状、似层状、脉状等	大、中、小型均有, 品位贫到中等	黄铁矿、辉银矿、硒银矿、硫银锗矿等	湖北白果园银矿
海相火山岩、火山-沉积岩型	产于凝灰岩、熔岩及与碎屑岩互层带中, 基本上沿层产出	层状、似层状、透镜状等	大、中、小型均有, 品位较富	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等	甘肃白银厂小铁矿银矿
千枚岩、片岩型	产于碳质绢云石英片岩、含碳绢云千枚岩、绢云石英片岩中, 沿层或层间破碎带产出	层状、似层状、透镜状、扁豆状	大、中型为主, 品位较富	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿等	河南破山银矿
陆相火山和次火山岩型	产于火山岩或次火山岩中的断裂、裂隙带或斑岩体接触带外侧围岩中	脉状、不规则似层状、透镜状等	大、中、小型均有, 品位贫到富均有	黄铁矿、辉银矿、螺硫银矿、深红银矿等	内蒙古额仁陶勒盖银矿
脉状型(与铅锌矿工业类型相同)	产于各种围岩构造破碎带中的脉状银(铅锌)矿	脉状、复脉状、不规则似层状、透镜状	大、中、小型均有, 品位较富	黄铁矿、辉银矿、自然银、硫铜银矿等	内蒙古赤峰官地银矿

68%。银元素的富集强度和成矿作用有从太古宙→元古宙→早古生代→晚古生代→中生代逐步加强的趋势,到新生代有所减弱(表 2)。

中国银矿床的空间分布主要受地质构造格局及其发展演化特定阶段的制约。从行政区划来看,大型银矿床主要集中在内蒙古、江西、新疆等 16 个省(自治区),其中,江西省有 7 个大型矿床,中、小型银矿床在各省均有分布(江彪等, 2015)。

中国银矿床具有明显的时空分布规律,在全国范围内可以划分出 32 个以银矿床为主或较为重要的Ⅲ级成矿带(简称成银带),如内蒙古双尖子山超大型银矿床、拜仁达坝和仁陶勒盖大型银矿床赋存于大兴安岭南段成银带;江西冷水坑超大型银矿床赋存于湘赣桂成银带;广东富湾超大型银矿床位于东南沿海成银带;云南白牛厂和白秧坪超大型银矿位于三江南段成银带(王登红等, 2007; 张大权等, 2015)。

综上所述,中国银矿的地质特征可以概括为“四多四少”,即“资源总量多、可利用资源少;小矿多、

大矿少;贫矿多、富矿少;共伴生矿床多,独立矿床少”。

3 中国银矿的供需现状

3.1 产业与应用

银的产业链包括勘查、开发、冶炼、应用和回收等一系列流程,其中下游的消费是产业链的核心(图 1)。从消费用途来看,银消费领域可分为两类:工业用途(光伏、电子电器、钎焊合金及焊料、感光材料等)和非工业用途(饰品珠宝、银币、银器和投资等)。2020 年,中国银的消费量为 4584 t,消费结构为:光伏与电子电器占比 55%,钎焊合金与焊料占比 15%,珠宝与银器占比 15%,货币与金属占比 5%,投资与对冲占比 5%,其他占比 5%。此外,银矿还是支撑新兴产业发展的重要矿产,被广泛应用于先进有色金属材料和太阳能产业,终端产品包括银粉、银浆、银合金、银焊条产品等(国家统计局, 2018)。

3.2 供应现状

中国银的供应主要由 5 部分构成:矿山银(包括

表 2 中国银矿查明资源储量分布

Table 2 Measured reserves distribution of silver in China

区域划分		矿区规模划分		成矿时代划分		矿床类型划分	
区域	资源量分布	矿区规模	资源量分布	成矿时代	资源量分布	矿床类型	资源量分布
华北	28%	大型	33%	中生代	68%	伴生型	42.2%
华东	21%	中型	28%	晚古生代	16%	热液型	28.5%
西南	18%	小型	39%	新生代	6%	矽卡岩型	8.6%
中南	18%			元古宙	5%	变质岩型	7.4%
西北	10%			早古生代	4%	陆相火山-次火山岩型	5.4%
东北	4%			其他	1%	沉积岩型	4.2%
						海相火山岩型	3.4%
						风化淋积型	0.3%

注: 数据来源于张大权等, 2015; 江彪等, 2015。

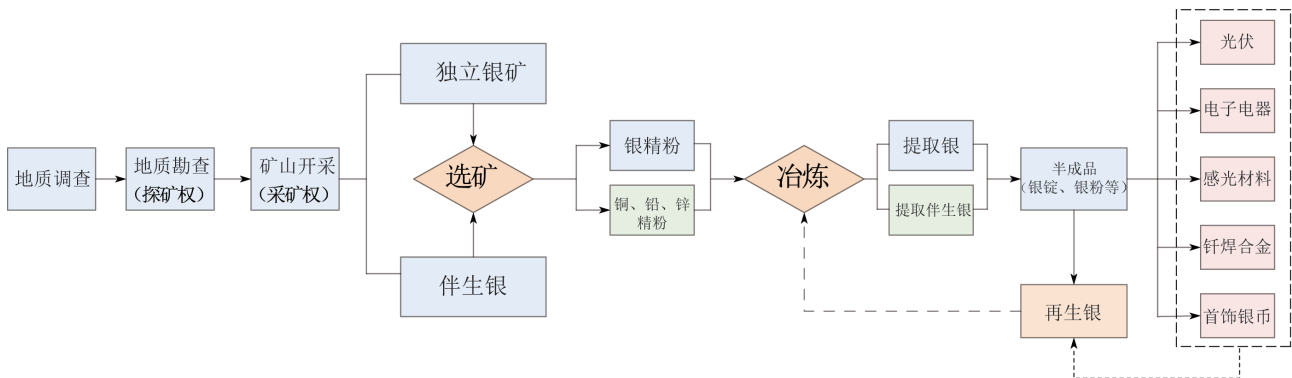


图 1 银产业链流程

Fig.1 Chain process of silver industry

独立矿山银和铅锌铜金矿副产银)、再生银、进口其他精矿副产银、官方售银和套期保值。官方售银和套期保值占比小且不稳定,此处不做讨论。

3.2.1 矿山银

新中国成立后,中国对白银的管理经历了漫长探索。2000年废除“统购统销”政策后,银的生产和销售环节被放开,银产量大幅上升,并成为世界最主要的白银生产国之一。

2020年,中国矿山银的产量为3377 t,世界占比13.8%,仅次于墨西哥和秘鲁,位居全球第三,矿山银产量的60%~80%源自铜铅锌金矿山的副产品。中国矿山银生产经历了3个发展阶段:(1)缓慢增长期。1964—1989年,中国矿山银产量从25 t缓慢增至124 t,世界占比仅由0.33%增至0.75%;(2)快速增长期。1990—2009年,中国矿山银的产量实现跨越式抬升,从700 t快速增长至2900 t,世界占比也从4%升至13%;(3)平台振荡期。2010—2020年,中国矿山银产量没有较大突破,维持在3000~4000 t。累计产量方面,1964—2020年,中国矿山银累计产量7.36万 t,而在2011—2020年的十年间,矿山银累计产量高达3.54万 t,占累计总量的48.15%(图2a)。

3.2.2 再生银

再生银是中国银供应的另一大领域,且占比正逐渐增大。再生银主要来源于感光材料、电子产品、催化剂和银饰品回收等。2020年,中国再生银回收量为740 t,世界占比13%。中国再生银回收也经历了3个发展阶段:(1)缓慢增长期。1990—2004年,中国再生银的回收量从79 t缓慢增长至

241 t,世界占比仅从2%上涨至4%。(2)快速增长期。2005—2011年,得益于银价的快速走高,中国再生银的回收量高速增长,从544 t增长至787 t,世界占比也从9%攀升至15%。(3)平台波动期。2012—2020年,随着银价疲软,中国再生银的回收量在700~900 t震荡(图2b)。

3.2.3 进口其他精矿副产银

中国银产量中有相当一部分是由进口的铅锌精矿、铜精矿以及银精矿等共生伴生矿物中提炼出来的。以2020年为例,中国进口铅精矿133.45万 t、锌精矿382.22万 t、铜精矿2176.52万 t,其中所含银数量巨大,数据难以统计。根据中国有色金属协会的相关数据估算,近十年来这部分供应量占全部供应的50%~70%。

目前,中国银产量的统计数据存在一定争议,主要争议点在于进口精矿副产银。以2020年为例,仅计算中国矿山银、再生银、官方售银和生产商对冲产量,中国银产量约4200 t,如果加上进口精矿冶炼银,则估算中国银产量超过2万 t。由于进口精矿冶炼银统计困难且受价格、政策等因素影响波动较大,仅分析时参考。

3.3 消费现状

新中国成立以来,白银消费随着国民经济发展和政策放开逐渐增长。1990—2010年,中国白银消费量从不足1000 t增长至超过5000 t,2010年之后,维持在4000~6000 t,占世界比例在10%~20%(图3)。

从银的消费结构看,工业银始终为第一消费领域。2010—2020年,中国工业用银占比从58%增

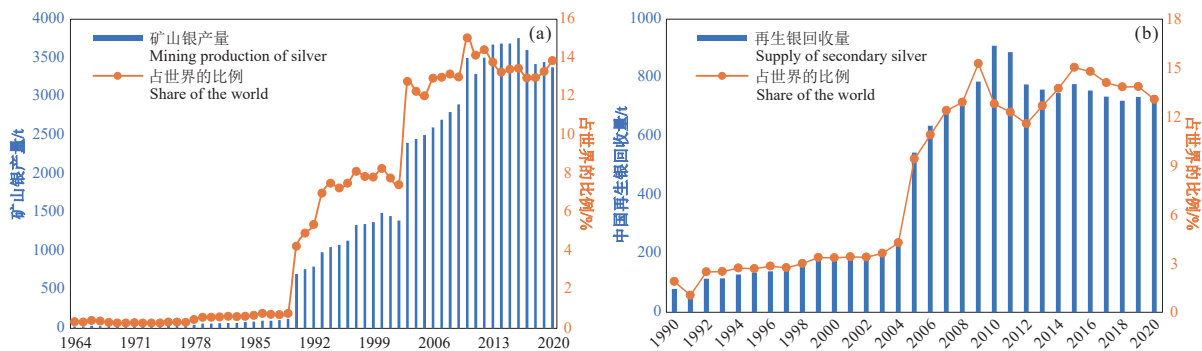


图2 1964—2020年中国矿山银产量(a)和再生银回收量(b)(数据来源:USGS、世界白银协会)

Fig.2 Mining production of silver (a) and supply of secondary silver (b) in China from 1964 to 2020 (Data source: USGS and The Silver Institute)

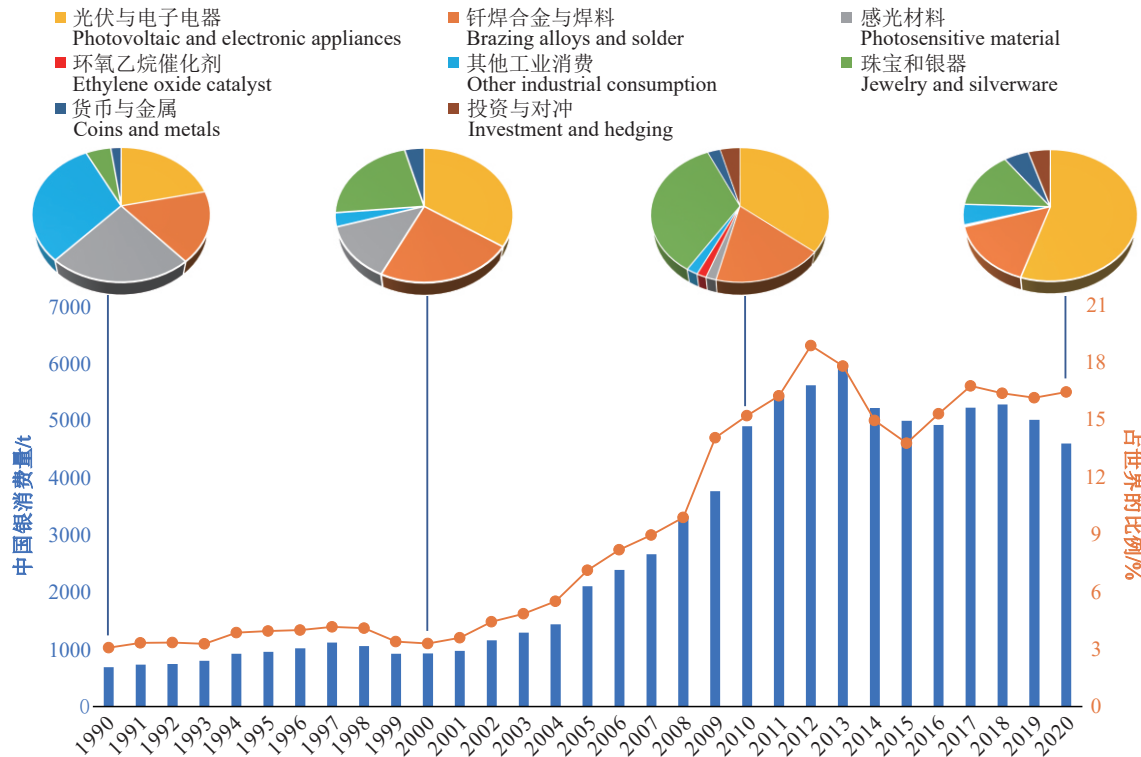


图 3 1990—2020 年中国银消费量及消费结构(数据来源: 世界白银协会)

Fig.3 Silver consumption and consumption structure in China from 1990 to 2020 (Data source: The Silver Institute)

长至 75%，其中光伏与电子电器成为第一大消费领域，占比超过 50%，且仍不断上涨。钎焊合金与焊料的消费占比相对稳定，维持在 15%~20%。传统消费领域——感光材料，受数码相机等产品替代，消费不断萎缩，目前占比不足 3%。催化剂和其他领域的消费虽有所发展，但规模仍然较小。非工业领域用银受价格影响明显，包括珠宝、银器、货币和投资等，目前占比为 25% 左右。

3.4 市场贸易

目前，银矿贸易产品主要有：银矿砂及其精矿，未锻造银、半制成品及粉末，银制首饰、器皿及其零件，硝酸银，其他银化合物。2020 年，中国主要进口银矿砂及其精矿，占比 98.7%，其他产品不足 2%，主要进口来源国是印度、泰国、智利、赞比亚等国。

2000—2020 年，中国白银进出口量呈先增后降的态势，除个别年份外，都是银矿的净进口国。出口方面，受中国白银市场开放初期严重供过于求和国际银价攀升的双重影响，2000—2006 年中国白银出口增加势头强劲，2006 年达到最高点 4712 t。2007 年开始，中国白银出口转入下行通道，2012 年更是下降到不足顶峰时的 20%。虽然近几年白银

出口有所回暖，但仍然处于历史低位。进口方面，随着中国光伏产业、电子电气工业、银基合金及钎焊料业迅速发展，白银进口量由 2005 年的 1389 t 猛增至 2008 年的 6203 t。2008 年之后，在外需持续不稳的情况下，白银进口在 3000~6000 t 震荡(图 4)。

综上所述，近年来中国的银矿资源呈现出供不应求的局面。银矿的地质特征决定了银矿易受其他主矿物生产的影响，因此中国银矿总产量的波动较大。而随着银在下游产业消费需求的不断增长，特别是在光伏产业的应用发展，国内的矿山银和再生银已经不能满足需求，需进口银矿产品和其他精矿(用于生产副产银，如铅精矿、锌精矿等)来补充缺口。

4 中国银需求预测

需求是决定银产业发展的关键，准确把握需求规律对于开展需求预测，科学制定行业规划意义重大。目前，对于中国银需求预测，仅有少量机构和学者进行研究。银需求预测所采用的方法主要有两类，一类是计量经济学分析，如回归类分析(包括

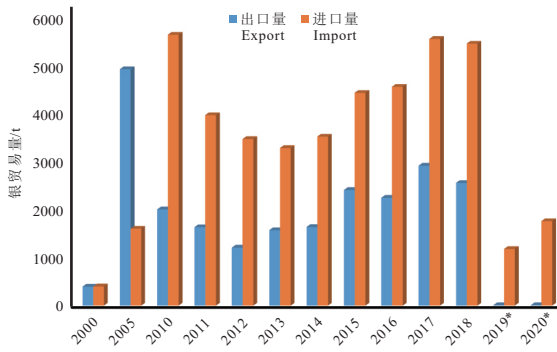


图 4 2000—2020 年中国银及其制品贸易量(数据来源: 联合国贸易署)

此处为折算金属量; *表示部分产品进出口的数据均未获取
Fig.4 Trade volume of silver and silver products in China
(Data source: UN Comtrade)

Normalize the amount of silver metal in the data; * Data on the import and export of some products has not been obtained

线性回归、ARIMA 模型、VAR 模型等)(中国地质科学院矿产资源研究所, 2016^①)、经济结构模型(包括部门消费、弹性系数)等, 另一类是非线性或非标准算法类, 如灰色模型等(陈兴荣, 2014)。

虽然现有的单一方法能够预测并得到结果, 但在某些方面仍存在局限性, 因此兼具线性和非线性

建模能力的方法模型可以很好地解决这一问题。基于工业银和非工业银的需求驱动存在差异, 本文利用 S-curve 和 ARIMA 模型分别对工业银和非工业银进行需求预测, 最后得出中国银的需求总量。

4.1 技术流程和模型简介

本文的技术流程如图 5 所示。

4.1.1 S-curve 模型

S-curve 模型是少有的以函数形式定量分析需求与经济变量函数关系的模型, 代表了资源能源消费的周期规律, 且在能源、铁、铜、铝等大宗商品的需求预测方面都取得较大成功(陈其慎等, 2010; 高芯蕊和王安建, 2010; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2016)。研究表明, 从农业社会—工业社会—后工业化社会, 人均资源消费与人均 GDP(1990 年 GK 美元, 即以 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, 下同)呈现全周期“S”形变化关系, 资源消费的起飞点(矿产资源需求开始进入高增长期)、转折点(矿产资源需求增速减缓)和零增长点(矿产资源需求到达顶点)是“S”形轨迹的 3 个重要转变点, 对应于经济结构的

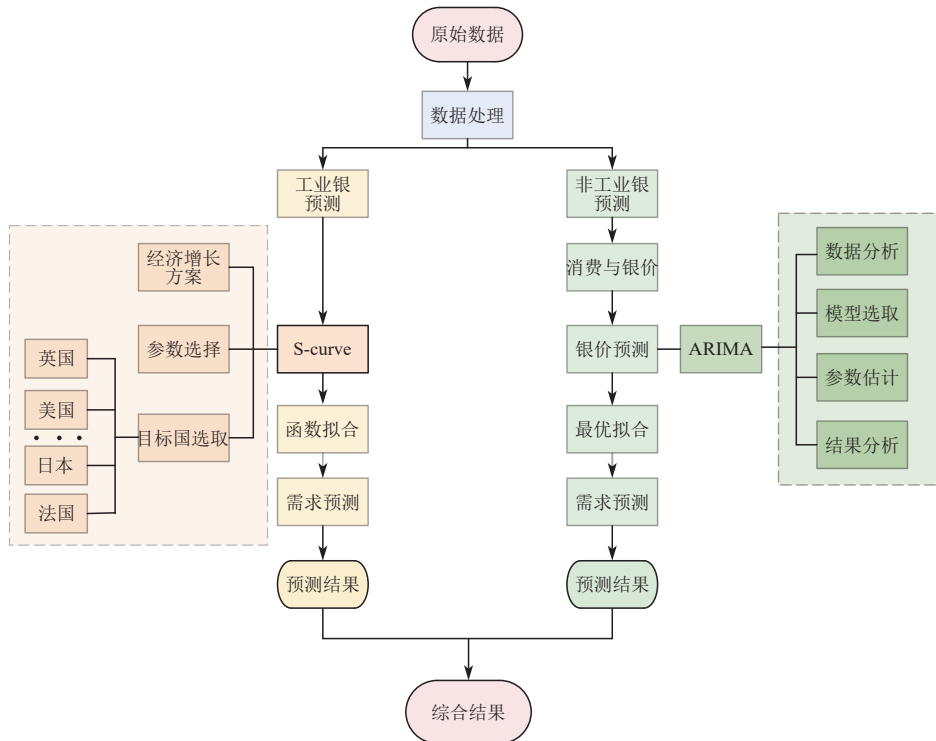


图 5 技术流程示意图
Fig.5 Technical flow diagram

重大转型期的开始(图 6)。

S-curve 可以进一步以函数表示为:

$$Ag - Ag_i = A \frac{\exp[\alpha_1(G - G_i)] - \exp[-\alpha_3(G - G_i)]}{2\cosh[\alpha_2(G - G_i)]} \quad (1)$$

其中 α_1 、 α_2 、 α_3 为指数常数, G 为人均 GDP, Ag 为人均工业银消费量, G_i 和 Ag_i 为转折点的人均 GDP 和人均工业银消费量, A 是方程的振幅。方程 1 为双曲正切函数。

S-curve 模型的建模过程一般分为如下步骤:

(1) 经济增长方式的假设。矿产资源的消费需求与经济增长过程密切相关。中国经济发展具有很多不确定因素, 且通常会采取一定的外部宏观调控措施。鉴于此, 一般设定不同的经济增长情景。

(2) 相关参数的选取。以“S”形规律为基础, 矿产需求的影响参数一般包括: 经济社会指标、消费指标、城市化率、经济结构、基础设施建设及社会财富积累等。其中, 经济社会指标和消费指标是直接用于资源需求预测的变量参数, 属于核心指标。经济社会指标包括国内生产总值 GDP 和人口两项, 以人均 GDP 作为具体指标, 它是决定矿产资源需求最根本的因素; 矿产资源指标则包括资源消费量及其增幅两项, 一般标定为人均资源消费量和人均消费增幅, 它们是衡量资源需求最重要的参数。城市化率、经济结构与矿产资源需求密切相关, 但无明确因果关系, 属约束指标。基础设施建设和社会财富积累一般是矿产资源累积消费的结果, 可以预测结果加以修正, 是参考指标。

(3) 类比国的选取。不同样本国的发展轨迹不同, 需综合考虑确定目标国家, 进行 S-curve 的拟合

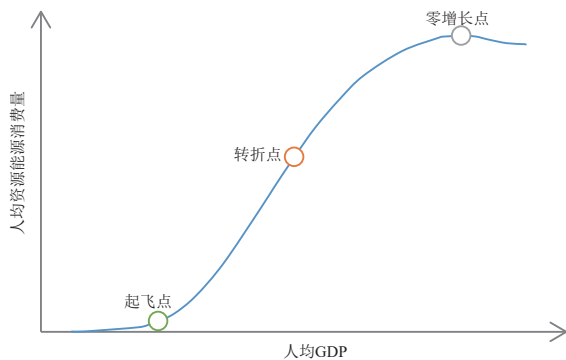


图 6 人均资源消费与人均 GDP 的“S”形曲线图
Fig.6 S-curve rules of per capita mineral resources consumption and per capita GDP

比较。类比国的选取是 S-curve 模型的关键步骤之一, 一般从经济发展规模、人口数量、资源政策等方面进行对比分析。

(4) 模型预测。根据 S-curve 拟合函数进行预测, 并利用相关参数进行修正。

4.1.2 ARIMA 模型

整合移动平均自回归模型 (Autoregressive Integrated Moving Average model, ARIMA) 是运用时间序列的过去值、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。该模型克服了传统时间序列模型只能描述平稳时间序列的缺陷, 适用于应用于大多非平稳的时间序列, 广泛应用于经济分析、需求预测等 (Lasheras et al., 2015; 吴晴等, 2021)。

ARIMA 模型的建模过程一般分为如下步骤 (韩超等, 2004):

(1) 数据的预处理: 包括零均值化处理和差分平稳化处理, 这一步骤主要是使该序列满足时间序列建模的前提条件, 此外也有利于提高预测的精度。

(2) 模型结构辨识: 根据自相关和偏自相关分析, 从 AR(p) 模型、MA(q) 模型、ARMA(p, q) 模型和 ARIMA(p, d, q) 模型中选取合适的模型。

(3) 模型参数估计: 通过求解方程确定模型的参数值 (变量的系数)。参数估计是模型的核心环节, 参数估计的准确性, 直接决定了建模的效率和模型的可靠性。

(4) 模型的预测检验: 数据进行预测, 并对预测结果进行分析。

4.2 模型预测

4.2.1 中国工业银需求预测

(1) 典型国家工业银消费规律

银与黄金等贵金属相比, 主要应用领域是工业部门, 因此银的需求量并不是无限增长的, 还是具有消费顶点的。通过对美国、加拿大、墨西哥、英国、法国、德国、意大利、日本和中国具有代表性国家的较长尺度数据 (1950—2020 年) 分析, 对工业银的消费规律进行探讨。

工业银的消费规律, 不同于一般大宗矿产人均 GDP 与人均消费量的“S”形规律和消费强度的倒“U”形规律, 发达国家人均 GDP 与工业银的人均消费量和工业银的消费强度分别呈现出“M”形和

“N”形(图 7a、b), 银的两种消费形态可以被解析为“S”形和倒“U”形消费规律的延伸和发展。根据各个国家的消费轨迹, 人均 GDP 和人均工业银消费可以进一步将其解析为两期“S”形叠加的波次递进:

①“S”形第一期。发达国家第一个工业银的消费完整周期大致处于第二次世界大战至 20 世纪 80 年代中叶, 人均 GDP 在 3000~18000 盖凯美元。这一周期的起飞点、转折点和峰值点对应的人均 GDP 分别为 3000~5000 盖凯美元、7000~9000 盖凯美元和 12000~13000 盖凯美元。这一周期工业银的消费与感光材料的大量使用密切相关, 摄影、相机等下游行业需求刺激了工业银消费量快速增长, 随后逐渐趋于饱和并开始下降。20 世纪 90 年代后, 数码相机的快速发展, 降低了感光材料的需求, 这些国家工业银的消费开始萎靡。

美国:

第一阶段“S”形拟合函数:

$$S = 11.8 + 6.8 \frac{\exp[2.59 \times 10^{-4}(G - 128000)] - \exp[-5.13 \times 10^{-4}(G - 12800)]}{2 \cosh[4.28 \times 10^{-4}(G - 12800)]} \quad (2)$$

第二阶段“S”形拟合函数:

$$S = 12.8 + 10.4 \frac{\exp[3.38 \times 10^{-5}(G - 35000)] - \exp[-9.46 \times 10^{-4}(G - 35000)]}{2 \cosh[9.19 \times 10^{-5}(G - 35000)]} \quad (3)$$

日本:

第一阶段“S”形拟合函数:

$$S = 11.0 + 6.1 \frac{\exp[1.26 \times 10^{-4}(G - 12000)] - \exp[-2.28 \times 10^{-4}(G - 12000)]}{2 \cosh[2.52 \times 10^{-4}(G - 12000)]} \quad (4)$$

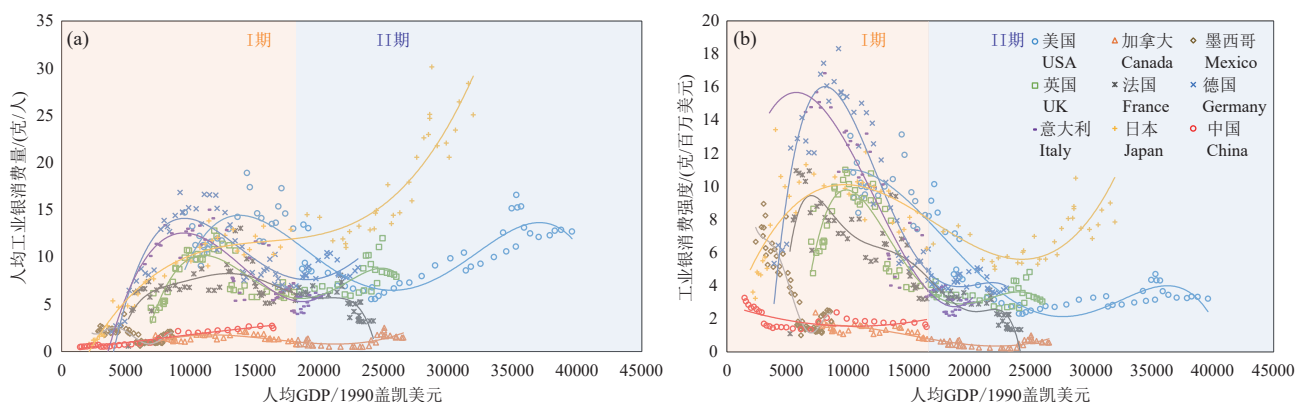


图 7 人均工业银消费(a)、工业银消费强度(b)与人均 GDP 关系图(数据来源: GGDC、世界白银协会、联合国贸易署)
Fig.7 Relationships between GDP per capita and industrial silver consumption per capita (a), industrial silver consumption intensity (b) (Data source: Groningen Growth and Development Centre, The Silver Institute, UN Comtrade)

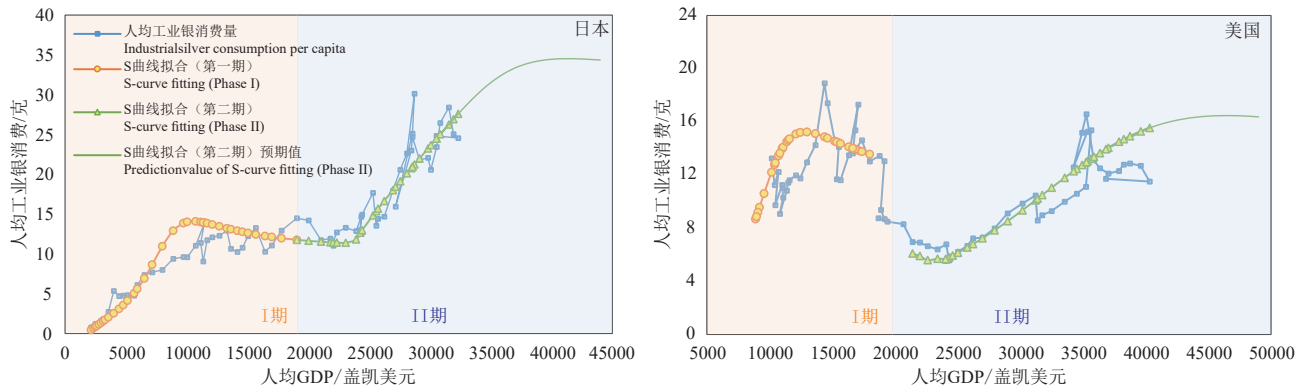


图 8 人均工业银消费和人均 GDP 的“S”形拟合(日本, 美国)(数据来源: GGDC、世界白银协会、联合国贸易署)
Fig.8 S-curve simulation of per capita industrial silver consumption and GDP (Japan, USA) (Data source: Groningen Growth and Development Centre, The Silver Institute, UN Comtrade)

第二阶段“S”形拟合函数:

$$S = 30.2 + 6.4 \frac{\exp[1.57 \times 10^{-4} (G - 34000)] - \exp[-3.15 \times 10^{-4} (G - 34000)]}{2 \cosh[2.00 \times 10^{-4} (G - 34000)]} \quad (5)$$

(2) 中国工业银消费预测结果

中国工业银大规模应用较晚, 且光伏产业正处于快速发展阶段。因此, 中国目前的人均工业银消费量和消费强度处于低水平增长中, 对应人均 GDP 约 16000 盖凯美元, 位于第二个 S 形的起飞点附近(图 7)。在工业银的消费模式中, 发达国家的波次递进消费曲线具有普遍性, 因而中国的工业银消费模式也大致遵循这一模式, 区别在于具体的消费数值差异, 但是其规律性还是适用的。此外, 在一些报告和文献已经有相关机构和专家应用“S”形对银的消费进行预测并取得了成功(中国地质科学院矿产资源研究所, 2016^①, 2021^②)。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: 两国同属政府主导型不完全竞争经济; 两国都制订了适合本国情况发展的中长期规划; 两国都在短时期内实现了适当的产业升级; 两国都确立了有秩序的对外开放体制; 两国都实行培养高素质科技人员和劳动力的方针; 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)。参考其他国家消费规律的基础上, 选取日本为参考国, 建立中国人均工业银消费的“S”形曲线, 通过拟合人均消费量和人均 GDP 关系, 对中国的工业银需求进行预测。

从中国工业银的产业发展和政策来看, 新能源

背景下, 光伏银浆空间广阔。2020 年, 中国太阳能光伏发电量 2.5 亿 kW, 风电 2.8 亿 kW, 而根据国务院《2030 年前碳达峰行动方案》, “到 2030 年, 风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上。”这意味着未来十多年, 光伏发电量至少提高 1~2 倍。此外, 近十年来, 通过技术性栅线改革, 单位银浆的消费量已持续下跌至不足 100 mg/片的极限状态, 除非开发其他有色浆料如铜和铝浆代替银浆涂层, 否则单位银浆消耗量继续下降可能性极小且也无回弹空间, 未来一段时间内大概率维持目前状态(图 9)。总体来看, 光伏用银在未来 10~15 年, 仍将保持较高速增长。同时, 银和银制品还应用于高性能合金、高性能靶材、催化剂等新兴产业领域, 但受制于价格因素, 增长有限。

基于此, 给定 3 种不同的增长方案, 高增长情景: 2022—2035 年, GDP 总量年平均增长率按 5% 增长, 2035—2050 年按 3% 增长; 碳中和情景(参考情景): 2022—2035 年, GDP 总量年平均增长率按 4% 增长, 2035—2050 年按 2% 增长, 光伏产业快速发展; 低增长情景: 2022—2035 年, GDP 总量年平均增长率按 3% 增长, 2035—2050 年按 1% 增长。利用 S-curve 拟合, 测算未来中国人均工业银的消费量与人均 GDP 的函数关系和需求趋势, 结果见公式(6)~(8)。

高增长情景:

$$S = 4.8 + 1.2 \frac{\exp[4.09 \times 10^{-4}(G - 26000)] - \exp[-4.53 \times 10^{-4}(G - 26000)]}{2 \cosh[3.88 \times 10^{-4}(G - 26000)]} \quad (6)$$

碳中和情景(参考情景):

$$S = 4.4 + 1.2 \frac{\exp[3.63 \times 10^{-4}(G - 29000)] - \exp[-3.74 \times 10^{-4}(G - 29000)]}{2 \cosh[3.43 \times 10^{-4}(G - 29000)]} \quad (7)$$

低增长情景:

$$S = 4.0 + 1.0 \frac{\exp[3.61 \times 10^{-4}(G - 32000)] - \exp[-3.74 \times 10^{-4}(G - 32000)]}{2 \cosh[3.46 \times 10^{-4}(G - 32000)]} \quad (8)$$

根据以上分析,对中国工业银需求进行预测:按高增长方案,中国工业银消费峰值在 2038 年左右,届时人均工业银消费量 6.1~6.4 g,消费总量 8700~8900 t;碳中和情景下,中国将在 2042 年左右到达顶点,届时人均工业银消费量 5.7~6.0 g,消费总量为 8000~8200 t;按低增长方案,中国将在 2045 年左右到达顶点,届时人均工业银消费量 4.9~5.2 g,消费总量为 6900~7100 t。中国工业银需求按 3 种给定方案达到峰值后,将在平台期震荡(图 10)。

4.2.2 非工业银需求预测

银的非工业领域主要涉及珠宝、银器、投资等,影响该领域消费的核心因素是价格。通过对 1990—2020 年中国非工业银的消费量与国际银价数据进行分析,发现二者都是非平稳序列,属于强相关,趋势基本一致(图 11,表 3)。因此,可以通过构建非工业银消费量与银价的关系,根据银价变动对中国非工业银的需求进行预测。

(1) 国际银价预测

从时间序列预测的规律看,观测值数量越多,

预测周期越短,其结果往往更加准确,而价格又是趋势、周期和短期情绪的综合结果,与经济利益直接挂钩,波动往往较大。因此以 1900—2020 年伦敦金属交易所的长周期白银年度价格作为观察值,选取 2022—2035 年作为预测年份,运用 ARIMA 模型进行预测。

通过对数进行平稳性检验、模型选取和参数

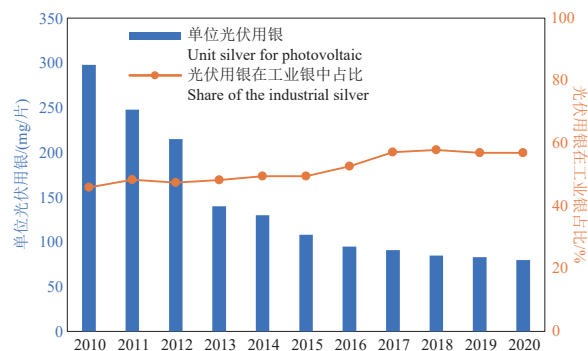


图 9 单位光伏用银量和在工业银中的占比(数据来源:世界白银协会)

Fig.9 Silver consumption per unit photovoltaic and its proportion in industrial silver (Data source: The Silver Institute)

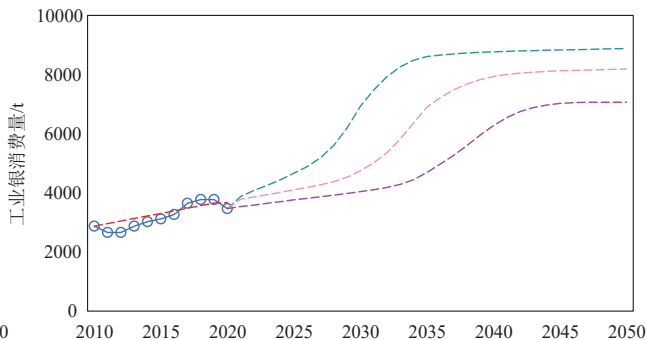
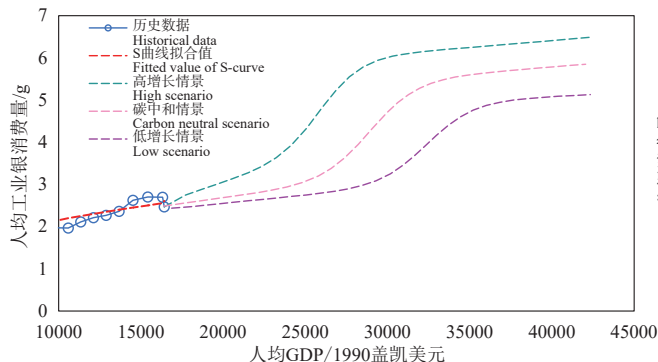


图 10 2022—2050 年中国工业银消费量预测结果

Fig.10 Forecasting results of China's industrial silver consumption from 2021 to 2050

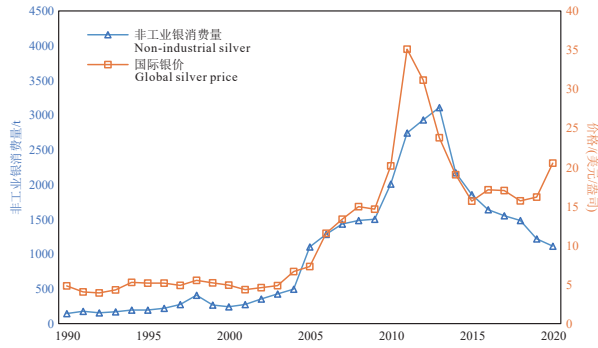


图 11 1990—2020 年中国非工业银消费量和国际银价(数据来源:世界白银协会,伦敦金属交易所)
Fig.11 Consumption of China's non industrial silver and global silver price from 1990 to 2020 (Data source: The Silver Institute, London Metal Exchange)

估计,选取 ARIMA(1, 1, 2)模型进行预测,预测结果及统计量如表 4、图 12 和表 5 所示。从拟合结果和统计检验来说,模型拟合优度高,误差小。

(2)中国非工业银需求预测结果

已有文献对关于非工业银消费与价格关系研究较少,并没有成熟的理论与模型。本文通过非工业银消费与价格多种拟合函数的对比,从相关性、拟合性和易操作性出发,选取最佳拟合函数进行预测(表 6)。

从分析结果看,二次多项式拟合结果的相关性和各类误差结果都较优,且函数易于理解与操作,可作为最优拟合方程进行预测。

利用 ARIMA 预测结果和二次多项式拟合函数,对中国非工业银的需求量进行预测。预测结果表明,碳中和情景下,除 2021 年,因疫情、全球放水等因素刺激国际银的年均价格达到近 8 年新

高,导致需求快速增长外,其余年份保持小幅增长(图 13)。

4.3 预测结果与评述

综合以上结果,在碳中和情景下,2022—2035 年,中国银的需求量呈增长态势,从 5800 t 增长到 9500 t,年均增长率约为 3.7%(图 14)。

(1)工业银方面。2022—2035 年,中国工业银的需求保持快速增长,从 3800 t 增长到 7000 t,年均增长率为 4.4%。其中,光伏对银需求增长的贡献最大,成为支撑银消费的重要领域,电子电器和合金领域维持一定规模,感光材料领域则逐渐萎缩。

(2)非工业银方面。2022—2035 年,中国非工业银需求整体保持温和增长,从 2000 t 增长到 2500 t,年均增长率为 1.7%。

从本文预测结果与他人预测对比情况看(表 7),本文的结果相对偏低,其主要原因是将银的金融属性纳入了预测体系。从银价与需求的关系来看,2000—2011 年,中国银的价格与需求相关性较弱,其主要原因在于 2000 年废除白银的“统购统销”政策后,长期积累的需求在短时间内大量释放,形成了产销两旺,价格持续上涨的特殊时期。2011 年之后,中国白银进入正常的市场经济阶段,这一时期,价格对需求的影响明显。从价格与需求的相关性分析来看,这一时期,价格与工业银消费的相关系数为-0.81,为明显负相关,而价格与非工业银的相关系数达到 0.79,为明显正相关,即银价上涨会刺激非工业银需求上涨,但同时也会在一定程度上抑制工业银的需求。因此,未来银的需求变动受价格影响保持在相对合理水平,而非过快增长(图 15)。

表 3 1990—2020 年中国非工业银消费量和国际白银价格数据特征

	方差	标准差	ADF值	ADF的P值	泊松相关	肯德尔相关
非工业银消费量	8.09×10 ⁵	899.20	-0.28	0.54		
白银价格	70.77	7.41	-0.02	0.64	0.94**	0.73**

注: **表示在5%水平上显著相关。

表 4 ARIMA 模型拟合统计量
Table 4 ARIMA simulation statistics

R ²	RMSE	MAPE	MAE	MaxAPE	MaxAE	正态化BIC
0.89	2.2	23.80	0.99	98.18	11.61	1.78

注: R²、RMSE、MAPE、MAE、MaxAPE、MaxAE和BIC分别表示决定系数、均方根误差、平均绝对百分比误差、平均绝对误差、最大绝对百分比误差、最大绝对误差和贝叶斯信息准则。

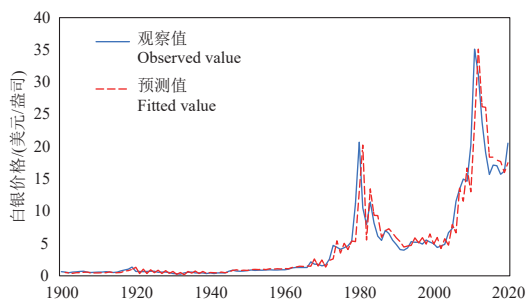


图 12 1900—2020 年国际银价的 ARIMA 模型拟合结果(数据来源:伦敦金属交易所)

Fig.12 ARIMA simulation results of world silver price from 1900 to 2020 (Data source: London Metal Exchange)

5 政策与建议

基于以上分析,为了更好地促进银产业发展,可以从以下四方面入手:

(1)高度重视并提升银在未来国民经济中的地位和作用。新能源背景下,银矿已经成为能源转型、高端电气应用的重要支撑矿种,而在新兴产业领域,银又广泛应用于新材料产业和新能源产业中,主要产品包括光电子二极管、抗菌薄膜光伏电池、电油墨技术等,且潜力较大。因此,银得益于贵金属和工业金属“两全其美”的双属性及在绿色能源的广泛应用,未来在国民经济中的地位和作用将大幅提升,必须给予高度重视。

(2)多手段保障银矿资源供应能力。首先,加强国内银矿资源勘查工作。在大兴安岭北段 Pb-Zn-Ag-Au 成矿带、额尔古纳 Cu-Mo-Pb-Zn-Ag 成矿带等 100 余个 3 级预测区内,开展银矿找矿工作,增加银矿查明资源储量,特别是储量(证实储量和可信储量)。其次,加强共伴生资源综合利用的力度。由于银矿利用受铜、铅、锌、金等主矿产影响较大,需要继续加大力度出台政策,调动并支持企业提高伴生资源利用率。再次,加强再生银资源的回收。最后,积极拓展海外银矿资源,重视海外共伴生银矿资源的利用。

(3)加大技术创新,开展深加工,提高工业银的产品附加值,为能源转型和高端制造提供保障。2030 年之前,中国光伏发电至少提高一倍,虽然银的工业和金融双属性使得其使用成本较高,但是通过技术改革,提升光伏单位面积的发电量和储能效率,对于能源转型的经济性和可行性至关重要。此外,提高产品精深加工扩大应用领域,不仅可以助力银矿产品国际贸易,还可助力中国高端产业、关键技术的早日实现突破。

(4)建立国家与民间双重银储备与保障体系,避免银价大起大落。银的金融属性,不仅可以作为对冲资产贬值的重要产品,也可以作为投资获利的重要载体。建议实施“藏富于民”策略,加强银期货交

表 5 2022—2035 年国际银价预测结果

Table 5 Forecast results of world silver price from 2022 to 2035

年份	预测值	置信下限**	置信上限**	年份	预测值	置信下限**	置信上限**
2020	20.55			2028	23.74	12.12	35.36
2021	21.51	17.15	25.86	2029	24.23	11.99	36.47
2022	20.7	13.74	27.66	2030	24.73	11.9	37.55
2023	21.39	13.57	29.2	2031	25.23	11.84	38.61
2024	21.81	13.08	30.55	2032	25.73	11.81	39.66
2025	22.29	12.76	31.83	2033	26.24	11.8	40.69
2026	22.77	12.49	33.05	2034	26.76	11.81	41.71
2027	23.25	12.28	34.22	2035	27.28	11.85	42.71

注:单位为美元/盎司; **代表95%的置信水平。

表 6 中国非工业银消费/需求量和国际白银价格 ($y-x$) 函数拟合结果

Table 6 Simulation results of non-industrial silver consumption/demand and world silver price ($y-x$)

拟合关系	拟合方程	R^2	MAE	MAPE	RME
线性拟合	$y=100.35x-134.65$	0.88	211.23	0.35	304.64
指数拟合	$y=188.25e^{0.11x}$	0.54	551.32	0.47	1144.64
对数拟合	$y=1217.5\ln(x)-1168.3$	0.89	198.01	0.32	293.37
多项式拟合 (2阶)	$y=-1.66x^2+154.2x-425.51$	0.90	170.02	0.27	274.00
多项式拟合 (3阶)	$y=-0.059x^3+1.585x^2+105.68x-254.26$	0.91	169.71	0.25	272.68
多项式拟合 (4阶)	$y=-0.026x^4+1.9x^3-48.02x^2+587.38x-1636.3$	0.92	169.58	0.30	254.57

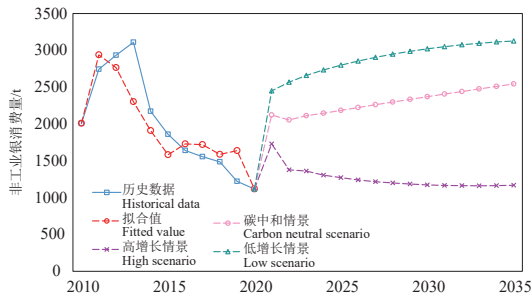


图 13 2022—2035 年中国非工业银消费量预测结果
Fig.13 Forecasting results of China's non-industrial silver consumption from 2022 to 2035

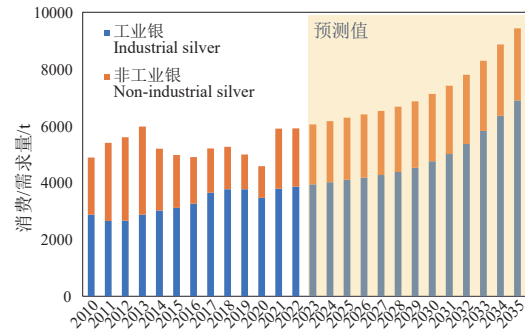


图 14 中国银需求预测结果
Fig.14 Forecasting results of silver demand in China

表 7 中国银需求预测结果及对比 (t)

Table 7 Forecasting results and comparison of silver demand in China (t)

品种	预测机构或个人	2020年	2025年	2030年	2035年
银	高情景		7300~7500	9800~10000	11600~11800
	碳中和情景		6100~6300	7100~7300	9300~9600
	低情景		5000~5200	5100~5300	5700~5900
	中国地质科学院矿产资源研究所 (2021) ①	4584	6200~7200	7000~9800	7900~15400
制造业银	中国地质科学院矿产资源研究所 (2016) ②		11000	13500	
	陈兴荣 (2014)		37372	71628	

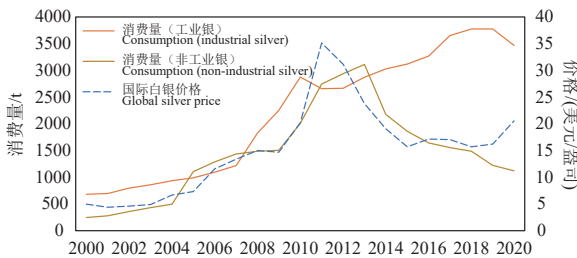


图 15 中国银消费与价格关系
Fig.15 The relationship between silver consumption and price in China

易的监管, 实现与工业银需求互为补充。当工业银需求上涨导致银价上涨, 或者出现上涨预期时, 政府和相关部门可以将这部分投资用银将回吐市场, 起到平抑银价波动的重要作用。

6 结 论

(1) 中国银矿资源呈现“四多四少”地质特征和供不应求的市场特征。“四多四少”的地质特征表现为“资源总量多, 可利用资源少; 小矿多、大矿少; 贫矿多、富矿少; 共伴生矿床多, 独立矿床少”。供不应求的市场特征表现为随着应用领域的不断增长, 特别是银在光伏产业的应用发展, 国内的矿山资源和再生资源已经不能满足需求, 需进口银矿产

品和其他精矿(用于生产副产银, 如铅精矿、锌精矿等)来补充缺口。

(2) 利用 S-curve 和 ARIMA 模型分别对工业银和非工业银进行需求预测, 最后得出中国银的需求总量。预测结果表明: 2022—2035 年中国银的需求量呈增长态势, 从 5800 t 增长到 9500 t, 年均增长率为 3.7%。

(3) 提出了发达国家工业银消费的两期 S 形波次递进规律, 运用该规律预测了中国工业银的需求。在新能源背景下, 光伏用银在未来 10 至 15 年, 仍将保持较高速增长。因此, 光伏产业将成为拉动工业银需求增长的主要领域。在此基础上, 预测 2022—2035 年中国工业银需求将迎来较快增长, 从 3800 t 增长到 7000 t, 年均增长率为 4.4%。

(4) 运用 ARIMA 模型和拟合函数, 预测了中国非工业银的需求。预测结果表明: 2022—2035 年中国非工业银的需求将保持温和增长, 从 2000 t 增长到 2500 t, 年均增长率为 1.7%。

注释

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2016. 中国银矿资源 2020—2030 年保障程度论证报告 [R].

② 中国地质科学院矿产资源研究所. 2021. 2035 年中国 35 种矿

产资源需求预测报告 [R].

References

- 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).
- Chen Xinrong. 2014. The Status and Quantitative Prediction of Silver Resources in the World and China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–91 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2010. Technical Requirements for the Study of the National Mineral and Regional Metallogenic Regularity[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).
- Groningen Growth and Development Centre. 2021. Total Economy Database[EB/OL]. [2021–11–5] <http://www.ggd.net>.
- Godbole P D, Mitra A, Pasricha R, Mandale A B, Patil K R. 2005. Deposition and characterization of silver nano-films by a novel Solid Liquid Interface Reaction Technique (SLIRT)[J]. *Materials Letters*, 59(14/15): 1958–1961.
- Hammed M, Mola G T. 2020. Highly stable thin film organic solar cells using poly crystallized silver doped LaPO₄[J]. *Solar Energy*, 207: 157–164.
- Han Chao, Song Su, Wang Chenghong. 2004. A real-time short-term traffic flow adaptive forecasting method based on ARIMA model[J]. *Journal of System Simulation*, 16(7): 1530–1532, 1535 (in Chinese with English abstract).
- Jiang B, Zhang D Q, Wang D H, Wang C H, Chen Y C, Bai G. 2015. A preliminary review of metallogenic regularity of silver deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(3): 1002–1020.
- Jiang Biao, Chen Yuchuan, Wang Chenghui, Zhang Daquan, Bai Ge. 2015. A preliminary study of minerogenetic series and mineralization pedigree of silver deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1295–1308 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Biao, Zhang Tong, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Huang Chongke, Bai Ge, Wang Chenghui, Huang Fan. 2020. Factors controlling ore formation, regularity and some prospecting strategies for silver deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 113–126 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Lasheras F S, Juez F, Sánchez A S, Krzemień A, Fernández P R. 2015. Forecasting the COMEX copper spot price by means of neural networks and arima models[J]. *Resources Policy*, 45: 37–43.
- Li Qi. 2021. Aluminum—the pioneer of carbon neutrality, the main force of the energy revolution[J]. *Resource Recycling*, (4): 18–25 (in Chinese).
- London Metal Exchange. 2021. Market Data [EB/OL]. [2021–11–12] <https://www.lme.com/en/Metals/Precious/LME-Silver#Trading+daily+summary>.
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon neutralization: Current status and development direction[J]. *Geology in China*, 48(2): 347–358 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jia, Li Pengyuan, Zhou Ping. 2017. Major precious metal resources utilization and criticality assessment in China[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 36(11): 37–48 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources. 2021. China Mineral Resources (2020) [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- National Bureau of Statistics. 2018. The classification of emerging sectors of strategic importance(2018)[EB/OL]. [2021–11–05] http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201811/t20181126_1635848.html.
- The Silver Institute. 1950–2021. World Silver Survey[EB/OL]. [2021–11–15] <https://www.silverinstitute.org/all-world-silver-surveys/>.
- USGS. 2022. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2022–8–05] <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>.
- UN Comtrade. 2021. UN comtrade database [EB/OL]. [2021–11–05] <http://comtrade.un.org/>.
- 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 Denghong, Ying Lijuan, Wang Chenghui, Chen Zhenghui, Xu Jianxiang, Zeng Zailin, Chen Yuchuan, Xu Yu, Bai Ge. 2007. Basic patterns of metallogenesis of precious metal deposits in China and vectors for prospecting[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 71–81 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huan, Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Hu Jiayu, Wang Wei. 2021. Role, supply and demand analysis and suggestions of critical minerals in clean energy transformation under carbon neutralization target[J]. *Geology in China*, 48(6): 1720–1733 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiapeng, Wu Long, Zhang Hongchuan. 2021. Analysis on the supply and demand pattern of global silver resources and the influencing factors of price[J]. *China Mining Magazine*, 30(S1): 1–4, 16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingchun, Chen Minyang, Xiao Menghua. 1994. Temporal and spatial distribution of silver deposits in China[J]. *Journal of Geology and Mineral Resources in North China*, 9(1): 111–116 (in Chinese).
- Wang Ying. 2018. An empirical analysis of the linkage between silver futures and spot prices in China[J]. *Finance Economy*, (8): 107–109

- (in Chinese).
- Wei Weiqiang. 2006. The reason of Japan's development and stagnation economy and its inspiration to that of China[J]. *Around Southeast Asia*, (11): 69–74 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qing, Zhang Zhaozhi, Pan Zhaoshuai, Zhang Zenan, Xu Hengyi. 2021. Forecast of China's Vanadium resource demand from 2020 to 2035[J]. *China Mining Magazine*, 30(5): 48–56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Daquan, Jiang Biao, Wang Denghong, Wang Chenghui, Chen Yuchuan, Bai Ge. 2015. A Summary of resources characteristic and metallogenic regularity of silver deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1008–1025 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liang, Yang Huipeng, Feng Ansheng, Zhao Junwei, Tan Xiuming. 2016. Study on general situation and analysis of supply and demand of global silver[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 36(5): 44–48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Z, Jiang G Y, Wang X W, Zhang J F. 2016. Development and utilization of the world's and China's bulk mineral resources and their supply and demand situation in the next twenty years[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(4): 1370–1417.
- ### 附中文参考文献
- 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.
- 陈兴荣. 2014. 全球与中国银矿资源现状及白银需求定量预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–91.
- 陈毓川, 王登红, 陈郑辉. 2010. 全国重要矿产和区域成矿规律研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社.
- 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]. [2022–8–05] http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201811/t20181126_1635848.html.
- 韩超, 宋苏, 王成红. 2004. 基于 ARIMA 模型的短时交通流实时自适应预测[J]. *系统仿真学报*, 16(7): 1530–1532, 1535.
- 江彪, 陈毓川, 王成辉, 张大权, 白鸽. 2015. 中国银矿床成矿系列与成矿谱系初探[J]. *矿床地质*, 34(6): 1295–1308.
- 江彪, 张通, 王登红, 陈毓川, 黄崇柯, 白鸽, 王成辉, 黄凡. 2020. 中国银矿床地质控矿规律及若干找矿方向[J]. *地质学报*, 94(1): 113–126.
- 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.
- 李琦. 2021. 铝——碳中和的先行者能源革命的主力军[J]. *资源再生*, (4): 18–25.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. *中国地质*, 48(2): 347–358.
- 毛佳, 李鹏远, 周平. 2017. 中国主要贵金属资源利用及关键性评估[J]. *工业技术经济*, 36(11): 37–43.
- 王登红, 应立娟, 王成辉, 陈郑辉, 许建祥, 曾载淋, 陈毓川, 徐珏, 白鸽. 2007. 中国贵金属矿床的基本成矿规律与找矿方向[J]. *地学前缘*, 14(5): 71–81.
- 王欢, 马冰, 贾凌霄, 于洋, 胡嘉修, 王为. 2021. 碳中和目标下关键矿产在清洁能源转型中的作用、供需分析及其建议[J]. *中国地质*, 48(6): 1720–1733.
- 王家鹏, 吴龙, 张洪川. 2021. 全球白银资源供需格局与价格影响因素分析[J]. *中国矿业*, 30(S1): 1–4, 16.
- 王静纯, 陈民扬, 肖孟华. 1994. 中国银矿床的时空分布[J]. *华北地质矿产杂志*, 9(1): 111–116.
- 王莹. 2018. 我国白银期货与现货价格联动关系的实证分析[J]. *金融经济*, (8): 107–109.
- 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.
- 吴晴, 张照志, 潘昭帅, 张泽南, 徐恒逸. 2021. 2020—2035 年中国钒需求预测[J]. *中国矿业*, 30(5): 48–56.
- 张大权, 江彪, 王登红, 王成辉, 陈毓川, 白鸽. 2015. 中国银矿的资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*, 89(6): 1008–1025.
- 张亮, 杨卉苒, 冯安生, 赵军伟, 谭秀民. 2016. 全球银矿资源概况及供需分析[J]. *矿产保护与利用*, 36(5): 44–48.
- 自然资源部. 2021. 中国矿产资源报告(2020)[M]. 北京: 地质出版社.