

伴生机制下中国镓资源可持续供给和铝减排 协同发展路径研究

邵留国^{1,2}, 李漪瑶¹, 蓝婷婷¹

(1. 中南大学商学院, 湖南长沙, 410083;
2. 中南大学金属资源战略研究院, 湖南长沙, 410083)

摘要:通过分析铝-镓间的主金属生产机制、伴生金属生产机制、主伴生矿产市场联动机制,从资源、技术、市场、环境、需求等角度剖析中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的影响因素,并构建系统动力学仿真模型,研究不同供需情景和措施情景下中国镓资源可持续供给能力和铝减排协同发展的保障路径。当中国原铝产业不受碳排放目标约束或回收水平较高时,在既定需求情景和清洁能源发展需求情景下,中国镓资源都具有良好的可持续供给能力;反之,可持续供给能力将下降。在保障中国镓资源可持续供给的路径选择上,如果采取单项措施,提升水电铝占比最为有效;如果采取组合措施,在提高水电铝占比的同时提高粗镓提取率,最为有效。

关键词: 战略性矿产; 资源安全; 伴生生产机制; 碳减排; 镓

中图分类号: F752; F426.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-3104(2025)03-0138-16

镓是战略性矿产资源,在高技术产业中具有重要应用价值,被欧洲国家及美、日、澳等国列入关键矿产清单^[1]。中国原生镓的产量占全球产量的90%以上,在全球镓资源领域占据着显著优势地位,对全球镓资源供应格局具有决定性影响;能为高科技产业升级提供关键要素支撑,为国家整体战略实施提供重要战略支点。为维护国家战略安全与核心经济利益,2023年7月3日,我国商务部、海关总署宣布我国自2023年8月1日起对镓、锗相关物项实施出口管制。为了实现我国高科技产业的发展、助力国家战略的制定,维护我国镓资源的安全和优势地位至关重要。

现有研究主要围绕镓的供应风险、供应潜力和未来需求进行了分析、预测,表明镓资源的供给优势地位可能会受到威胁^[2-5]。镓的战略稀缺性显著,高达90%以上的镓来自伴生生产,主金属铝的供需波动可能会对伴生金属镓的供给形势产生影响,进而使得中国的镓资源供给优势地位面临极大挑战^[6]。铝冶炼是中国有色金属行业中最大的二氧化碳排放源,政府主要采取严控新增产能、减少产量等措施减少碳排放^[7-9]。2021年12月,我国工业和信息化部、科技部、自然资源部等三部门联合发布《“十四五”原材料工业发展规划》,要求严格落实电解铝、钢铁等行业的产能置换相关政策,如新建项目应实施产能等量或减量置换等。不少学者针对中国铝冶炼行业有关碳排放问题进行了研究,认为铝减排是大势所趋^[10-12]。如果按现状继续发展,原铝行业的温室气体排放总量将继续增加,到2030年将达到8.84亿吨二氧化碳当量^[13],铝减排的力度要进一步加大。

收稿日期: 2024-06-10; 修回日期: 2024-11-22

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“地缘政治突发事件对我国战略性矿产资源产业链供应安全影响的机理和对策研究”(22&ZD098)

作者简介: 邵留国,男,山东汶上人,中南大学商学院教授、博士生导师,中南大学金属资源战略研究院副院长,主要研究方向: 产业链供应链安全、资源管理与政策; 李漪瑶,女,湖南耒阳人,中南大学商学院硕士研究生,主要研究方向: 资源供应链安全; 蓝婷婷,女,湖南怀化人,中南大学商学院博士研究生,主要研究方向: 资源供应链安全,联系邮箱: 251854707@qq.com

为了同时确保主矿产减污降碳和镓资源供给的优势地位, 在碳减排背景下统筹主伴生金属协调发展值得深入研究, 本文以铝-镓这对主伴生金属为例, 力图回答以下问题。

第一, 铝-镓主伴生矿产的协同生产机制是什么? 影响两者协同发展的因素是什么?

第二, 为了实现“双碳”目标, 在铝行业减产、能耗双控等政策背景下, 应该采用什么路径保证中国镓资源可持续供给和主矿产减污降碳(铝减排)协同发展?

在铝-镓伴生系统中, 既有铝土矿、氧化铝、镓之间的伴生生产关联, 又有原铝需求变化、铝土矿产量变化、镓供给变化之间的市场关联(图 1)。现有研究主要对镓的地质分布规律、供给潜力和需求形势进行了较为全面的分析, 但对铝-镓主伴生关系的刻画较为笼统, 缺少对主伴生协同关系影响因素和作用机制的系统分析^[13-16], 因而无法根据现有研究模型开展铝-镓协同发展路径研究。

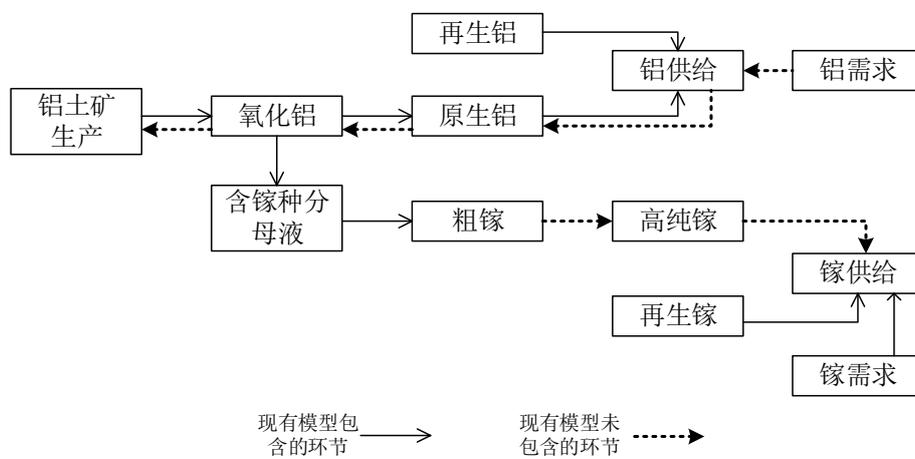


图 1 包含生产联系和市场联系的铝-镓伴生系统

为了研究上述问题, 弥补现有研究的不足, 本文深入刻画了主伴生生产关联关系、市场关联关系、主金属生产机制、伴生金属生产机制, 构建了囊括镓提取生产过程和深加工环节的铝减排-镓资源可持续供给协同发展的系统动力学仿真平台, 并将研究视角拓展到了全产业链, 详细描述了其影响因素和相互作用机制。

一、协同生产机制分析

(一) 伴生生产关系分析

伴生性矿产随主矿产采选而生产的过程通常被称为伴生生产。通常情况下, 主矿产决定了矿石开采的经济基础和开采策略。伴生性矿产作为主矿产的副产品, 对生产利润最优决策没有影响^[17]。所以在多数情况下, 主矿产的产量决定了伴生性矿产的供给上限。伴生性矿产的需求能否得到满足取决于主矿产需求的变化, 如果技术变化或主矿产二次回收致使一种主矿产的需求大幅减少, 伴生性矿产的供给将会因此受限^[18]。

以铝和镓为例, 粗镓来源于铝土矿制备氧化铝的过程, 铝土矿的开采量决定了粗镓的产能上限。图 2(右)中, 粗镓的供给曲线分为两段。平滑曲线一侧表示, 在上限内, 粗镓可以在弹性机制下进行供需调节。水平直线一侧表示, 受左图中铝土矿最大开采量的限制, 粗镓供需弹性机制失效, 粗镓价格的上涨无法刺激供给增加, 需求将得不到满足。

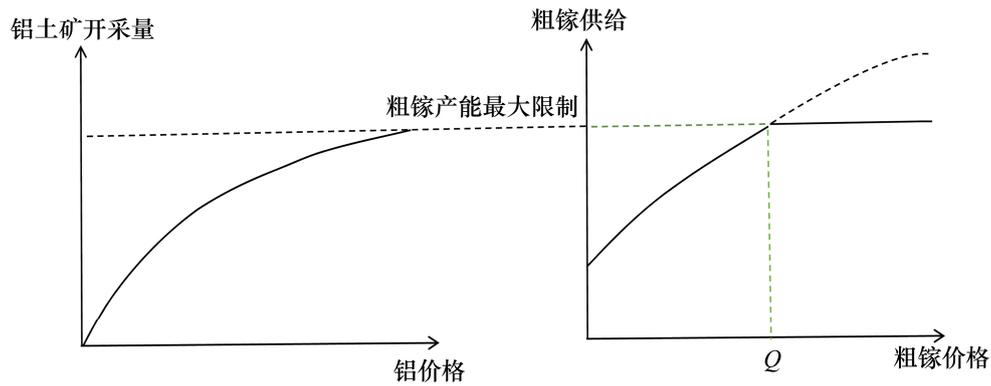


图2 伴生性矿产镓的市场供给机制

(二) 影响因素分析

综合已有研究, 本文将中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的主要影响因素分为资源因素、市场因素、技术因素、需求因素、碳排放因素五个方面(表1)。

表1 中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的影响因素

主伴生矿产	因素分类	具体衡量指标
铝	资源因素	铝土矿资源品位
	技术因素	再生铝回收率
	碳排放因素	铝清洁生产水平 铝行业碳排放目标
镓	资源因素	镓储量
	市场因素	粗镓生产成本
		镓市场价格
		镓价值链地位
	技术因素	粗镓提取率 高纯镓提纯技术 镓回收再利用技术
需求因素	镓终端应用需求	

资源因素。镓的地质储量是影响中国未来镓资源可持续供给能力的最大不确定性因素。中国镓资源长期过量开采, 镓矿石资源消耗巨大, 造成储量急速下降。同时, 中国铝土矿因多年开采利用而出现资源禀赋恶化、高品位矿逐渐枯竭等现象, 导致伴生金属镓提取率降低、开采难度增大。

市场因素。生产成本、价格等市场因素是影响生产商决定是否投产、提高或降低产能的重要因素^[19]。一是资源品位下降可能导致未来镓的提取成本有继续上升的趋势。二是伴生金属镓市场规模小和需求不稳定导致其价格波动的幅度显著高于大宗矿产。三是中国镓产业链中的高端环节发展不充分, 缺乏高端产品, 不利于保障未来的长期供给能力和国际竞争力^[20]。

技术因素。一是铝工业转向回收材料及原铝清洁生产技术不足^[11], 都可能导致粗镓产量的下降。二是粗镓提取率低、高纯镓关键提纯技术不足^[21-22]。三是镓资源在加工制造环节有大量的损失, 资源浪费严重, 二次回收率较低^[23]。

需求因素。镓在传统领域和清洁能源领域的终端应用需求会进一步增长, 可能会使镓的需求量增加到目前产量的几倍^[21]。美国国家环境保护局发布的《清洁能源计划》预测镓等 11 种关键伴生金属的需求量到 2040 年将增加 15%~43%。中国面临着能否保持以现有的供给量满足全球镓需求高速增长的问题。

碳排放因素。一是铝行业碳排放目标是硬指标^[24]。国际铝业协会(IAI)2021 年发布报告《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》, 表示到 2050 年全球铝行业必须将温室气体排放量减少 77%, 中国将严格控制铝行业的二氧化碳排放量^[25]。二是铝产业减排力度加大导致的原铝生产减少会影响镓资源供给, 因而铝清洁生产水平是影响镓资源可持续供给的重要因素之一。

二、模型描述

(一) 模型的构建目的及系统边界

构建该模型的主要目的是分析中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展过程, 并评估改善措施对促进二者协同发展的效果。模型的时间跨度为 2010—2060 年, 在这段时间内, 中国镓产能逐步上升并保持全球最大产量, 全球镓需求快速增长, 主矿产铝面临碳排放约束。模型的系统边界涵盖了从铝土矿开采到镓终端应用整个流程中的相关因素。

(二) 因果回路图

根据前文的分析, 可以确定模型的结构并构建中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展模型的因果回路图(图 3)。模型中主要包括以下 5 个反馈回路。

- (1) 铝土矿开采量→氧化铝产出(+)->原铝产量(+)->铝行业碳排放(+)->铝土矿开采量(-);
- (2) 铝土矿开采量→原铝产量(+)->二次铝生产(+)->中国铝供给(+)->铝价格(-)->原铝利润(-)->铝土矿开采量(-);
- (3) 粗镓产量→国内粗镓供给量(+)->粗镓价格(-)->粗镓产量(+);
- (4) 粗镓产量→粗镓供给量(+)->中国高纯镓产量(+)->中国高纯镓供给量(+)->高纯镓价格(-)->中国高纯镓需求(+)->粗镓产量(+);
- (5) 高纯镓产量→高纯镓供给(+)->中国高纯镓价格(-)->高纯镓需求(+)->高纯镓产量(+).

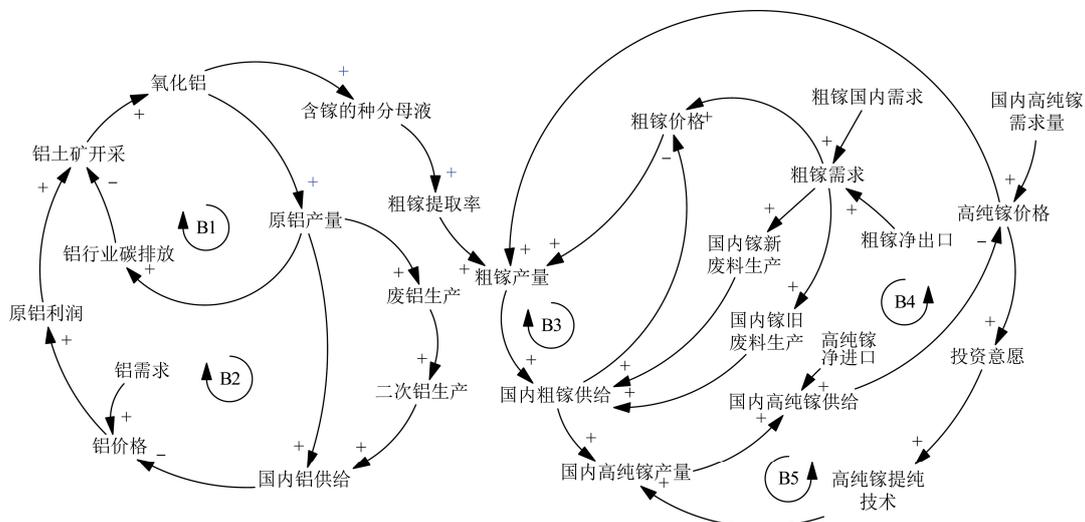


图 3 中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展模型的因果回路图

(三) 存量流量图

1. 铝供需子系统

本文所构建的铝供需子系统如图4所示。在需求方面，本文将中国原铝需求作为外生变量输入。在供给方面，每年向市场供应的铝由原铝和再生铝组成。再生铝经过回收利用后再次进入铝生产流程中。原铝年产量由原铝产能和原铝产能利用率决定。原铝厂商根据利润决定是否新增投资，当原铝价格的增量高于其成本增量时，企业会倾向于加大投资增加产能、新建原铝冶炼厂。

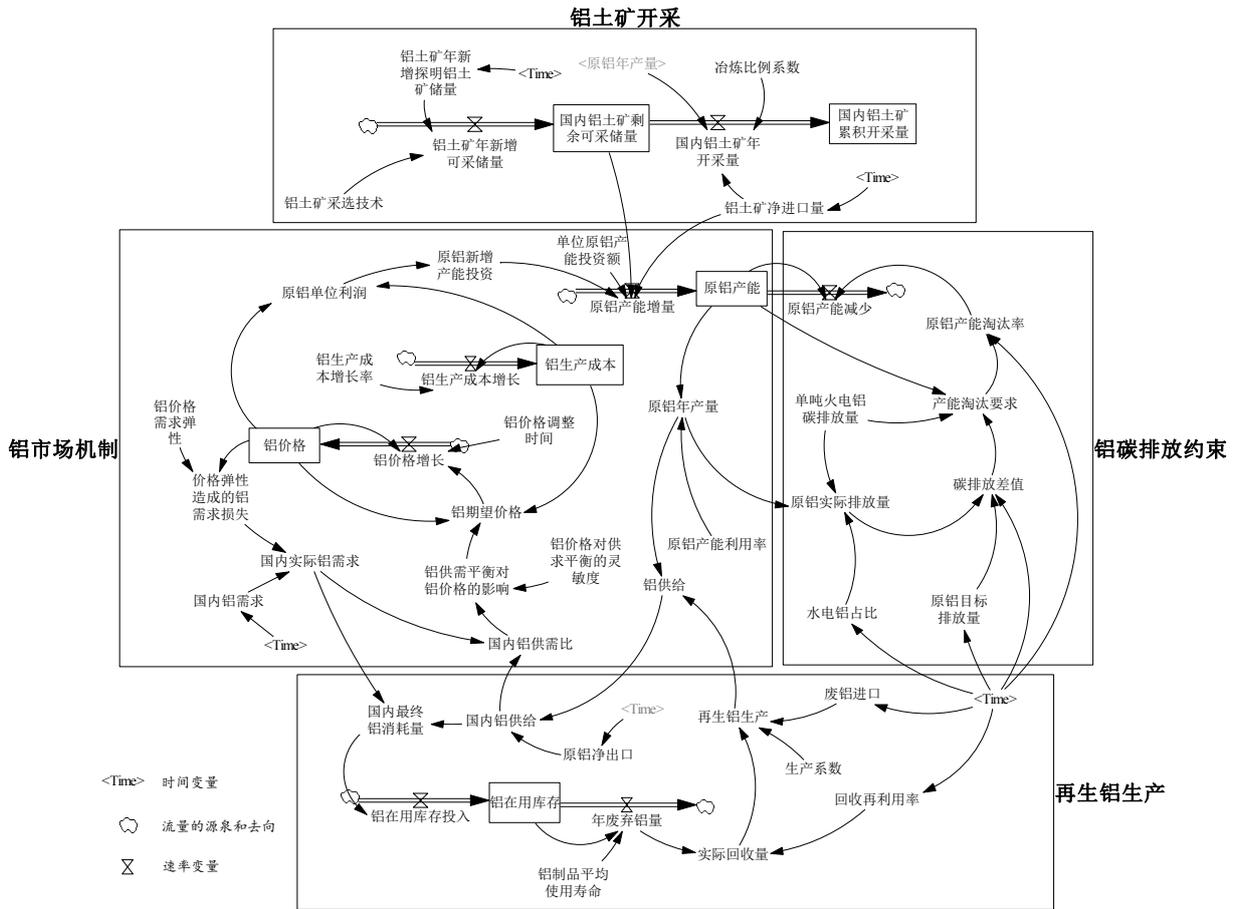


图4 铝供需子系统模型

原铝产能淘汰率历史值分为 2010—2016 年和 2017—2022 年两个阶段，依照已有研究将 2010—2016 年的原铝产能淘汰率设置为 0.018。2017 年出台的《清理整顿电解铝行业违法违规项目专项行动工作方案》等文件提出去产能、去库存措施，因此将 2017—2022 年的原铝产能淘汰率设为 0.036。

原铝产能淘汰率未来值设为两个不同的公式，基准供给情景下的原铝产能淘汰率设置为外生变量，铝行业碳排放目标情景下的原铝产能淘汰率设置为系统内生变量，未来受铝行业碳减排约束影响。

中国碳达峰行动方案提出，到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上，本文据此预测未来全国铝行业碳排放目标控制总量，在原铝产能淘汰率为内生变量的情况下，根据铝行业未来碳排放目标控制总量与铝行业实际排放量的差距计算需要淘汰的产能，如公式(1)所示。

$$E_{R,PA} = (D_{TA} \div C_{ET,PA}) \div Q_{PA} \tag{1}$$

其中， $E_{R,PA}$ 表示产能淘汰要求， D_{TA} 表示碳排放差值， $C_{ET,PA}$ 表示单吨火电铝碳排放量， Q_{PA} 表示

原铝产能。

2. 粗镓供需子系统

本文所构建的粗镓供需子系统如图 5 所示。近年来, 中国镓产量占全球镓产量的 98%左右, 因此, 为了分析中国镓资源的持续供给能力, 假设未来全球的镓需求仍然主要由中国满足, 将国外粗镓供给量作为外生变量, 使其按历史趋势保持缓慢增长。

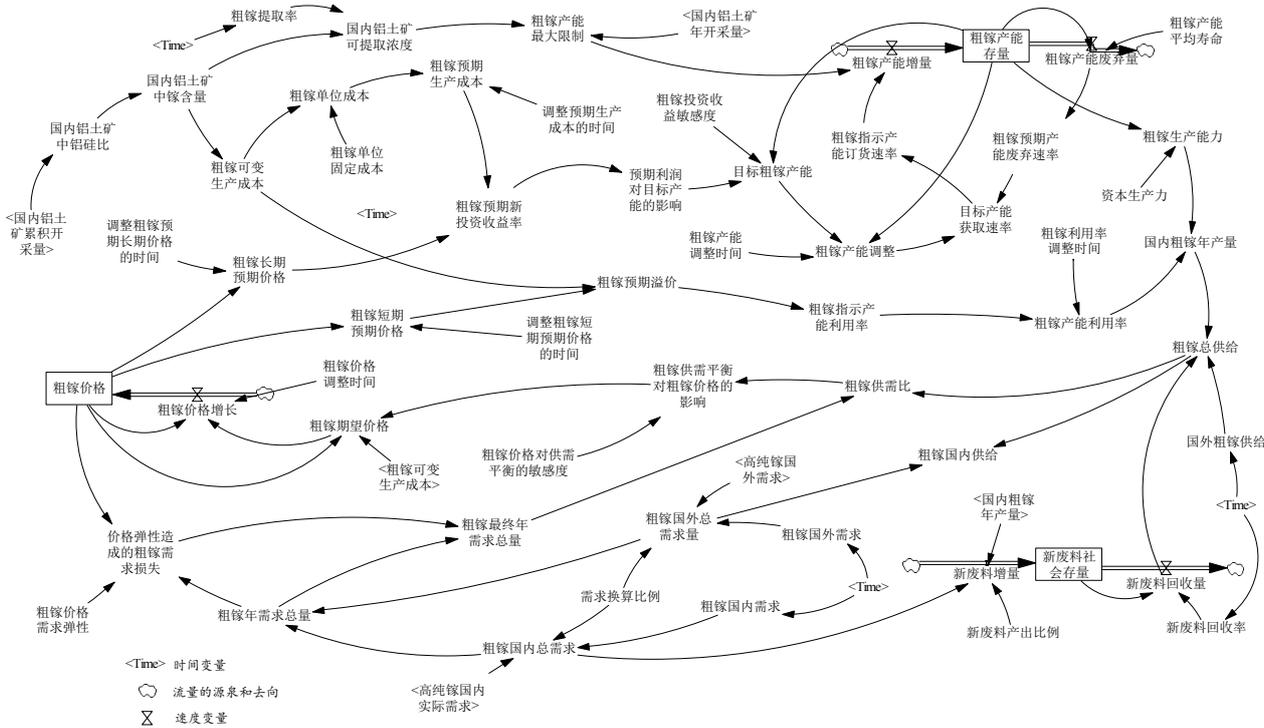


图 5 粗镓供需子系统模型

中国原生粗镓产量受铝土矿开采量的影响: 一是铝土矿开采量决定了镓的供给上限, 在模型中体现为粗镓产能最大限制。二是用于衡量国内铝土矿资源品位的铝硅比(A/S)的高低对氧化铝的生产成本影响很大。运用“品位-能源”模型^[26], 假设铝土矿中铝和镓品位正相关, 即可得出中国铝土矿中镓品位的变化趋势, 如公式(2)所示。

$$A_{SR} = 6.988 - 2.831 \times 10^{-5} \times C_B \tag{2}$$

其中, A_{SR} 表示中国铝土矿铝硅比, C_B 表示中国铝土矿累积开采量。

中国原生粗镓产量同时要受市场机制调节, 生产者会根据实际的市场情况通过调整产能和产能利用率来控制粗镓产量。相关量化方程如公式(3)至公式(5)所示:

$$R_{ENI, LG} = (P_{LE, LG} - C_{E, LG}) \div P_{LEP, LG} \tag{3}$$

$$R_{TCA} = \max \{0, R_{ECA} + Q_{L, LG}\} \tag{4}$$

$$Q_{I, LG} = \min \{Q_{UL, LG}, \max \{0, R_{ICO, LG}\}\} \tag{5}$$

其中, $R_{ENI, LG}$ 表示粗镓预期新投资收益率, $P_{LE, LG}$ 表示粗镓长期预期价格, $C_{E, LG}$ 表示粗镓预期生产成本, R_{TCA} 表示目标产能获取速率, R_{ECA} 表示粗镓预期产能废弃速率, $Q_{A, LG}$ 表示粗镓产能调整,

$Q_{I,LG}$ 表示粗镓产能增量, $Q_{UL,LG}$ 表示粗镓产能最大限制, $R_{ICO,LG}$ 表示粗镓指示产能订货速率。

再生镓有新废镓和旧废镓两个来源。镓在制作过程中有较大的损耗, 因此可以从生产过程产生的废料中回收新废镓, 经过提纯得以再次利用, 如公式(6)所示。由于终端产品难以拆卸, 与制造生产过程中废料中的镓含量相比, 报废终端产品的镓含量微乎其微, 本文不考虑旧废镓的回收。

$$G_{GNS} = \min\{Q_{CP,LG}, Q_{TD,LG}\} \times R_{GNS} \tag{6}$$

其中, G_{GNS} 表示新废料增量, $Q_{CP,LG}$ 表示中国粗镓年产量, $Q_{TD,LG}$ 表示中国粗镓总需求, R_{GNS} 表示新废料产出比例。

3. 高纯镓供需子系统

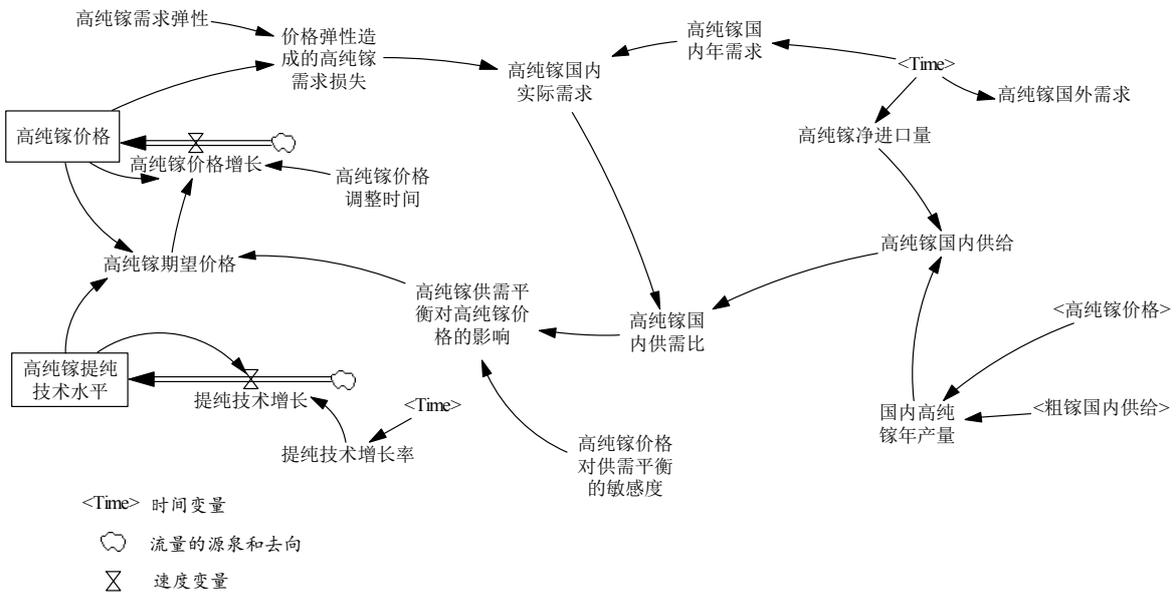


图6 高纯镓供需子系统模型

中国高纯镓供给主要受到需求、价格、提纯技术水平的影响。当前中国高纯镓核心技术发展不足, 在提炼 7N 及以上纯度的金属镓方面存在技术欠缺, 提纯技术得到一定程度的提高能够促进生产者扩建产能、增加产量^[27]。在本文中, 高纯镓产量主要受价格影响, 以国内粗镓供给为上限, 如公式(7)所示。

$$Q_{DP,LG} = \min\{S_{D,LG}, 283.618 - 1.062 \times P_{HG} + 0.001 \times P_{HG}^2\} \tag{7}$$

其中, $Q_{DP,LG}$ 表示国内高纯镓年产量, $S_{D,LG}$ 表示中国粗镓供给量, P_{HG} 表示高纯镓价格。

本文根据已有研究^[21]设定 2022 年中国镓消费量和国外镓消费量, 并根据从人均国内生产总值、《世界能源展望》报告和行业报告中获得的数据预测各个领域在 2023—2060 年各年份的需求量(作为消费量预估值), 计算得出年均增长率均为 6%左右, 与王昶等^[15]、Løvik 等^[21]和 Song 等^[28]的研究相比, 是一个较为适中的值。

粗镓价格和高纯镓价格会分别对粗镓需求和高纯镓需求产生影响, 中国高纯镓的实际需求是考虑价格后的预期高纯镓需求, 如公式(8)~(10)所示, 粗镓需求同理。

$$R_{SD,HG} = S_{D,HG} / D_{DA,HG} \tag{8}$$

$$I_{SDP,HG} = (1 / R_{SC,HG})^{S_{SDB,HG}} \tag{9}$$

$$D_{DC,HG} = D_{DHG} - D_{PL,HG} \tag{10}$$

其中, $R_{SD,HG}$ 表示高纯镓国内供需比, $S_{D,HG}$ 表示高纯镓国内供给, $D_{DA,HG}$ 表示高纯镓国内实际需求, $I_{SDP,HG}$ 表示高纯镓供需比对高纯镓价格的影响, $R_{SD,HG}$ 表示高纯镓国内供需比, $S_{SDB,HG}$ 表示高纯镓价格对供需平衡的敏感度, $D_{DC,HG}$ 表示中国高纯镓实际需求, D_{DHG} 表示中国高纯镓年需求, $D_{PL,HG}$ 表示价格弹性造成的高纯镓需求损失。

三、模型验证与情景设置

(一) 模型检验

本文选取原铝产量、中国粗镓产量指标为历史值检验变量, 比较 2010—2022 年的历史值与模型的模拟值, 进行模型历史值检验, 检验结果如图 7(左)所示。通过数据对比, 可以发现模拟值和历史值偏差较小, 趋势较为一致。选取中国铝需求、中国高纯镓需求两个变量为极端值检验变量, 将中国铝需求趋势、中国高纯镓需求趋势分别设置为无穷大, 对模型进行仿真, 模拟结果如图 7(右)所示。在需求持续上升的极端情况下, 供需比下降, 逐渐趋于零。

以上仿真结果与实际情况相符, 因此本文所建立的 SD 模型通过了历史值检验、极端条件检验。

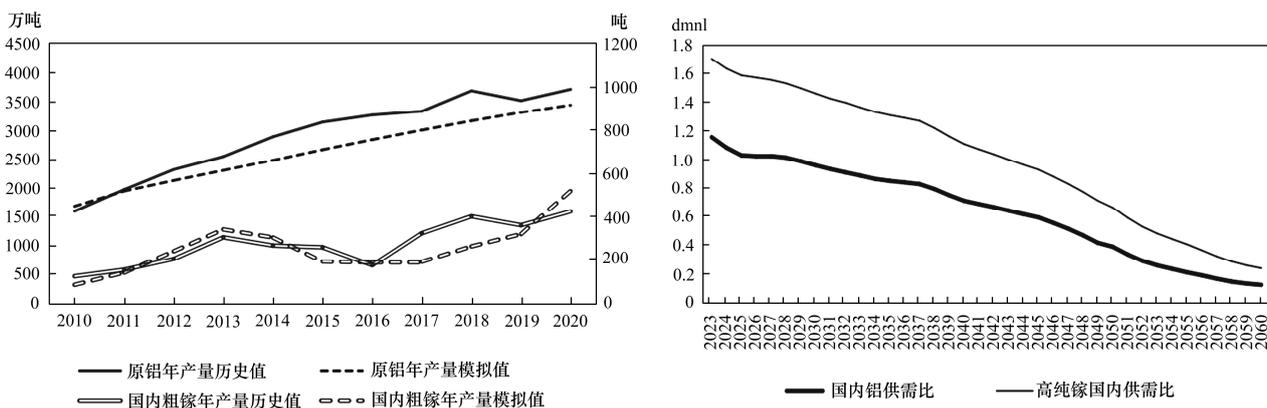


图 7 历史值检验(左)及极端值检验(右)

(二) 情景设置

参考本文第二节第二小节进行情景设置, 情景设置分为三个部分: 镓需求情景设置、镓供给情景设置、措施情景设置。在情景设置中, 选取铝清洁生产技术、再生铝回收率、粗镓提取率、镓提纯技术、镓回收利用技术、镓终端应用需求作为主要参数, 而铝土矿资源品位、粗镓生产成本、市场价格、镓价值链地位等因素被视为系统内生变量。由于中国镓储量较多, 本文未将镓储量作为影响因素纳入模型。

1. 供需情景设置

为了对中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展趋势进行预测, 本文设置了不同供需情景, 如表 2 所示。通过改变终端应用需求设置两种镓需求情景; 分别不改变相关变量、改变铝行业减排目标变量、改变再生铝回收率变量, 设置三种供给情景。

2. 保障路径情景设置

铝清洁生产技术、粗镓提取技术、高纯镓技术和新废镓回收率是中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的重要外部变量。为了评估这些因素对二者协同发展的影响程度, 本文将 4 种保障路径分别设计成低水平和高水平 2 种模式, 如表 3 所示。

表2 供需情景设置及描述

情景分类	情景名称	情景描述	具体情景设置
镓需求情景	既定政策情景(D1)	传统领域及清洁能源领域对镓的需求保持低速增长	参考国际能源署 ^[29] 发布的《2021 世界能源展望》报告, 在镓需求侧设置两种情景: 既定政策情景(D1)和可持续发展情景(D2), 测算 D1 和 D2 下未来 40 年中国及其他国家在清洁能源领域中镓的需求量, 在此基础上加上传统领域对镓的需求量, 将总需求量作为系统外生变量输入系统进行模拟
	可持续发展情景(D2)	传统领域对镓的需求保持低速增长, 而清洁能源领域对镓的需求高速增长	
镓供给情景	基准供给情景(S1)	原铝行业按照现有能源结构和生产方式进行生产, 并且不受碳排放目标约束, 中国原生镓供给来源充足	原铝产能淘汰率, 在 2010—2016 年、2023—2060 年期间设为 0.018, 在 2017—2022 年期间设为 0.036
	铝行业碳排放目标情景(S2)	铝土矿未来开采量在碳减排局面下受到约束, 中国原生镓供给随之受限	依据国务院提出的碳达峰行动方案, 分别以 2005 年和 2020 年的单位国内生产总值二氧化碳排放为基准值, 测算 2025 年和 2030 年的全社会总碳排放量目标, 以占全社会总碳排放量目标 5% 的比例作为铝行业碳排放量目标值, 按照该碳排放目标值趋势设定 2050 年及 2060 年的铝行业碳排放量目标
	铝行业回收情景(S3)	废铝回收率未来大幅提升, 导致原铝需求降低, 铝土矿开采将减少, 对中国原生镓供给产生负面影响	设定回收再利用率低和回收再利用率高的两种再生铝回收率情景。在低回收率情景下, 铝回收再利用率呈现较缓慢的增长趋势, 其年均增长率在 6% 左右。在高回收率情景下, 铝回收再利用率呈现较快的增长趋势, 未来将达到近乎完美的回收率, 因此将 2060 年的回收率设置为 90%

表3 保障路径情景参数设置

保障路径情景设置		2023(%)	2030(%)	2050(%)	2060(%)
主矿产生产技术路径	水电铝占比不变	21	21	21	21
	水电铝占比提高	21	35	45	60
粗镓提取技术路径	粗镓提取技术不变	53	53	53	53
	粗镓提取技术提升	53	60	68	75
高纯镓技术路径	高纯镓技术水平不变	0	0	0	0
	高纯镓技术水平提升	0	3	4	5
回收路径	新废镓回收率不变	42	42	42	42
	新废镓回收率提高	42	60	70	90

中国吨铝碳排放较高的原因在于煤电占比高。因此, 促进水电等清洁能源发展以代替火电是降低中国铝行业碳排放的重要途径, 能够一定程度地解决铝土矿未来开采量受到限制的问题。中国铝清洁生产主要技术以水电铝为主, 且水电铝技术较其他清洁能源技术更加完善, 因此用水电铝占比的改变来衡量中国铝清洁生产的变化程度。在粗镓提取技术路径中, 目前主要有电解法、有机溶剂萃取法和离子交换树脂吸附法等, 这些方法的改进或新技术的产生能够使镓提取率进一步提高。在高纯镓技术路径中, 当高纯镓技术获得突破时, 高纯镓的价值链地位和价格会上升, 产量会提高。最后, 提高新废镓回收率对于提升中国镓资源供给能力具有重要作用。

四、结果与讨论

本文结果主要分为两个部分。首先, 给出中国镓资源供给能力在主矿产减排及回收情景下的变化结果, 并分析中国镓资源在未来清洁能源不同发展情景下的需求趋势, 以刻画中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的趋势。其次, 通过对比铝行业碳排放目标供给情景与改善措施情景, 评估主矿产铝生产技术、粗镓提取技术、镓提纯技术、镓回收利用技术的变化对保障中国镓资源可持续供给和铝减排协调发展是否有积极影响。

(一) 供需组合情景分析

在低需求情景(D1)、高需求情景(D2)下, 2050 年全球粗镓年需求总量将分别达到 4 463 吨/年和 5 464 吨/年, 2060 年全球粗镓年需求总量将分别达到 6 901 吨/年和 8 949 吨/年。基于不同供需情景的组合, 例如“S1+D1”代表供给情景 S1 与需求情景 D1 的组合, 进行以下分析。

1. 基准供给情景

基准供给情景(S1)下, 相关变量未来走势体现为图 8 中的“S1+D1”“S1+D2”两条趋势线。尽管需求不同, 粗镓供需比的趋势较为一致, 呈现出波动趋于 1 的趋势[图 8(c)]。粗镓供给量通过调整产能利用率和产能做出适应需求的变化。如图 8(c)(d)所示, 当供需比小于 1 时, 粗镓价格上升, 尽管资源品位下降导致粗镓生产成本增加, 但成本增加的速度小于价格增长的速度, 粗镓生产成本增长的部分不利效应被粗镓价格的增长抵消, 生产者有利可图, 加速建设粗镓产能, 粗镓产能利用率提高, 粗镓供需比逐渐上升。

下游产品高纯镓的生产也会影响未来的镓资源供给能力。2010—2022 年, 受中国高纯镓生产技术水平不足和高纯镓生产成本较高的影响, 中国高纯镓供给量很少, 主要依赖进口。根据模型运行结果可知, 随着高纯镓价格上升[图 8(f)], 中国高纯镓产量增加, 供需比在 1 的上下波动[图 8(e)]。

通过仿真可以发现, 基准供给情景下, 中国仍然保持着良好的镓资源可持续供给能力。

2. 铝行业碳排放目标情景

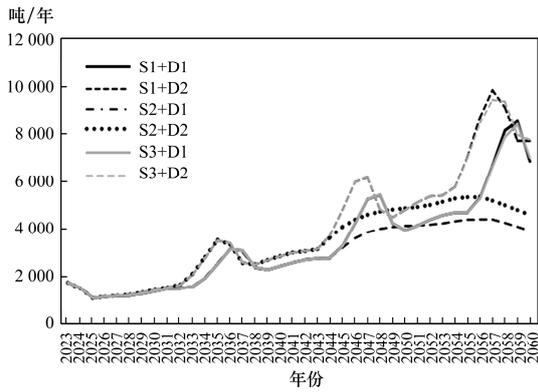
铝行业碳排放目标情景下相关变量的未来走势体现为图 8 中的“S2+D1”“S2+D2”两条趋势线。粗镓总供给的趋势在 2044 年之前与基准供给情景的趋势大致一致。2044 年之后, 粗镓总供给量逐渐偏离基准供给情景下的供给量, 在 2056 年达到峰值后下降。在这段时间内, 尽管粗镓价格因供不应求而不断上升, 但粗镓供给量并未随着供不应求的趋势继续增长, 主要是因为铝土矿开采量在碳排放环境规制下大幅减少, 抑制了粗镓产能增长, 最终造成供应短缺。粗镓价格在供不应求的长期影响下一直攀升, 远高于基准供给情景(S1)下的价格[图 8(c)]。

受粗镓供给量减少的影响, 中国高纯镓供需比从 2051 年起出现与 S1 下完全不同的趋势, 此时高纯镓需求继续增加, 因年产量不足以覆盖需求的增长, 高纯镓价格将不受控制地飙升[图 8(f)]。

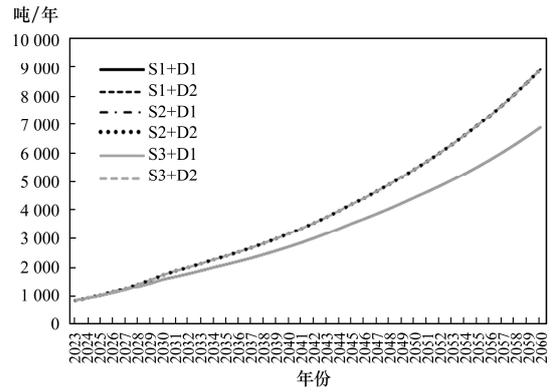
经过以上分析可知, 当以去产能、降产量的方式使铝行业达到未来的碳排放目标时, 会对中国镓资源可持续供给能力产生较大的负面影响, 导致中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的目标无法实现。

3. 铝行业回收情景

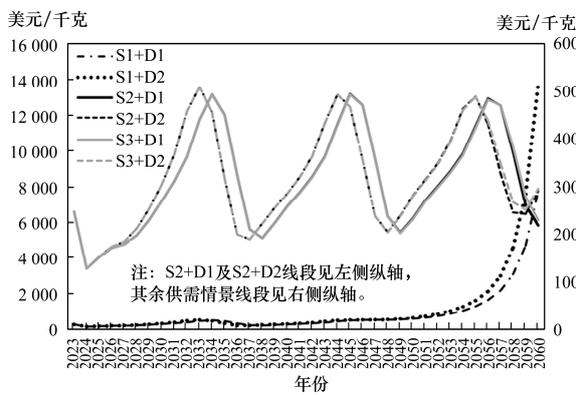
铝行业回收情景(S3)下相关变量的未来走势体现为图 8 中的“S3+D1”“S3+D2”两条趋势线。在铝回收再利用率高的情景和铝回收再利用率低的两种情景下, 原铝产量的最大差值可以达到 404 万吨/年[图 8(g)]。也就是说, 当社会上的铝回收水平较高时, 原铝可以每年减少 404 万吨的生产。与此相应, 粗镓产能最大增量限制在不同铝回收再利用率情景下的差值为 404 吨/年[图 8(h)]。然而, 如图 8(a)所示, “S1+D1”“S3+D1”情景下粗镓总供给曲线几乎重合。这说明尽管铝回收再利用率会影响



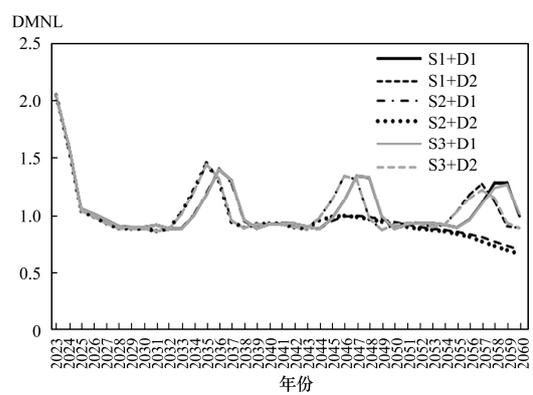
(a) 粗镓总供给量



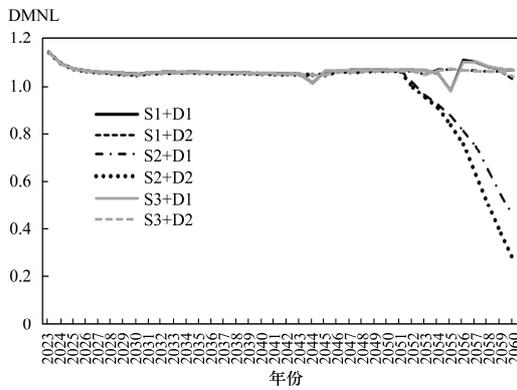
(b) 粗镓年需求量



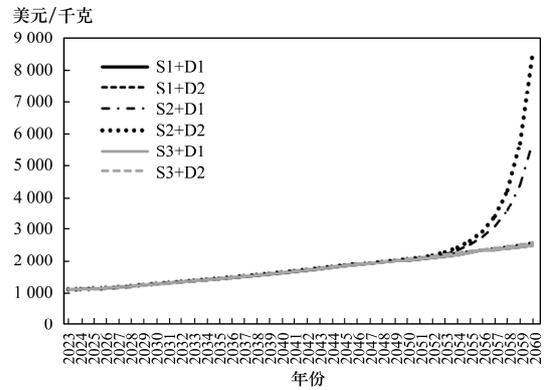
(c) 粗镓价格



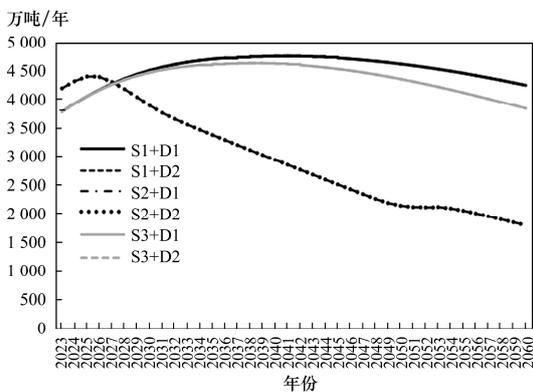
(d) 粗镓供需比



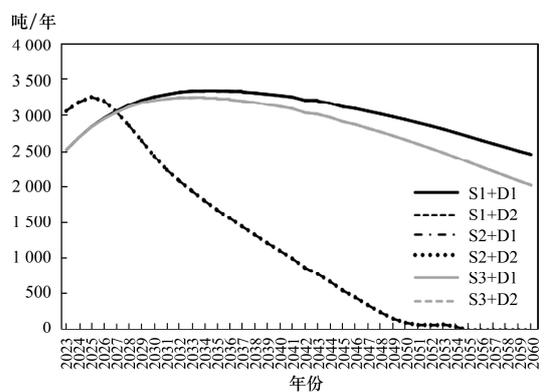
(e) 高纯镓国内供需比



(f) 高纯镓价格



(g) 原铝年产量



(h) 粗镓产能增量最大限制

图8 不同供需组合情景下中国镓资源供给能力相关变量结果

粗镓产能最大增量限制, 但是粗镓需求并不会突破铝回收导致的粗镓产能上限。而且铝回收既能减少铝行业的二氧化碳排放量, 以促进铝减排目标的实现, 也不会对镓资源可持续供给产生负面影响。

(二) 改善措施情景分析

结合以上所有的供需组合情景模拟结果, 可以发现铝行业碳排放目标情景(S2)下的镓资源可持续供给能力不足, 因此本文选取 S2+D2 供需组合情景作为对照情景, 在该对照情景下检验提高水电铝占比、提升粗镓提取技术水平、提升高纯镓技术水平、提高新废镓回收率等四种措施对中国镓资源可持续供给能力的影响效果, 措施情景设置及描述如表 4 所示。

表 4 措施情景设置及描述

措施情景分类	措施情景代号	措施选取
单项措施情景	M1	提高水电铝占比
	M2	提升粗镓提取技术水平
	M3	提升高纯镓技术水平
	M4	提高新废镓回收率
组合措施情景	M5	提高水电铝占比, 提升粗镓提取技术水平
	M6	提高水电铝占比, 提升高纯镓技术水平
	M7	提高水电铝占比, 提高新废镓回收率
	M8	四种措施同时实施

(1) 单项措施情景运行结果

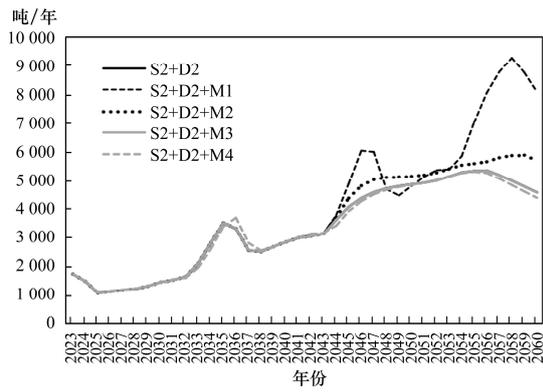
无论是从短期还是长期来看, 提高水电铝占比在提高镓资源可持续供给能力方面都具有较好的效果, 随着原铝清洁生产占比提高、碳排放约束变小, 粗镓的供给来源增加, 供不应求的局面得以缓解。

如图 9(c)所示, 粗镓提取技术水平的提升对模拟后期的粗镓价格波动具有缓解作用。2044—2056 年, 较之对照情景, 中国粗镓年产量的提高为 87~442 吨/年, 对于未来千吨级的年需求量来说, 这种改进效果并不明显, 且不持久。在铝土矿开采量严格受限的情况下, 仅仅依靠粗镓提取技术水平的提升是不够的。图 9(d)显示提升在高纯镓技术水平后, 2043—2049 年, 较之对照情景, 中国高纯镓产量有所增加, 甚至会出现供过于求的情况。由于高纯镓的产量受其价格和中国粗镓供给量的共同影响, 2050 年后中国粗镓供给量受限, 仅靠高纯镓技术水平的提高无法增加高纯镓产量。图 9(a)和图 9(f)的结果表明, 提高新废镓回收率在一定程度上可以提高镓资源可持续供给能力, 但是这种作用要基于一定量的原生镓生产。如图 9(a)(f)所示, 新废镓回收率上升带来的效益并不显著, 尤其是在原生镓供给不足时, 新废镓产生量降低, 新废镓回收量也随之降低。

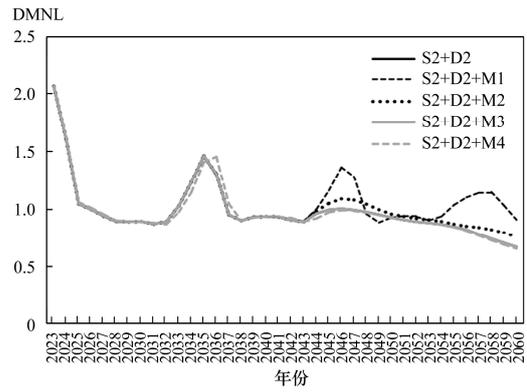
总的来说, 提高水电铝占比(M1)可以显著提高中国镓资源的可持续供给能力, 提升粗镓提取技术水平(M2)的成效次之。而提升高纯镓技术水平(M3)和提高新废镓回收率(M4)这两项措施单独实施的效果不明显, 但是与其他措施组合使用可能可以产生较好的效果, 因此本文考虑了四种组合措施情景。

(2) 组合措施情景的模拟结果

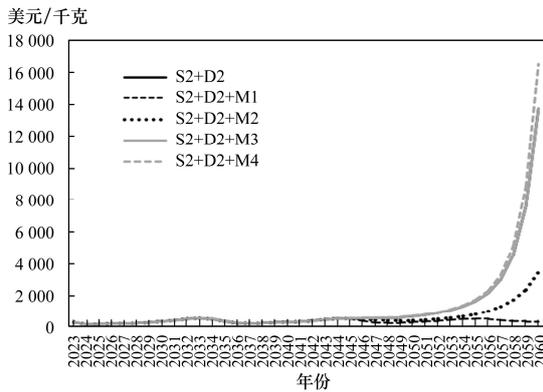
从组合措施的模拟结果可以看出, 对比单项最优措施情景(M1), 四种组合措施都能进一步提高中国镓资源的可持续供给能力。其中, 提高水电铝占比和提升粗镓提取技术水平(M5)、四种措施同时实施(M8)这两种组合措施最为有效, 能最大限度地提高粗镓总供给水平、促进中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展。提高水电铝占比和提升高纯镓技术水平(M6)这项组合措施从材料角度和技术角度共同对提高高纯镓产量起到了促进作用, 但是对于提高粗镓供给量的效果不足。提高水电铝占比和提高新废镓回收率(M7)这项组合措施延后了 M4 情景下的新废镓回收量的下降转折点。提升新废镓回收效率可以有效弥补供需缺口, 但受技术、经济等因素制约, 操作难度大。



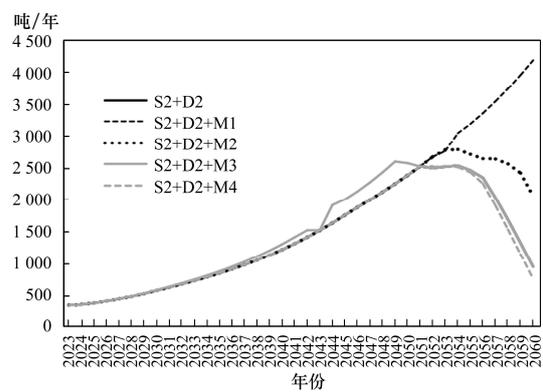
(a) 粗镓总供给



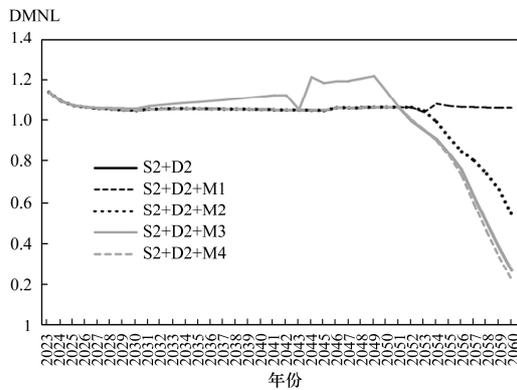
(b) 粗镓供需比



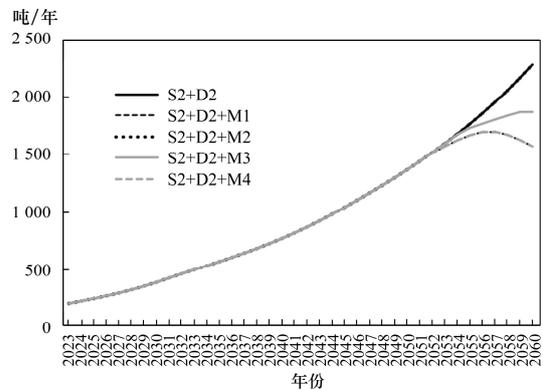
(c) 粗镓价格



(d) 国内高纯镓年产量

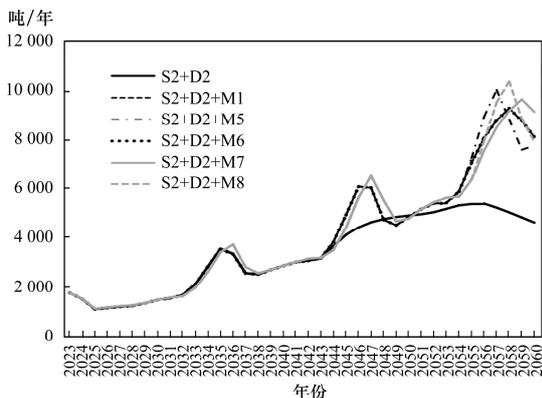


(e) 高纯镓国内供需比

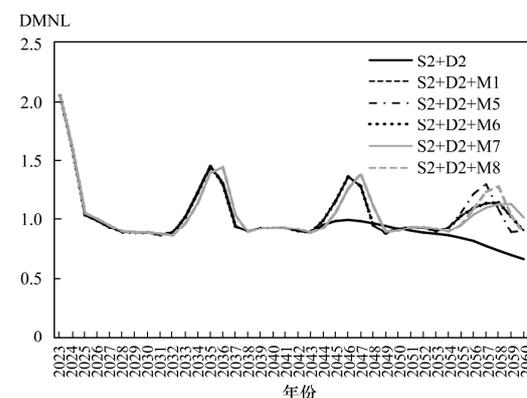


(f) 新废料回收量

图9 “S2+D2” 对照情景下的单项措施模拟结果



(a) 粗镓总供给



(b) 粗镓供需比

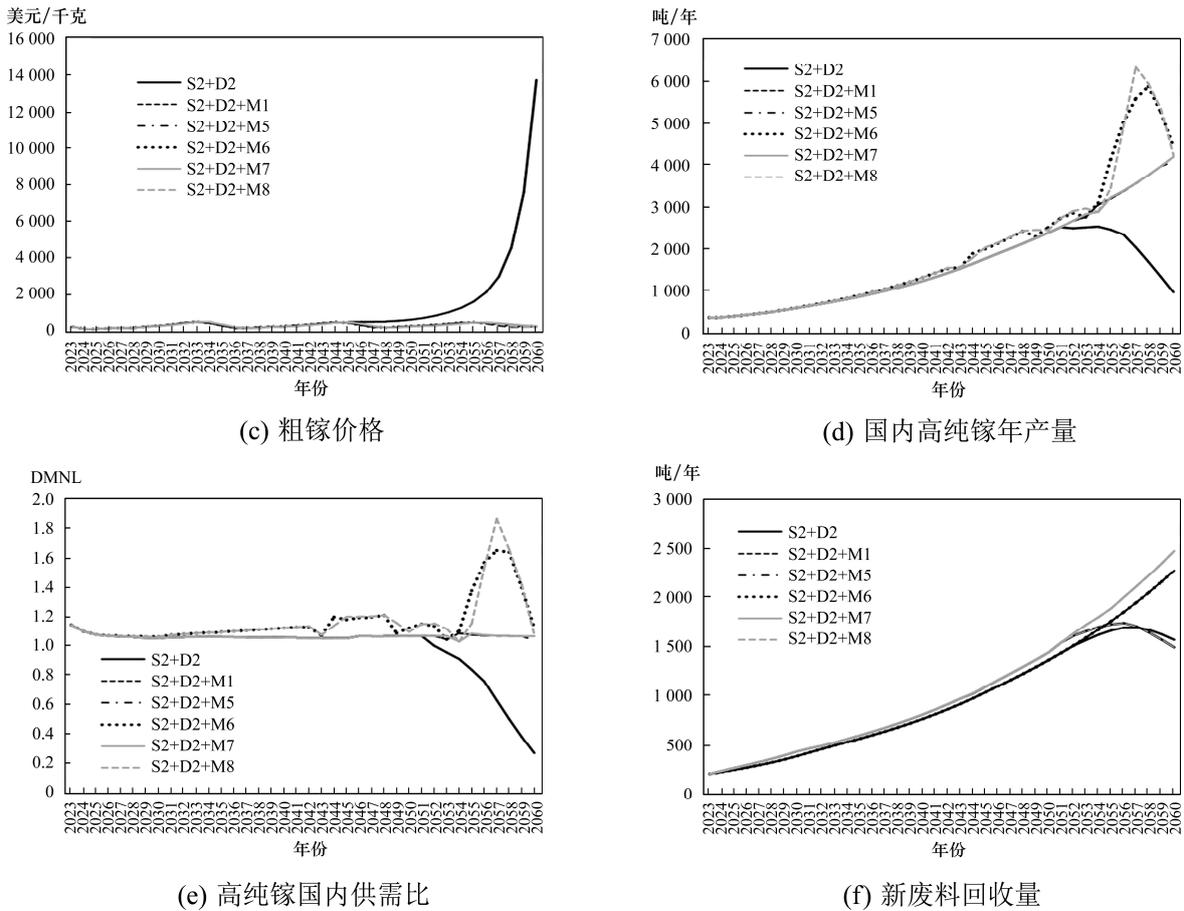


图 10 “S2+D2” 对照情景下的组合措施模拟结果

五、结论与政策启示

终端应用需求的增长给中国镓资源供应链带来了需求冲击, 同时中国铝业的碳排放问题加剧了中国原生镓的可持续供给风险。本文通过设定两种需求情景和三种供给情景来模拟中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的趋势, 动态分析中国镓资源的可持续供给能力, 并检验提高水电铝占比、提升粗镓提取技术水平、提升高纯镓技术水平、提高新废镓回收率四种措施对中国镓资源的可持续供给能力的影响。通过仿真可以得出以下结论: 当中国原铝产业不受碳排放目标约束或社会铝回收水平较高时, 在既定需求情景和清洁能源发展需求情景下, 中国镓产业链都占据优势地位, 具有良好的可持续供给能力。然而, 当中国原铝产业受碳排放目标的约束时, 中国镓资源的可持续供给能力在未来有下降趋势。在单项措施方面, 提升水电铝占比是最为有效的措施; 在组合措施方面, 同时提高水电铝占比和粗镓提取率最为有效。

通过仿真模拟改善措施情景下中国镓资源可持续供给和铝减排协同发展的趋势, 本文提供以下政策启示。

- (1) 在制定铝减排等相关政策时, 需要考虑铝-镓共伴生的特殊生产关系, 镓在清洁能源和促进碳减排上能够发挥正向的作用, 但镓的生产又受到主金属铝产量的影响。因此需要权衡铝生产带来的负向影响和镓生产带来的正向影响, 做到先立后破, 优先改进提升碳减排的手段, 最后考虑消减产量。
- (2) 提升水电铝占比是保障镓资源持续供应的有效措施, 因此要大力推行主矿产铝的清洁能源生产方式, 不断用清洁能源生产方式代替火电生产, 这需要国家的政策支持和有针对性的实施方案的引

导。要针对水电生产形成合理的电价体系,鼓励企业制订清洁生产改造提升计划,创新清洁生产推行模式,推动水电生产示范基地建设。除了水电生产之外,运用其他清洁能源发电同样值得大力推广。

(3) 目前影响中国粗镓等伴生矿产提取率提高的因素有技术因素和成本因素。因此,需要加大对伴生矿产的分离提取技术研发的投资力度,促进高校、企业和政府的合作,开发高效低损耗的提取技术,提高伴生矿产的提取率。同时,在伴生生产上,给予企业一定的成本补贴,以提升伴生生产给企业带来的经济效益,提高企业伴生生产的主观能动性。

(4) 鼓励伴生矿产资源的二次回收利用。提高粗镓的回收再利用率可以在一定程度上增加粗镓供给量,改变粗镓在铝减排背景下供不应求的状况。首先,应该建立伴生矿产产业链全生命周期的生产追溯机制,加强对生产制作过程和报废后回收的管理,提升回收管理系统的效率。其次,可以提高对资源循环利用的补贴,对从生产制造过程或终端报废产品中提取伴生矿产资源的企业给予一定补贴,促进企业二次利用的积极性。

参考文献:

- [1] 陈从喜,张雅丽,孙春强,等. 战略性矿产概念和矿种目录的国际比较研究[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 87-98.
- [2] ZHOU Y, LI J, RECHBERGER H, et al. Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050[J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 263: 121599.
- [3] 黄健柏,孙芳,宋益. 清洁能源技术关键金属供应风险评估[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1477-1488.
- [4] CRISTOBAL J, JUBAYED M, WULFF N, et al. Life cycle losses of critical raw materials from solar and wind energy technologies and their role in the future material availability[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104916.
- [5] ZHANG L, CHEN Z, YANG C, et al. Global supply risk assessment of the metals used in clean energy technologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331: 129602.
- [6] 邵留国,蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1452-1463.
- [7] 宋国君,王语苓,姜艺婧. 基于“双碳”目标的碳排放控制政策设计[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 55-63.
- [8] 张瑜,孙倩,薛进军,等. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(5): 1-13.
- [9] 严刚,郑逸璇,王雪松,等. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 309-319.
- [10] EHELIYAGODA D, LI J, GENG Y, et al. The role of China's aluminum recycling on sustainable resource and emission pathways[J]. *Resources Policy*, 2022, 76: 102552.
- [11] 王丽娟,邵朱强,熊慧,等. 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 377-384.
- [12] YU B, ZHAO Z, ZHANG S, et al. Technological development pathway for a low-carbon primary aluminum industry in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 173: 121052.
- [13] LI S, ZHANG T, NIU L, et al. Analysis of the development scenarios and greenhouse gas (GHG) emissions in China's aluminum industry till 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125859.
- [14] 宋慧玲,王智源,周思源. 大国竞争背景下伴生能源金属可持续供给研究综述[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 99-111.
- [15] 王昶,宋慧玲,左绿水,等. 中国优势金属供应全球需求的风险评估[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1218-1229.
- [16] FRENZEL M, MIKOLAJCZAK C, REUTER M A, et al. Quantifying the relative availability of high-tech by-product metals: The cases of gallium, germanium and indium[J]. *Resources Policy*, 2017, 52: 327-335.
- [17] CAMPBELL G A. The role of co-products in stabilizing the metal mining industry[J]. *Resources Policy*, 1985, 11(4): 267-274.
- [18] SVERDRUP H U, RAGNARSDOTTIR K V, KOCA D. An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: Security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity[J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 140: 359-372.
- [19] 成金华,易佳慧,吴巧生. 碳中和、战略性新兴产业发展与关键矿产资源管理[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 135-142.

- [20] 敦妍冉, 荆海鹏, 洛桑才仁, 等. 全球镓矿资源分布、供需及消费趋势研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 9–15, 25.
- [21] LØVIK A N, RESTREPO E, MÜLLER D B. The global anthropogenic gallium system: Determinants of demand, supply and efficiency improvements[J]. *Environmental science & technology*, 2015, 49(9): 5704–5712.
- [22] LØVIK A N, RESTREPO E, MÜLLER D B. Byproduct metal availability constrained by dynamics of carrier metal cycle: The gallium–aluminum example[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(16): 8453–8461.
- [23] 左绿水, 王昶. 面向新能源汽车的关键高技术矿产循环利用潜力评估与开发策略[J]. 国土资源情报, 2020(10): 12–20.
- [24] 卢浩浩, 王婉君, 代敏, 等. 中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析及减排对策[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 451–462.
- [25] IAI. Sustainable Bauxite Mining Guidelines Second Edition. 2022.
- [26] DAI M, WANG P, CHEN W Q, et al. Scenario analysis of China's aluminum cycle reveals the coming scrap age and the end of primary aluminum boom[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 226: 793–804.
- [27] 宋益, 白文博, 成金华, 等. 技术创新对清洁能源金属可持续供应影响的研究综述与展望[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 112–125.
- [28] SONG H, WANG C, SEN B, et al. China Factor: Exploring the byproduct and host metal dynamics for gallium–aluminum in a global green transition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2699–2708.
- [29] NEWELL R, RAIMI D, VILLANUEVA S, et al. Global energy outlook 2021: Pathways from Paris[J]. *Resources for the Future*, 2021, 8: 39.

Research on the collaborative development path of China's gallium resource sustainable supply and aluminum emission reduction under the mechanism of byproduct

SHAO Liuguo^{1,2}, LI Yiyao¹, LAN Tingting¹

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By analyzing the main metal production mechanism, by-product metal production mechanism and main-byproduct mineral market linkage mechanism between aluminum and gallium, this paper anatomizes the influencing factors of the collaborative development of the gallium resources sustainable supply and China aluminum emission reduction from the perspectives of resources, technology, market, environment and demand, and constructs a system dynamics simulation model to study the guarantee path of collaborative development of gallium sustainable supply capacity and China aluminum emission reduction under different supply and demand scenarios and measures scenarios. When China's primary aluminum industry is not constrained by the carbon emission target or the recycling level is high, China's gallium resource has a good sustainable supply capacity under the given demand scenario and the clean energy development demand scenario, otherwise, the sustainable supply capacity will decline. In terms of the path selection to ensure the China gallium resources sustainable supply, if a single measure is taken, it is the most effective to increase the proportion of hydropower aluminum. If a combination of measures is taken, it is most effective to increase the crude gallium extraction rate while increasing the proportion of hydropower aluminum.

Key words: strategic minerals; resource security; by-product production mechanism; carbon reduction; gallium

[编辑: 郑伟]