

基于 P-TRM 的中国稀土产业技术创新的政策演化路径研究

王昶¹, 刘雅琳¹, 耿红军¹, 左绿水²

(1.中南大学商学院, 湖南长沙, 410083;
2.中南大学公共管理学院, 湖南长沙, 410083)

摘要: 稀土被称为“工业维生素”, 已成为全球各国资源争夺和技术竞争的焦点。我国是稀土资源大国, 政府高度重视稀土产业技术创新, 出台了系列创新政策以推动中国从稀土大国向稀土强国转变。收集 1978—2021 年国家层面颁布的 63 份与稀土产业相关的创新政策文本, 结合内容分析法, 构建政策-技术路线图(P-TRM)分析框架, 剖析稀土产业技术创新的政策演化历程与路径。研究发现: 从创新政策工具来看, 稀土产业创新政策工具呈现出进入阶段以结构型创新政策工具为主, 到逐步追赶阶段结构型与功能型创新政策工具同时发力, 再到跨越阶段由功能型创新政策工具占据主导的演进趋势; 从政策作用技术环节来看, 从进入阶段主要发力于原材料制备技术, 到逐步追赶阶段聚焦关键部件加工和终端产品制造技术, 最后跨越阶段延伸到废弃产品循环利用技术, 呈现出从关注单一技术环节到全技术链的演进趋势; 从政策演化路径来看, 稀土产业创新政策随着稀土产业创新生态的演变而变化, 不断完善稀土产业创新生态系统, 促进稀土全产业链技术的创新。最后, 针对中国稀土产业技术创新政策的优化提出政策建议。

关键词: 稀土产业; 政策-技术路线图; 技术创新; 政策演化路径

中图分类号: F426

文献标识码: A

文章编号: 1672-3104(2023)03-0089-13

一、引言

被称为“工业维生素”的稀土, 被广泛应用于智能制造、新材料、新能源等战略性新兴产业, 是全球各国资源争夺和技术竞争的焦点。虽然稀土相较大宗矿产来说体量较小, 产业链较长且产值不高, 但由于其在众多战略领域的广泛应用, 战略价值较高, 美国、欧盟和日本等几大主要经

济体相继出台政策将稀土纳入国家战略资源储备^[1]。中国是稀土资源大国, 稀土储量、产量、消费量和出口量均居全球第一, 拥有最完整的稀土产业链^[2]。但长期以来, 中国稀土产业技术优势集中在产业链的上游和中游, 下游缺乏技术核心专利^[3]。中国政府对此高度重视, 于 1978 年成立了全国稀土推广应用办公室, 并出台了系列政策以推动稀土产业技术创新突破。

关于稀土政策如何影响稀土产业发展的问

收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2023-01-20

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“智能制造关键新材料创新突破的国家战略研究”(18ZDA061); 国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源供给安全与管理政策研究”(71991482); 国家自然科学基金项目“清洁能源技术关键伴生金属可供性约束机制、趋势及干预路径研究”(42071276); 教育部人文社科研究青年基金项目“大国竞争背景下我国稀土产业关键核心技术创新突破路径与政策研究”(21YJC630187); 湖南省自然科学基金项目“任务导向型创新政策对关键共性技术创新的作用机制及影响效应”(2022JJ30056)

作者简介: 王昶, 男, 湖南怀化人, 中南大学商学院教授、博士生导师, 主要研究方向: 创新战略与政策, 联系邮箱: changwang@csu.edu.cn; 刘雅琳, 女, 湖南娄底人, 中南大学商学院硕士研究生, 主要研究方向: 技术创新与政策; 耿红军, 男, 山东聊城人, 中南大学商学院博士研究生, 主要研究方向: 科技政策与创新管理; 左绿水, 女, 湖南娄底人, 中南大学公共管理学院副教授, 主要研究方向: 技术创新与政策、资源管理与政策

题,学术界主要从政策演化和政策影响效应两个方面展开研究。关于稀土政策演化的探讨,主要聚焦于稀土产业政策的演进历程及演化路径,较多采用质性方法来梳理:杨丹辉围绕稀土产业发展的战略目标探讨稀土政策的演化,从储备、环保、财税、产业和贸易政策五个维度构建稀土产业的政策体系^[4];王昶等采用扎根理论方法建构出中西方稀土战略调整演化路径模型,并基于此模型来研究中国稀土政策的演化历程^[5];Yuzhou Shen等采用文本分析法,将1975—2018年中国稀土产业政策分为五个阶段并对此进行了总结和评价^[6]。苏利平等以改革开放40年以来我国颁发的重要稀土产业政策文本为依据,从稀土资源开发、资源保护性利用、环境保护、资源国际贸易政策、应用技术政策等五个角度分析稀土产业政策的政策内涵以及演进趋势^[7];周美静等梳理了中国稀土政策的演进历程,并对政策演进的成因、机制及优化方向进行了剖析^[8]。关于稀土政策影响效应的研究,学界主要关注政策对稀土产业或供应链弹性的影响,大多数研究者是通过构建分析模型或从系统动力学视角来检验和分析稀土政策的影响效应:马乃云等通过构建稀土出口市场势力分析模型对中国稀土财税政策进行了实证检验^[9];何欢浪等构建了双重差分模型来评估中国稀土产品出口政策的影响效应^[10];Nabeel等从系统动力学理论出发,探究中国稀土政策对供应链弹性的影响^[11]。

总而言之,现有稀土政策研究大多关注与稀土生产、环境和贸易等相关的产业政策,在稀土产业政策的演进和效应方面取得比较丰富的成果,但针对稀土创新政策的研究还较为欠缺。中国稀土创新政策经历了怎样的演变历程?不同阶段的创新政策呈现出何种特征?这些创新政策是如何推进稀土技术创新突破的?以上都是中国稀土产业政策体系研究需要解答但尚未进行系统研究的问题。

二、理论分析框架

(一) 创新政策工具选择

创新政策工具研究是决策者为了实现既定

的政策目标所采用的实践手段与方式,随着理论与实践结合的深入,创新政策工具选择成了创新政策分析的焦点^[12]。现有研究将创新政策工具分为三类:第一类是按照政策工具对技术创新影响的层面不同进行划分的,最具代表性的是Rothwell和Zegveld提出的供给面、环境面和需求面三大类^[13],刘秀玲等对此进行了补充,提出战略面、供给面、需求面、环境面和评估面等五大类创新发展政策工具^[14];第二类是按照政府对市场的介入和干预程度进行划分的,最具代表性的是Howlett提出的自愿型、强制型和混合型政策工具^[15],在此基础上Borras和Edquist进一步按功能维度将创新政策工具划分为规制型、经济转移型和软性工具,分别代表创新政策工具包含的“大棒”“胡萝卜”和“非强制性管理”三种角色^[16-17];第三种是从技术创新视角出发进行划分的,最具代表性的是Loomis和Helfand按照创新系统演化的功能将创新政策划分为研发刺激、创新瓶颈突破、技术传递转移和系统创新政策工具^[18-19]四类。

系统失灵理论认为,创新政策实施的目的在于着力构建创新体系,克服创新系统的失灵问题^[20]。目前我国稀土产业面临复杂多变的国际竞争局势,构建一个具有竞争优势的产业创新生态系统对于我国稀土产业实现赶超、突破创新瓶颈具有至关重要的意义^[21]。因此,本文在借鉴洪勇等观点的基础上,将稀土创新政策分为结构型创新政策和功能型创新政策,前者重在完善创新生态系统结构,后者侧重于优化创新生态系统功能。两类创新政策的工具及内涵如表1所示。

1. 稀土产业关键技术识别

稀土元素的生产和流动包括采矿、选矿、冶炼、加工、制造、使用、废物管理及循环利用等环节,涉及众多关键技术,可分为原材料制备、关键部件加工、终端产品制造和废弃产品循环利用四个阶段。原材料制备包括稀土采矿、选矿、冶炼萃取等技术,关键部件加工包括稀土金属及荧光粉、抛光粉、催化剂等的生产技术,终端产品制造包括永磁电机、镍氢电池等的制造技术,废弃产品循环利用包括稀土产品使用后的废弃物处理技术和循环利用技术,具体见图1。

2. 政策-技术路线图框架

技术路线图是一种用于预测和描绘技术发展路径的工具,能够有效支持技术创新和发展战略^[24],将横轴的时间维度与纵轴的市场、产品和技术等维度相结合,能够动态地分析产业演化过程。政策-技术路线图是将政策维度纳入技术路线的分析框架中,能够更清晰地描述政策影响产业发展与创新的“间接、隐含”的机制和路径^[25]。

为研究创新政策工具对于中国稀土产业技术创新的演化路径, 本文建立了稀土产业政策-

技术路线框架图(见图 2), 从市场、产品、技术和政策四个维度对政策演化路径进行全面分析。其中, 市场维度是指稀土产业的关键市场表现, 产品维度是指具有代表性的稀土关键产品, 技术维度是指具有代表性的稀土关键技术, 政策维度是指稀土产业的创新政策工具。政府通过创新期望建立、创新主体培育、创新要素供给等举措为稀土企业进入市场、开展关键技术研发、推广新兴产品等活动保驾护航, 通过完善基础设施、设立创新制度、优化交互关系、增强创新能力等举措

表1 稀土产业创新政策工具

政策类型	创新政策工具	创新政策内涵
结构型创新政策	创新期望建立	借助产业创新规划和科技攻关计划构建稀土产业的技术创新共同期望和愿景，为企业营造良好的创新环境，引导企业开展创新活动 ^[22]
	创新主体培育	采取创新链建设和企业兼并重组的手段，降低企业进入稀土市场的门槛，降低企业开展研发活动的风险
	创新要素供给	为稀土企业提供资源，给予企业资金、人才和技术支持，激励企业进行稀土关键核心技术的研发攻关，为企业选择研发路径、增加研发投入以及加快研发进程提供保障和动力 ^[23]
	基础设施配套	采取构筑创新平台和提供科技信息服务的举措，为企业提高稀土基础性技术研发效率赋能
功能型创新政策	创新制度完善	通过完善创新政策法规和创新管理体制，为充分发挥各类创新手段提供配套政策，进一步规范稀土行业政策体系和管理机制，促进稀土创新政策系统高效运转 ^[20]
	交互关系优化	通过加强创新主体协同和创新资源开放利用，推动稀土官产学研网络与海内外合作研发机制的建立，通过价值共创实现稀土关键核心技术的攻关突破 ^[20]
	创新能力增强	通过促进技术创新能力的内化与技术链的协同发展，加强企业自主创新能力建设，由“引进—吸收—再创新”模式向自主创新模式转型 ^[20]

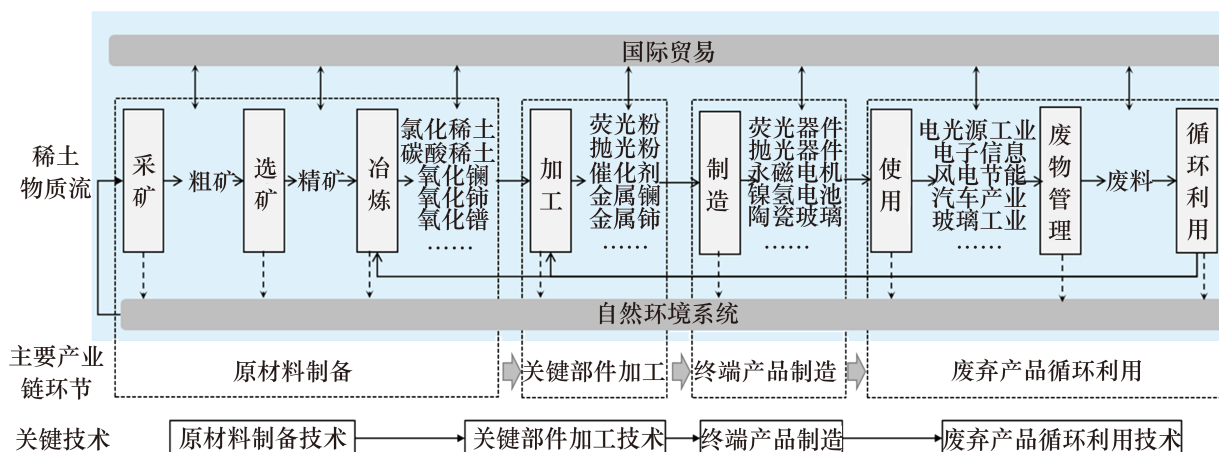


图 1 基于物质流分析的稀土产业关键技术

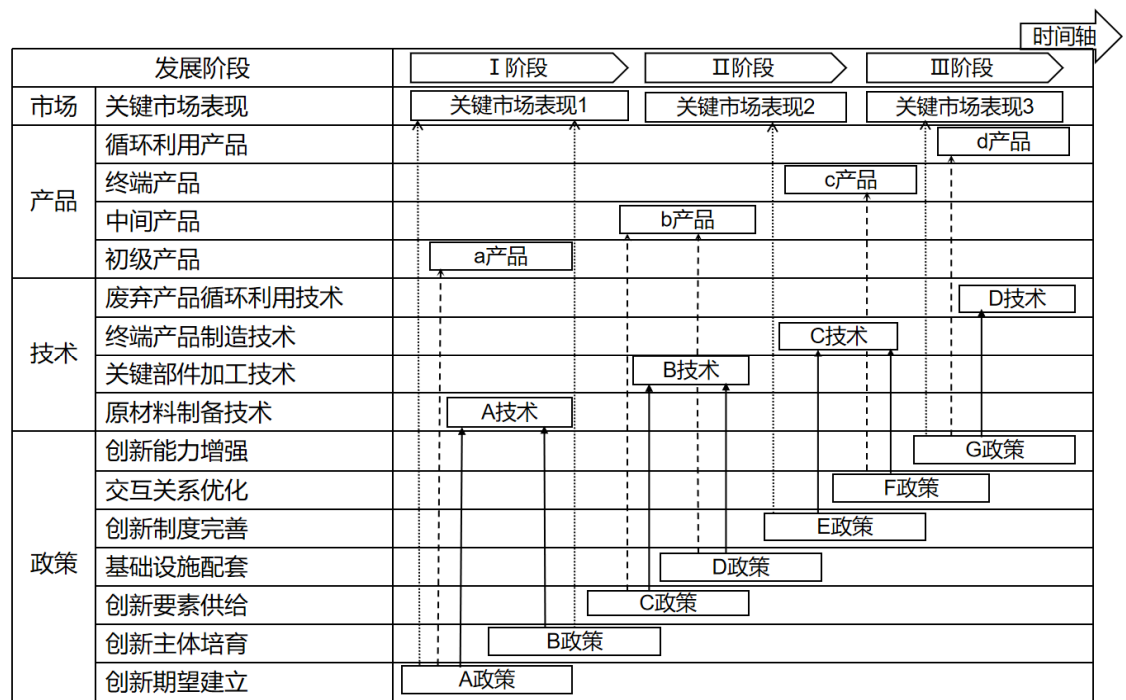


图 2 政策-技术路线(P-TRM)的分析框架图

推动稀土技术与产品创新，以刺激市场需求，促进稀土产业的良性发展。

(二) 研究设计

1. 数据来源

本文以中央层面的创新政策为研究对象，理由如下：其一，稀土是重要的战略资源，受国家管控，也是我国少数在全球拥有主导权的资源品种。中央政府针对稀土产业已出台了全面、系统的政策体系，地方政府主要是落实中央政府的政策精神。其二，本文的研究目的是探究国家层面的稀土技术创新效应，为保持研究层次的一致性，选取中央层次的政策为研究对象比较恰当。

本文选取的与稀土产业相关的政策文本主要是通过回溯、关联检索等方法从“中国政府网、工业和信息化部 and 科学技术部等中央政府相关部委网站、北大法律信息网等”进行搜集，共 130 份。文本选取以下遴选标准：①所选政策与稀土技术创新相关；②所选政策为全国性政策，由中央政府及其直属机构颁布；③所选政策类型主要包括：法律法规、规划、计划、通知、公告、措施、意见、办法等。经过遴选，本文最终确定了 63 份与稀土产业相关的创新政策文本，表 2 为部分创新政策文件示例。

2. 内容分析法及政策文本编码

本文采用内容分析法对政策文本内容进行客观系统的量化分析，并对结果加以描述和概括^[12]。稀土创新政策条例是本研究进行内容分析的基本分析单元，对所选取的 63 份创新政策文本按照“创新政策编号—章节编号—条款编号—创新政策类别编号”的逻辑进行编码，共得到 168 项，表 3 为部分创新政策文本编码示例。

3. 阶段划分

本文系统梳理了稀土产业的发展历程，识别出关键的里程碑事件(见图 3)，并借鉴 Morrison 以及 Lee 和 Malerba 提出的“标准”追赶周期^[26-27]，根据关键概念发生变化的时间节点，结合代表性政策和技术等，将稀土产业技术创新突破历程分为三个阶段：进入阶段(1978—1998 年)、逐步追赶阶段(1999—2015 年)和跨越阶段(2016 年至今)。

1978—1998 年，稀土分离技术被美、法、日等国家垄断，我国迫切需要打破发达国家的技术垄断。1978 年，原国务院副总理方毅曾七次到包头市组织稀土资源综合利用和科技攻关工作，同年全国稀土推广应用办公室成立，这标志着中央政府开始关注稀土产业技术发展。随后国家相关

表 2 1978 年至今的部分稀土创新政策文件示例

编号	发布时间(年)	政策名称	发布单位
1	1978	成立全国稀土推广应用办公室	国家经济委员会
2	1979	1979—1981 年稀土推广应用规划	国家经济委员会、国家计划委员会、科学技术委员会、冶金工业部
3	1981	“六五”科技攻关计划	国家计划委员会、国家经济委员会、科学技术委员会
4	1983	1983—1985 年稀土工业发展规划	国家经济委员会、国家计划委员会、科学技术委员会、冶金工业部
5	1985	关于对进出口产品征、退产品税或增值税报告的通知	国务院
6	1986	1986—2000 年国家科技发展规划	国务院、国家计划委员会、国家经济委员会、科学技术委员会
⋮	⋮	⋮	⋮
58	2016	稀土行业发展规划(2016—2020 年)	工业和信息化部
59	2017	“十三五”材料领域科技创新专项规划	科学技术部
60	2018	重点新材料首批次应用示范指导目录(2018 年版)	工业和信息化部
61	2019	关于促进制造业产品和服务质量提升的实施意见	工业和信息化部
62	2020	关于支持建设稀土产业知识产权运营中心	国家知识产权局
63	2021	战略性新兴产业分类与国际专利分类参照关系表	国家知识产权局

表 3 部分创新政策文本编码示例

政策工具	编号	政策类别	政策文本编码
创新期望建立	A	产业创新规划	1-1-1-A、2-1-1-A……
	B	科技攻关计划	6-2-1-B、7-2-1-B……
创新主体培育	C	创新链建设	9-3-3-C、17-3-3-C……
	D	企业兼并重组	31-4-1-D、33-4-16-D……
	E	资金支持	3-1-1-E、6-4-1-E……
创新要素供给	F	人才支持	9-3-6-F、21-5-1-F……
	G	技术支持	9-3-2-G、9-3-4-G……
基础设施配套	H	创新平台构筑	26-9-49-H、26-9-51-H……
	I	科技信息服务	9-3-1.4-I、26-9-53-I……
创新制度完善	J	创新政策法规建设	9-3-1.1-J、10-1-1-J……
	K	创新管理体制创新	7-3-1-K、9-3-1.2-K……
交互关系优化	L	创新主体协同	26-5-31-L、6-4-1-L……
	M	创新资源开放利用	9-3-5-M、12-1-8-M……
创新能力增强	N	技术创新能力内化	26-2-10-N、26-5-30-N……
	O	技术链协同发展	32-4-2-O、35-4-2-O……

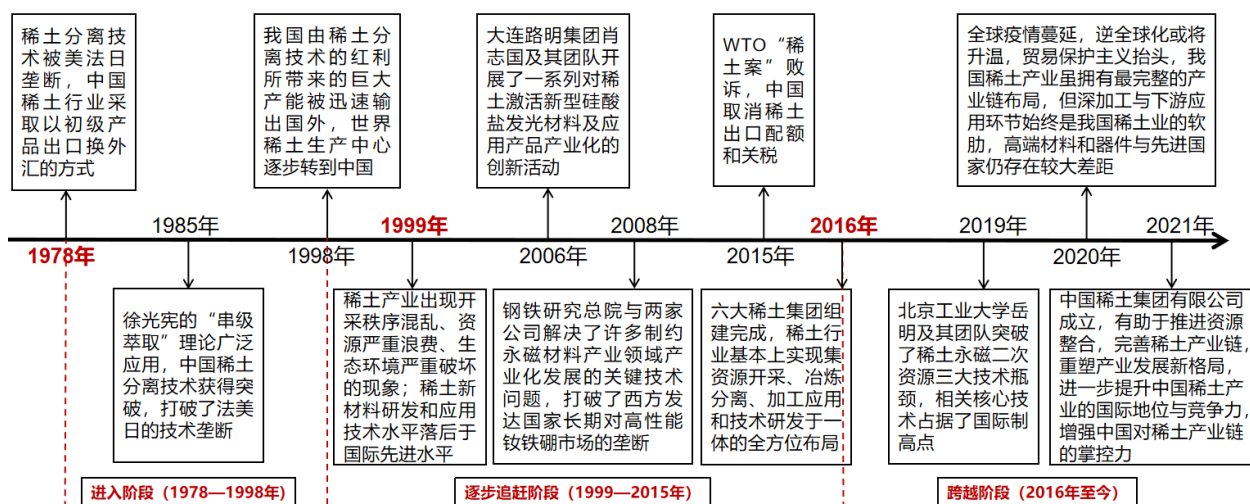


图3 中国稀土产业发展的关键里程碑事件

部委出台了《1979—1981年稀土推广应用规划》《1983—1985年稀土工业发展规划》等产业创新规划政策，以加强稀土资源的开发利用。为完成这些政策目标，国务院和相关部委于1981—1998年又重点推出“六五”科技攻关计划、《火炬计划》等科技攻关计划，这些计划主要作用于稀土生产、应用技术方面的创新突破。稀土产业由此开启了科技引领产业创新发展的进入阶段。

1999—2015年，我国的稀土产业不仅出现了开采秩序混乱、资源浪费严重、生态环境破坏严重等问题，稀土新材料研发和产品应用技术水平也落后于国际先进水平。在此背景下，国家发展计划委员会和科学技术部于1999年出台了《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南》，将稀土新材料应用纳入重点研发领域，标志着国家开始重视稀土新材料技术的创新。2010—2015年，国务院和相关部委先后出台了《关于促进企业兼并重组的意见》《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》《关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》等结构型创新政策，以加快稀土产业的转型升级。随后财务部和相关部委配套出台了《稀土稀有金属新材料研发和产业化专项》《稀土产业调整升级专项资金管理办法》等功能型创新政策，以推进稀土新材料及其器件的产业化与推广应用，稀土产业由此进入加快转型升级的创新赶超阶段。

2016年至今，我国的稀土产业面临着更加复杂多变的国际竞争局势，高端材料和器件与先进国家相比仍存在较大差距，迫切需要加强产业链后端技术的开发。国务院、工业和信息化部相继出台了《“十三五”国家科技创新规划》《稀土行业发展规划(2016—2020年)》等文件，提出了发展资源高效循环利用技术，以加快稀土产业向绿色化和智能化转型，标志着政府逐步关注稀土产业链下游的技术创新。国务院相关部委和国家知识产权局相继颁布《产业技术创新能力发展规划(2016—2020年)》《关于印发新材料产业发展指南的通知》《重点新材料首批次应用示范指导目录》等结构型和功能型创新政策。这些政策以保障稀土供应安全可靠、实现关键技术自主可控为主要目标，将包括稀土在内的关键战略材料和节能环保材料技术的研发和突破作为重点任务，稀土产业由此迈进加快实现产业安全可靠、自主可控和绿色环保的跨越阶段。

三、结果分析

根据上文建构的分析框架，我们首先从创新政策工具和稀土技术环节两个维度分析稀土产业的创新政策及其演进过程，随后结合“政策意图—政策行动机制—政策效应”逻辑脉络对稀土产业进行阶段性分析，探讨各类创新政策工具在不同发展阶段对技术创新突破的作用路径，最终

构建了中国稀土产业技术创新突破的政策-技术路线图模型。

(一) 基于政策工具与技术环节的稀土产业创新政策分析

本文从创新政策工具和稀土技术环节两个维度对稀土产业的创新政策及其演进过程进行梳理。

1. 创新政策工具分析

中国稀土产业的创新政策工具呈现出整体分布不均的状况,如图4所示,其中运用最多的是创新要素供给(25.60%)政策工具,为稀土技术发展提供了良好的资金、人才和技术支持;其次为交互关系优化(20.83%)和创新期望建立(20.24%)政策工具,大力促进了稀土产业的技术合作与研发;然后为创新制度完善(16.07%)和基础设施配套(8.33%)政策工具,一定程度上为稀土企业提高技术创新效率提供了制度和配套性服务保障;而创新能力增强(4.76%)和创新主体培育(4.17%)政策工具使用最少,对于培养稀土企业及其自主创新能力的支持度较低。

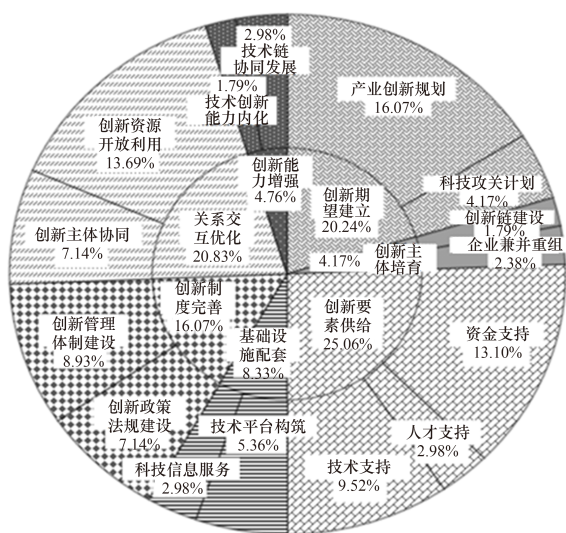


图4 中国稀土产业创新政策工具使用比例

2. 政策作用技术环节分析

从创新政策工具所作用的稀土技术环节维度来看,如图5所示,创新政策工具主要作用于原材料制备技术(27.47%)、终端产品制造技术(29.07%)和关键部件加工技术(34.13%),而对废弃产品循环利用技术(9.33%)的创新促进较少。这

符合我国稀土资源状况和阶段性发展特点,我国是稀土资源大国,更多关注原生资源的高效开发利用,而对资源的循环利用则关注较少。随着稀土产业的逐渐发展,我国稀土资源政策的关注重点也在不断向技术链后端延伸。

3. 政策工具-技术环节的演进过程分析

从稀土产业技术创新突破的政策工具-技术环节的演进来看(见图6),进入阶段的创新政策数量相对较少,为以创新期望建立和创新要素供给政策为主的结构型创新政策,聚焦于原材料的制备技术环节;逐步追赶阶段的创新政策数量迅速增加,结构型的创新期望建立、创新要素供给政策工具和功能型的创新制度完善与交互关系优化政策工具同时发力,开始较多地关注关键部件的加工技术和终端应用制造技术环节;跨越阶段的创新政策分布较为均匀,以创新期望建立和创新要素供给政策为主的结构型创新政策工具持续发挥作用,以基础设施配套和交互关系优化政策为主的功能型创新政策工具占据主导地位,且逐渐延伸至全技术链。从创新政策工具应用的演变来看,从以结构型政策为主到结构型政策与功能型政策并重,再到功能型政策占据主导;从政策作用的技术环节的变化来看,创新政策从重点作用于单一技术环节向全技术链延伸;从重视稀土原材料技术研发,到重视功能性材料和终端技术研发,最后延伸到重视循环利用技术的研发。

(二) 基于 P-TRM 的稀土产业创新政策演化路径分析

本文基于稀土技术创新阶段,借助 P-TRM 框架剖析不同的创新政策工具对稀土技术、产品和市场的演化路径,并进行图谱化展示。

1. 进入阶段(1978—1998 年)

第一,政策意图:将稀土资源优势转换为经济优势。中国是世界上最大的稀土资源国,但直到20世纪70年代,我国还只能向国外廉价出口稀土原料,然后高价进口高纯度稀土产品。由于稀土分离技术被美法日等国家垄断,我国迫切需要打破发达国家的技术垄断,将稀土资源优势转换为经济优势。上世纪80年代,我国为了尽快开发利用稀土资源,实行了“有水快流”政策。稀土产业由此进入大规模开发利用的进入阶段。

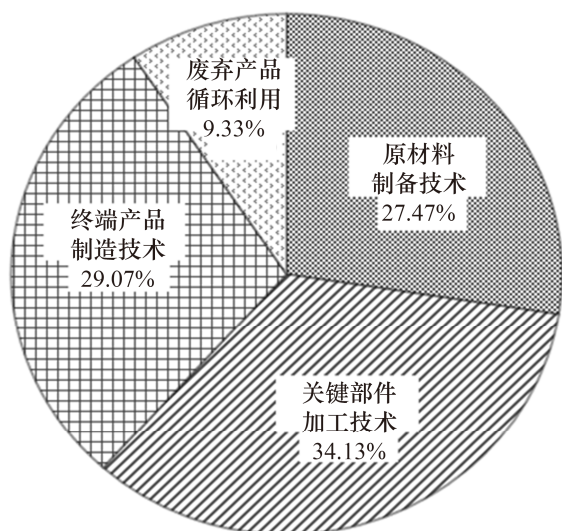


图5 稀土技术环节创新政策工具使用比例

第二，政策行动机制：实施结构型创新政策引导稀土创新生态系统构建。为推动稀土资源优势转化为经济优势，政府发挥示范引领作用，出台以创新期望建立和创新要素供给为主的结构型创新政策，通过统筹规划引导稀土企业进行创新突破，推动创新生态系统结构成型。此阶段政府通过成立全国稀土推广应用办公室，发布稀土应用推广和工业发展等一系列产业创新规划，激发稀土产业构建技术创新愿景。为实现发展规划，科学技术委员会和相关部委相应出台“六五”“七五”和“863”等科技攻关计划，对稀土生产和应用技术的科研攻关提供资助，对稀土生产企业进行技术改造，为稀土技术创新提供人财物等关键资源支持。在此背景下徐光宪团队提出串级萃取理论，并以此为指导研究出稀土萃取分离三出口工艺，极大地促进了串级萃取工艺的发展，中国稀土分离技术获得了巨大进展。作为政府引导的市场主体，稀土企业响应政府政策要求，积极推进科技成果转化和商业化应用，在稀土分离厂建设过程中广泛推广应用串级萃取理论及一步放大技术。1985年国务院对稀土开始采取出口退税政策，在该政策支持下，稀土产业由分离技术红利带来的巨大产能，迅速被输出国外。

第三，政策效应：稀土产业开采端实现技术

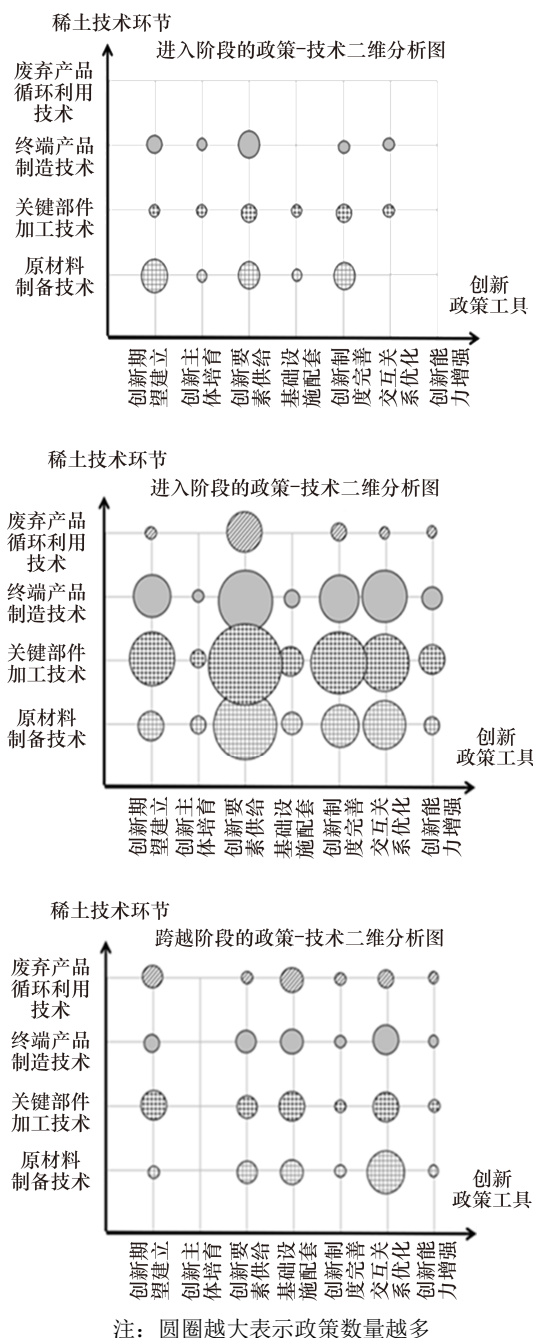


图6 中国稀土产业技术创新各阶段的政策—技术二维分析图

突破。此阶段在创新期望建立和创新要素供给等结构型创新政策工具的作用下，创新生态系统结构得到完善，创新生态系统初步形成，并侧重于稀土资源的开发及基础性技术的研发，其中徐光宪院士团队的“串级萃取理论及其应用”和“稀土萃取分离三出口工艺的进一步放大”课题分别获得1987年国家自然科学三等奖和1991年国家

科学技术进步三等奖。稀土萃取分离技术获得突破, 稀土产品附加值也逐渐提高, 以氯化稀土、混合稀土金属、单一稀土化合物等初级产品居多向以高纯、高附加值的单一稀土化合物产品为主转变。1986 年中国稀土产品生产总量达 11 860 吨, 首次超过美国并跃居世界第一, 中国由此从稀土资源大国变为稀土生产大国。1995 年稀土冶炼分离产品产量达到 40 000 吨, 世界稀土生产中心逐步转移到中国。

2. 逐步追赶阶段(1999—2015 年)

第一, 政策意图: 将稀土资源优势转换为产业优势。萃取分离技术一方面促进了中国稀土产业开采端的迅猛发展, 另一方面导致各大稀土厂商在稀土行业超额利润与短期利益的诱使下无节制地开采稀土矿, 非法开采和走私现象层出不穷。诸多厂商争先抢夺出口份额并竞相压价, 形成恶性竞争的局面, 我国稀土行业亟需整顿。同时, 我国稀土新材料研发和产品应用技术落后于国际先进水平, 面临全球价值链“低端锁定”的局面, 迫切需要突破产业链中下游的技术瓶颈, 将稀土资源优势转换为产业优势, 稀土产业由此开启了加快转型升级的逐步追赶阶段。

第二, 政策行动机制: 综合运用结构型和功能型创新政策完善稀土创新生态。为推动稀土资源优势转换为产业优势, 政府发挥织链造网作用, 在持续运用创新期望建立和创新要素供给等结构型创新政策的同时, 加大对创新制度完善和交互关系优化等功能型创新政策的使用, 引导稀土生产应用企业、科研院所和高等院校协同创新, 推动建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系, 加快稀土创新生态系统结构的完善与功能的健全。一方面, 推动结构型创新政策工具进一步完善。从 1999 年开始, 国务院和相关部委颁布了《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南》和《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》等一系列政策, 以加强稀土材料的开发部署, 为稀土功能材料和应用技术创新增加科技投入、提供金融支持和培养专业技术人才, 引导企业加快稀土功能材料和应用技术的创新突破。另一方面, 创新制度

完善和交互关系优化等功能型创新政策工具也随之发力。1999—2015 年, 财政部和相关部委出台了《稀土稀有金属新材料研发和产业化专项》和《稀土产业调整升级专项资金》等政策, 通过推动稀土政产学研协同创新, 建设稀土实验基地和基础设施平台, 健全知识产权保护体系, 组织实施重点新材料关键技术研发等举措, 致力于提升高性能稀土功能性材料及其器件的产业化、规模化水平, 推动其在新能源、节能环保和新一代信息技术等领域的推广及应用, 以获得与我国稀土稀有金属资源优势相匹配的产业竞争能力。2006 年大连路明集团肖志国团队开展了一系列对稀土激活新型硅酸盐发光材料及应用产品产业化的创新活动; 2008 年钢铁研究总院、北京中科三环高技术股份有限公司与安泰科技股份有限公司实现了高性能钕铁硼永磁材料产业化关键技术的攻关, 打破了西方发达国家长期对高性能钕铁硼市场的垄断, 项目技术成果惠及了全国行业内的主体企业。

第三, 政策效应: 稀土产业材料端技术突破。本阶段综合运用结构型和功能型创新政策工具, 通过培育稀土产业结构性创新主体, 提高创新生态系统的运行效率, 建立健全稀土产业创新生态系统的结构和功能, 并过渡到关键部件加工和终端产品制造技术的创新, 其中“稀土激活新型硅酸盐发光材料及应用”“高性能稀土永磁材料、制备工艺及产业化关键技术”等项目分别获得 2006 年国家技术发明二等奖和 2008 年国家科学技术进步二等奖, 推动了稀土产业的开采、遴选和冶炼技术向功能性材料及高端应用技术方面延伸, 稀土产品的结构也得到进一步的优化, 以资源开采、冶炼、分离和初级产品加工为主向以中高端材料和应用产品为主的方向转变。到“十一五”规划末期, 我国稀土永磁材料、稀土发光材料年产量达到世界总产量的 80% 以上, 中国成为名副其实的稀土大国, 同时也标志着我国稀土产品生产由初级向高附加值产品的根本性转变。

3. 跨越阶段(2016 年至今)

第一, 政策意图: 将稀土资源优势转换为战略优势。中国稀土产业虽然在逐步追赶阶段于中

高端技术环节获得了突破,但是在稀土案败诉^①、逆全球化或将升温、贸易保护主义抬头、全球疫情蔓延等形势下,面临着更加复杂多变的国际竞争局势,稀土资源与关键核心技术成为大国博弈的焦点。在此背景下我国亟需将稀土资源优势转换为国家战略优势,稀土产业由此开启了加快实现产业安全可靠、自主可控和绿色环保的跨越阶段。

第二,政策行动机制:功能型创新政策占据主导促进稀土创新生态系统演进。为推动稀土资源优势转换为战略优势,政府发挥引导促进作用,以创新期望建立和创新要素供给政策为主的结构型创新政策工具持续发挥作用,以完善基础设施和交互关系优化政策为主的功能型创新政策工具占据主导地位,持续促进稀土产业创新生态系统的演进。从2016年开始,政府通过建设国家创新中心、知识产权保护机制、标准化信息平台、“政产学研融”支撑体系等举措,为稀土原料、新材料及高端应用产业的发展 and 突破保驾护航;同时在特色资源新材料开采、冶炼分离、深加工等环节推广应用智能化、绿色化生产设备与工艺,加快了稀土废弃产品循环利用技术的创新突破进程。如北京工业大学的岳明团队于2019年突破了稀土永磁二次资源三大技术瓶颈,该团队研发的相关核心技术领先国际水平。国务院及各部委陆续出台的《稀土行业发展规划(2016—2020年)》《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》和《重点新材料首批次应用示范指导目录》等政策持续加强稀土产业的资源扶持力度,大力支持稀土企业发展资源高效循环利用技术,并在原有的六大稀土集团的基础上组建中国稀土集团,进一步促进了稀土产业走规模化、绿色化、集约化、智能化、产业链优化延伸的创新发展道路。

第三,政策效应:稀土产业高端材料与循环利用技术的突破。本阶段以功能型创新政策工具为主,致力于克服稀土产业基础设施陈旧、制度落后、交互失灵和创新动力不足等问题,加快完善稀土产业的创新生态系统,并延伸至稀土产业全技术链,其中“稀土资源中伴生钍资源的回收

与核纯化”“稀土永磁二次资源绿色再生新技术”等项目分别获得2017年中国稀土科学技术一等奖和2019年高等学校科学研究优秀成果一等奖,稀土技术在高端应用和循环利用技术方面取得突破性进展。到2020年,随着新能源汽车、风电等下游产业的发展,稀土磁性材料以及终端产品需求的剧增,我国稀土市场获得进一步发展。

(三) 中国稀土技术创新突破的政策-技术路线图

根据“政策-技术路线图”研究框架,本研究发现:

进入阶段为创新生态系统的新生期。在该阶段,作为创新生态系统的“引领者”,在遵循资源效益政策逻辑的基础上,政府主要采用结构型创新政策工具,通过方向规划引领稀土产业技术路线。该阶段主要包括原材料制备技术环节,在萃取分离技术方面取得重大进展,稀土产业创新生态系统架构初见雏形。

逐步追赶阶段为创新生态系统的成长期。在该阶段,作为创新生态系统的“织网者”,在遵循产业价值政策逻辑的基础上,政府综合利用结构型与功能型创新政策工具,更多地关注关键部件加工和终端产品制造等技术环节,使稀土技术向功能性材料技术和高端应用技术延升,以保证稀土产业创新生态系统的结构和功能得到进一步的健全。

跨越阶段为创新生态系统的成熟期。作为创新生态系统的“促进者”,政府在遵循绿色安全政策逻辑的前提下,以功能型创新政策工具为主导,促使政策作用对象延伸至全技术链环节,持续推进稀土产业创新生态系统的完善。在此阶段,废弃产品循环利用技术获得了重大突破和进展,并解决了系统失灵的问题。整合理论模型如图7所示。

四、结论与建议

(一) 研究结论

本文系统梳理了中国稀土创新突破的演化过程,将其划分为进入阶段(1978—1998年)、逐

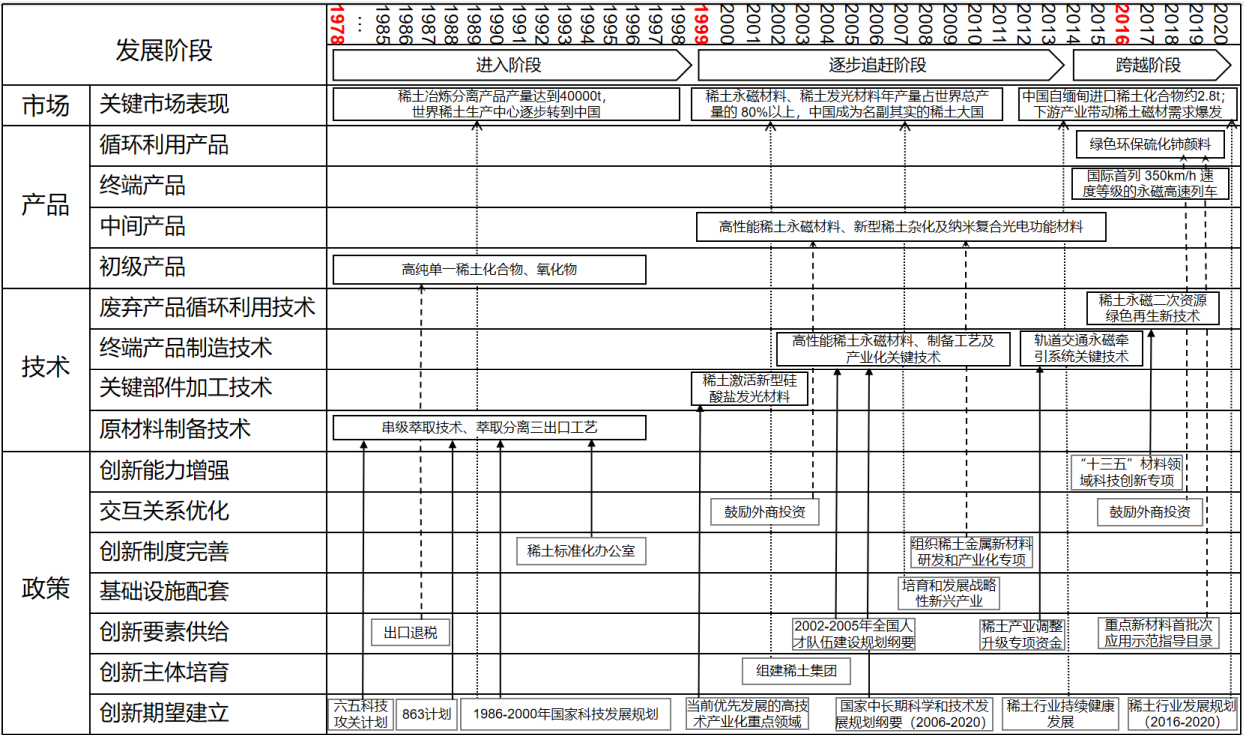


图 7 中国稀土产业技术创新突破的政策-技术路线图

步追赶阶段(1999—2015 年)和跨越阶段(2016 年至今)，分析了不同阶段政策工具的内容、特点、演化规律及其对稀土技术创新突破的作用路径，构建了中国稀土产业技术创新突破的政策-技术路线图，主要得出以下结论：

其一，从创新政策工具的使用来看，重点运用了创新要素供给(25.60%)、创新期望建立(20.24%)等结构型政策和交互关系优化(20.83%)、创新制度完善(16.07%)等功能型政策，基础设施配套(8.33%)、创新能力增强(4.76%)、创新主体培育(4.17%)等政策工具运用较少；从时序演进上呈现出进入阶段以结构型创新政策工具为主，到逐步追赶阶段结构型与功能型创新政策工具同时发力，再到跨越阶段由功能型创新政策工具占据主导的趋势。

其二，从政策作用的稀土技术环节来看，主要作用于关键部件加工技术(34.13%)、终端产品制造技术(29.07%)和原材料制备技术(27.47%)，拓展到废弃产品循环利用技术(9.33%)，并呈现出从关注单一技术环节到全技术链的演进趋势，从进入阶段主要发力于原材料制备技术，到逐步追

赶阶段聚焦关键部件加工和终端产品制造技术，最后跨越阶段延伸到废弃产品循环利用技术。

其三，从政策演化路径来看，稀土产业创新政策具有与稀土产业创新生态共演的特征。随着稀土产业由进入阶段到逐步追赶阶段再向跨越阶段演进，政府分别承担创新生态系统的“引领者”、创新生态系统的“织网者”与创新生态系统的“促进者”的角色，推动稀土产业政策逻辑由资源效益政策逻辑向产业价值政策逻辑再向绿色安全政策逻辑转型，克服各类系统失灵，完善了稀土产业创新生态系统，促进稀土全产业链技术的创新。

(二) 政策建议

基于对中国稀土创新政策演化与作用路径的分析，本文提出以下政策建议：

一是转变政府角色定位。本研究发现不同阶段政府角色定位不同，政策主导逻辑也相应处在演化过程中。目前稀土产业处于跨越阶段，政府应根据产业阶段转变的角色定位和政策逻辑，加快转变为“促进者”角色，遵循绿色安全政策逻辑，调整现阶段的政策工具和政策作用技术环

节,努力实现稀土关键核心技术自主可控,全力巩固在全球稀土格局中的中国地位。

二是优化创新政策工具。本研究发现现有政策工具主要聚焦于创新要素供给、创新期望建立等结构型政策和交互关系优化等功能型政策。目前稀土产业已进入提升自主创新能力的关键时期,现有政策工具不适应自主创新要求,需加强创新主体培育政策等结构型创新政策工具和创新能力增强等功能型创新政策工具的应用,强化稀土企业创新主体地位,培育稀土企业及其自主创新能力。

三是调整创新政策着力点。本研究发现,现有政策关注重点开始向技术链后端延伸,但政策工具对废弃产品循环利用技术的创新促进作用不明显。目前稀土产业开启了加快实现产业安全可靠、自主可控和绿色环保的跨越阶段,政府需围绕角色定位和政策逻辑,调整创新政策着力点至稀土全产业链,坚持稀土行业绿色低碳和高质量发展,加强循环利用技术创新突破。

注释:

- ① 2014年8月7日,世界贸易组织(WTO)裁定中国对稀土出口的管理措施违规,从而迫使中国放开了稀土出口限额管理。

参考文献:

- [1] YU S, DUAN H, CHENG J. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. *Resources Policy*, 2021, 70.
- [2] HAN A, GE J, LEI Y. Vertical vs. horizontal integration: Game analysis for the rare earth industrial integration in China[J]. *Resources Policy*, 2016, 50: 149-159.
- [3] LENG Z, SUN H, CHEN J, et al. China's rare earth industry technological innovation structure and driving factors: A social network analysis based on patents[J]. *Resources Policy*, 2021, 73: 102233.
- [4] 杨丹辉. 我国稀土产业发展战略与政策体系构建[J]. *当代经济管理*, 2013, 35(8): 66-71.
- [5] 王昶, 阳香莲, 宋慧玲, 等. 基于中西方稀土战略调整演化路径的中国稀土政策研究[J]. *矿产保护与利用*,

2018, 38(1): 1-11.

- [6] SHEN Y Z, MOOMY R, EGGERT R G. China's public policies toward rare earths, 1975—2018[J]. *Mineral Economics*, 2020, 33(1): 127-151.
- [7] 苏利平, 高爽. 改革开放四十年以来稀土产业政策演进历程与启示展望[J]. *中国矿业*, 2021, 30(5): 20-26, 35.
- [8] 周美静, 黄健柏, 邵留国, 等. 中国稀土政策演进逻辑与优化调整方向[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1527-1539.
- [9] 马乃云, 陶慧勇. 提升我国稀土产业出口定价权的财税政策分析[J]. *中国软科学*, 2014, 29(12): 179-186.
- [10] 何欢浪, 冯美珍. 我国稀土产品出口政策效果评估的实证检验[J]. *世界经济研究*, 2017, 36(11): 88-99, 136-137.
- [11] NABEEL A, MANCHERI B, BENJAMIN G, et al. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 101-112.
- [12] 黄剑锋, 章晓懿. 中国智慧养老产业政策研究——基于政策工具与技术路线图模型[J]. *中国科技论坛*, 2020, 36(1): 69-79.
- [13] ROTHWELL R, ZEGVELD W. Industrial innovation and public policy: preparing for the 1980s and the 1990s[J]. *American Political Science Review*, 1981, 76(3): 699.
- [14] 刘秀玲, 谢富纪, 王海花. 政策组合视角下的区域创新政策分析——以东北地区为例[J]. *软科学*, 2019, 33(4): 6-10, 15.
- [15] HOWLETT M, RAMESH M. Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems[J]. *American Political Science Association*, 2009, 91(2): 548-580.
- [16] BORRAS S, EDQUIST C. The choice of innovation policy instruments[J]. *Technological forecasting and social change*, 2013, 80(8): 1513-1522.
- [17] 黄海霞, 张赤东, 梅亮. 创新政策研究述评与分析: 理论、工具与评估[J]. *创新与创业管理*, 2016, 6(2): 166-178.
- [18] LOOMIS J, HELFAND G. Environmental policy analysis for decision making[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2001, 85(3): 783-785.
- [19] 张永安, 耿喆, 王燕妮. 区域科技创新政策分类与政策工具挖掘——基于中关村数据的研究[J]. *科技进步与对策*, 2015, 32(17): 116-122.
- [20] 洪勇, 李英敏. 自主创新的政策传导机制研究[J]. *科学学研究*, 2012, 30(3): 449-457.
- [21] 谭劲松, 宋娟, 陈晓红. 产业创新生态系统的形成与演进: “架构者”变迁及其战略行为演变[J]. *管理世界*,

- 2021, 37(9): 167–191.
- [22] 黄子洋, 余翔, 尹聪慧. 颠覆性技术的政策保护空间研究——基于战略生态位管理视角[J]. 科学学研究, 2019, 37(4): 607–616.
- [23] 许冠南, 苏竣, 智强. 引入政策维度的技术路线图分析工具创新[J]. 科技进步与对策, 2014, 31(12): 110–113.
- [24] 傅翠晓, 庄珺, 沈应龙, 等. 面向战略需求的产业技术路线图方法体系研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(7): 137–143.
- [25] 黄萃, 徐磊, 钟笑天, 等. 基于政策工具的政策-技术路线图(P-TRM)框架构建与实证分析——以中国风机制造业和光伏产业为例[J]. 中国软科学, 2014, 30(5): 76–84.
- [26] MORRISON A, RABELLOTTI R. Gradual catch up and enduring leadership in the global wine industry[J]. Research Policy, 2017, 46(2): 417–430.
- [27] LEE K, MALERBA F. Catch-up cycles and changes in industrial leadership: Windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems[J]. Research Policy, 2017, 46(2): 338–351.

Research on policy evolution path of technological innovation in China's rare earth industry based on Policy-Technology Roadmap

WANG Chang¹, LIU Yalin¹, GENG Hongjun¹, ZUO Lyushui²

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

2. School of Public Administration, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Rare earth elements are referred to as "industrial vitamins" and have become the focal point of global resource competition and technological rivalry. As the largest rare earth resource country, China places great emphasis on technological innovation in the rare earth industry and has implemented a series of policies to promote such transformation from a strong rare earth resource country to a powerful one. This article collects 63 innovation policy texts related to the rare earth industry, issued at the national level between 1978 and 2021. Using these texts, a Policy-Technology Roadmap (P-TRM) framework is constructed to analyze the evolution and trajectory of technological innovation policies within China's rare earth industry. The findings indicate the following. First, regarding innovation policy tools, the rare earth industry exhibits an evolutionary trend, transitioning from predominantly structural innovation policy tools during the initial stage, to a combination of structural and functional innovation policy tools during the catching-up stage, and ultimately to the predominance of functional innovation policy tools during the leapfrog stage. Second, in terms of the policy's impact on technological aspects, from the initial stage when the focus primarily revolved around raw material preparation technology, to the catching-up stage of gradually shifting towards key component processing and end product manufacturing technology, and ultimately to the leapfrog stage of expanding to include waste product recycling technology, rare earth industry innovation tools demonstrates an evolving trend from a concentration on individual technological links to the entire technological chain. Third, concerning the policy's evolution path, the rare earth industry's innovation policies possess characteristics that co-evolve with the rare earth industry's innovation ecology, constantly enhancing the rare earth industry's innovation ecosystem and promoting technological advancements throughout the entire rare earth industry chain. Finally, policy recommendations are made for the optimization of China's rare earth industry's technological innovation policies.

Key Words: rare earth industry; policy-technology roadmap; technological innovation; policy evolution path

[编辑: 游玉佩]