成渝稀土永磁产业链协同的减污降碳路径研究

肖逸菲[1]，杨 威[2]，黄思琪[1]，魏 瑛[1]，周思妍[1]，杨 涵[1]

（1. 西南财经大学天府学院工程与材料学院，绵阳 621050；2. 绵阳巨星永磁材料有限公司，绵阳 621050）

摘要：聚焦成渝双城经济圈稀土永磁产业链协同效应，剖析稀土永磁材料在减污降碳进程中的功能以及具体的应用路径。通过探讨稀土永磁材料的特性与发展态势分析其在高效电机、风电及新能源领域的应用，评估技术创新对减污降碳的实际贡献。研究认为产业链协同机制是推动绿色低碳转型的关键，在技术创新与产业升级层面作用显得更突出。建议成渝地区未来需更加注重强化产业链合作与技术创新以实现低碳转型，为全国绿色发展树立典范。

关键词：成渝双城经济圈；稀土永磁；减污降碳；区域协同

中图分类号：TM273 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)02－0009－10

全球气候变化带来的严峻考验愈发明显，极端气象事件频繁发生，海平面攀升，对人类社会的可持续发展造成深刻影响。在这样的大环境中，中国主动担当大国使命，清晰确立“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的“双碳”战略目标。工业领域作为能源消耗与碳排放的主要源头之一，其减污降碳的成效对实现国家“双碳”目标至关重要[1]。促使工业领域切实减少污染物排放并降低温室气体浓度，已成为现阶段国家可持续发展战略的核心工作。

“新质生产力”概念的出现也为中国经济高质量发展提供了新方向上的指引。“新质生产力”这一概念，核心是借助数字技术、绿色技术及新材料，对传统生产要素加以重新组合，使单位资源创造更多价值，同时减少污染排放。与传统生产力相比，它具有三个显著差异：一是创新处于核心地位，技术发挥主导作用；二是数据与绿色标准成为新的生产要素；三是产业链、人才链、资金链如同齿轮般相互咬合，形成可自我进化的系统。新质生产力核心特征体现为高科技、高效能、高质量，注重借助创新带动发展动力的转变。绿色化是其必须包含的核心内容。发展新质生产力，根本上需要经济增长与生态环境保护共同推进，遵循资源节约、环境友好的高质量发展路径。探索工业减污降碳的可行方式，本身就是培育新质生产力的重要行动。

在这一过程中，稀土永磁材料凭借其独特的物理化学特性显示出重要战略意义。稀土永磁材料是生产制造超高效永磁电机、大型风力发电机组核心部件、新能源汽车驱动电机等重要设备的核心材料。采用高性能稀土永磁材料的设备像高效电机替换传统工业电机、风机，能明显提高能源使用效率，大大降低电力消耗及减少相关碳排放。同样的，风电领域使用高性能稀土永磁材料能提高风能捕获效率，又如在新能源汽车领域使用则可以直接增加车辆续航里程和提高能效水平。可以说，稀土永磁材料技术创新对提高能源效率、支撑减污降碳目标达成、培育绿色新质生产力方面，都有着不可替代的战略支持作用。

着眼中国的区域发展战略，成渝双城经济圈被确立为国家区域协调发展的核心引擎，承担着探索绿色低碳转型新路径、培育高质量发展新动能的使命。该区域具备独特的地区优势：资源方面，四川（如凉山州）有国内重要的稀土矿产资源[5]；产业方

收稿日期：2025-07-24

基金项目：四川省社会科学重点研究基地沱江流域高质量发展研究中心项目（TJGZL2025-17）；绵阳市社会科学界联合会哲学社会科学规划项目（MY2025ZC010）；西南财经大学天府学院“成渝地区双城经济圈降碳减污协同增效机制研究”专项项目（TFXJ2025KJXY003）；绵阳市社会科学界联合会校地共建专项课题（XCTF2025ZC12）

作者简介：肖逸菲（1994—），女，四川乐山人，博士，讲师，研究方向为稀土永磁材料、绿色材料应用；杨威（1995—），男，四川乐山人，硕士，研究方向稀土永磁材料；黄思琪（2005—），女，四川内江人，研究方向为绿色材料应用；魏瑛（2004—），女，四川内江人，研究方向为工程造价；周思妍（2006—），女，重庆人，研究方向为工程造价、工程管理；杨涵（2006—），女，重庆人，研究方向为工程造价。

面，尽管成渝地区相较于沿海地区发展较弱，但目前已形成以绵阳成都为代表的稀土永磁材料研发和生产基地，并聚集着较强的研发实力，重庆则对应存在稀土永磁产业下游的广阔的制造业应用市场（如汽车、电子领域），已初步形成“材料-研发-应用”的产业链；环境方面，区域内沱江等重点流域（如自贡、德阳）面临工业污染治理和生态保护的双重压力，迫切需要有效的减污降碳解决办法；创新方面，区域内高校和科研院所密集，为技术研发和产业升级提供坚实支持。

1 稀土永磁材料的绿色低碳应用与创新

1.1 稀土永磁材料的特性与发展历程

稀土永磁材料是现代工业里必不可少的关键基础材料，核心优势在于拥有极强的磁性能。它们能产生高强度且稳定性突出的磁场，本身的抗外界干扰能力很强（专业上称为高“矫顽力”H_{cj}）。这意味着相同尺寸的稀土磁体，磁性可达传统磁铁的几倍甚至十几倍。这种特性实际上源于稀土元素（如钕、镝、铽）独特的原子结构。回顾其发展历程，20世纪60年代第一代钐钴 $SmCo_5$ 磁体出现，随后高温性能更优异的2:17型钐钴磁体出现，到80年代高性能钕铁硼磁体走向商业化，技术持续突破。其中，第三代稀土永磁材料钕铁硼（$Nd_2Fe_{14}B$）因其优秀的磁性能（尤其是其高“磁能积 BH_{max}”，即存储磁能的能力）和各个领域广泛的应用，很快便发展成为市场主流，被称作“磁王”。整个发展过程始终围绕着几个核心目标，即追求更强磁性（高性能化），尽可能减少对昂贵稀缺重稀土的依赖（低/无重稀土化），增强低温高温等更加苛刻环境中的稳定性，提升环境友好性（如减少钴使用、设计更易回收的产品）四个方面。

1.2 稀土永磁材料在高效电机、风电、及新能源汽车中的关键作用

正是这种强大的磁性能，让稀土永磁材料成为推动能源高效利用和低碳转型的核心动力元件。它在多个关键领域发挥不可替代的作用，直接或间接地为减污降碳做出重大贡献。

1.2.1 工业领域

工业用电中70%～75%被电机系统（含风机、泵、压缩机等）消耗[11]。用稀土永磁体制成的永磁同步电机替代传统电机，效率能提高5%～15%。工厂里常见的水泵、风机、压缩机这类设备，换成永磁同步高效电机，能大幅减少电力消耗，进而减少发电厂燃煤产生的碳排放量。一台高效稀土永磁电机在整个使用期间，减少的二氧化碳排放量可能达数百吨。

1.2.2 清洁能源领域

清洁能源方面，大型风力发电机是风能获取的核心设备。用稀土永磁体的直驱或半直驱永磁发电机，不用复杂齿轮箱，结构更简单且可靠，维护需求较少，风速较低时也能高效发电[14]。这能降低风力发电成本，也减少全生命周期的碳排放，让风能这种清洁能源更“绿色”。

1.2.3 交通领域

交通领域，普及和大力推广新能源汽车对实现交通低碳化很关键。其核心动力来源——驱动电机，基本都使用高性能稀土永磁同步电机。它的优势是体积小但功率大，小身材大能量（高功率密度），效率高（能延长续航里程）。另外，由于稀土永磁体在高温和强电磁干扰下仍能保持优秀的稳定性，这对保障车辆安全和驾驶体验很重要[15]。可以说，新能源汽车实现零排放行驶，离不开高效稀土永磁材料技术创新的有力支持。除了新能源汽车，其他的如变频空调、节能电梯、精密医疗设备、自动化生产线等应用领域，高性能稀土永磁体同样也在提升能效、降低能耗方面发挥着关键作用。

1.3 稀土永磁材料的创新技术及其对减污降碳的贡献

1.3.1 高性能化

为了应对资源短缺、环境保护压力以及满足不断提升的性能需求，稀土永磁材料技术不断创新，其发展方向本身就具备显著的绿色低碳潜力。磁体的性能的持续提升是技术创新的最终目的，即追求更高的“磁能积 BH_{max}”和“矫顽力 H_{cj}”。这意味着可以用更少的材料或更小的体积产生同样甚至更强的磁场。直接的效果就是让最终的电机、发电机等设备效率更高、体积更小、重量更轻，在使用过程中持续节约能源，减少碳排放。

1.3.2 低/无重稀土化

低重稀土依赖是当前重要挑战，也是技术创新的核心方向。重稀土元素（如镝、铽）对维持磁体在高温环境下的性能稳定意义重大，但其资源储量有限、市场价格偏高，同时开采与冶炼环节会对环境造成较大影响。为了解决这一难题，“晶界扩散”等创新技术出现，可通过在磁体表层区域添加微量重稀土元素，不仅可以提升磁体的矫顽力，还可以大幅减少重稀土元素的整体用量，有效降低上游资源开采与加工过程中的环境负荷。晶界扩散技术的

减污降碳成效已得到量化验证。例如，通过 Pr-Tb 协同晶界扩散工艺，在高铈永磁体表层形成 5～8 μm 富 Tb 硬化层，使 Tb 用量从大于 2wt%（wt% 为质量百分数，表示 100 克溶液中含有的物质克数）降至 0.7wt%，磁体级别 CO_2 排放下降约 30 %，为稀土永磁材料的高性能化与绿色化提供了可行路线[21]。该结论的数据已得到江西理工大学稀土学院、华安证券研究所及行业市场研究报告的实验文献数据与间接推算支持[22]。其中，重稀土减量与磁性能提升已有明确实验数据支持，碳排放降幅为基于工艺能耗与稀土用量的间接推算，也符合行业研究趋势。

同时，研究者正探索用储量更充裕的铈、镧等高丰度稀土元素部分替代钕，甚至研发完全不依靠重稀土的低/无重稀土体系（low/free HRE）。成渝地区企业也开展了本土化实践，例如，绵阳巨星永磁 2024 年应用“选区扩散”工艺使得铈磁体矫顽力提升 32%，重稀土用量减少 62%（从 4.5% 降至 1.7%），对应冶炼环节的酸性废水排放量减少 45%，每吨磁体的 CO_2 排放减少约 32 %（企业实地调研数据）。这些工艺或技术创新的核心目标，是从源头减少关键资源消耗，降低了开采冶炼环节产生的污染（包括酸性废水、放射性废渣等）。

1.3.3 改进制备工艺

改进制备工艺，如采用热压 / 热变形、黏结磁体精密成型等技术，可直接生产形状复杂、尺寸精确的磁体毛坯。这能大幅减少传统工艺中切割、打磨等环节导致的原材料浪费，使损耗率从 30%～40% 降至 5% 以下。材料利用率的提高，也降低了加工过程中的能源消耗与粉尘等污染物排放，让生产过程本身更绿色。

1.3.4 再生回收技术

随着大量含有稀土永磁体的产品（如废旧电机、电子产品）进入报废期，高效回收再利用技术的重要性日益凸显。相关回收方法包括物理法，如尽可能拆解并直接再利用旧磁体、化学法，通过溶解提纯稀土元素以及氢碎法，利用氢气使合金碎裂等。回收利用的减污降碳成效显著，既能减少对原生稀土矿的依赖，避免矿产开采引发的严重生态破坏（如森林砍伐、水土流失和污染）[26]。更重要的是，由于回收过程的能耗和碳排放远低于从矿石中提取稀土，所以回收这一环节成为构建“资源开采-产品制造-使用-回收再生”绿色闭环产业链的核心环节，对循环经济的实现意义重大。

1.4 国内外稀土永磁材料技术发展现状与挑战

1.4.1 国际现状

从全球范围看，稀土永磁材料领域的发展格局与挑战并存。在国际层面，日本依托多年来深厚的技术积淀，在高性能钕铁硼的研发及生产（如晶界扩散技术、精密制造）方面长期保持领先。

欧美方面则在基础理论研究、材料计算模拟设计等高端应用领域具备显著优势。

近年来，出于供应链安全及环境责任的考虑，欧美国家也正在积极推进本土稀土分离冶炼技术以及对回收技术的研发力度。

1.4.2 中国现状

中国作为全球最大的稀土永磁材料生产国和消费国，拥有从稀土资源开采、分离冶炼到磁体制造、应用市场的完整产业链，产量占据全球主导地位[33]。中国近十几年在技术上取得了显著进步，特别是在高性能磁体的工艺改进、晶界扩散技术的应用推广以及回收技术等方面取得了丰厚的成果[34]。国内蓬勃发展的新能源汽车、风电等产业，也为稀土永磁材料提供了巨大的应用市场。

1.4.3 未来挑战

然而，无论国内外，稀土永磁材料领域的进一步发展都面临一些共性的挑战。例如，关键稀土资源的供应风险始终存在，尤其是重稀土和部分轻稀土的供应高度集中且面临严格的环保约束。在性能方面，现有磁性能最高指标离理论性能仍有一定差距，例如，如何同时提高磁能积、高矫顽力和高剩磁。在极端环境下如何保持磁体的长期稳定性，甚至是在产业化的过程中，如晶界扩散工艺技术如何实现大批量产品的扩散性能一致性等问题，仍需要进一步探索[34]。

高效、低成本的规模化回收技术目前也尚未完全成熟，磁体在产品中高度集成且小型化，增加了拆解难度。回收的经济性也易受稀土价格波动影响，完善回收体系成为迫切需求。磁体生产过程中能耗较高，尤其是粉末冶金工艺。另外其他如电镀等部分工序存在环境风险，后续需要持续开发更清洁、低能耗的绿色制造工艺。此外，全球范围内，稀土及永磁材料被多国列为关键战略物资，贸易政策变动、技术壁垒强化与国内外的供应链本土化趋势，使国际竞争环境愈发复杂严峻。这些挑战构成当前发展的瓶颈，也明确了未来稀土永磁技术攻关与产业升级的重点方向。

2 成渝双城经济圈的绿色低碳转型需求与挑战

2.1 成渝双城经济圈的经济与产业结构概述

成渝双城经济圈包含重庆及四川成都、绵阳、德阳等15个城市，2023年常住居民约为9 600万人，区域生产总值近8万亿元。作为中国西部发展的重要动力源，该区域经济总量与产业规模都具备关键地位[35]。区域经济结构特色显著，以重庆、成都为核心引领周边城市共同发展。重庆是传统制造业强市，在新能源汽车、电子信息、装备制造等领域根基扎实，基础雄厚；成都则以电子信息、航空航天、生物医药、现代服务业等产业为特色。绵阳在军工电子、磁性材料等特色产业具备优势，而德阳、自贡等则在风电装配产业具有鲜明的地域特色产业。

可以说，成渝双城区不仅拥有水电、天然气等清洁能源，也形成电子信息、汽车、装备制造、食品饮料等千亿级产业集群。汽车产量占全国7%，笔记本电脑产量占全球的30%，而化工、钢铁、水泥等高耗能产业仍占工业能耗的五成左右。

然而，这样的产业结构也存在较大的挑战。例如，化工、建材、部分装备制造等传统产业能源消耗量大、对资源依赖强、排放水平偏高。区域内密集的工业生产与快速的城市化进程，持续给生态环境带来压力，尤其流经核心工业区的沱江等重点流域，急需修复生态与改善水质。同时，作为国家的战略腹地，成渝地区还承担着探索内陆开放高地、带动西部地区高质量发展的责任。因此，区域协同经济增长与生态环境保护，走绿色低碳高质量发展之路，是其内在需求与必然选择[36-37]。

2.2 成渝地区绿色低碳转型的主要目标与政策支持

面对全球气候变化及中国“双碳”目标的硬性约束，成渝双城经济圈绿色低碳转型目标明确且紧迫。首要目标是降低单位GDP能耗与二氧化碳排放量。《成渝地区双城经济圈碳达峰碳中和联合行动方案》[38]提出，到2025年，单位GDP能耗和二氧化碳排放强度持续下降，非化石能源消费占比提升至45%左右。

除此之外，核心目标还包括推动产业结构向高技术、高效益、低消耗、低排放方向优化升级。另外，在推动产业链整合和经济发展的同时要改善环境质量，特别是重点流域的水环境、空气环境，以达到培育壮大绿色低碳产业、形成新的经济增长点的目标。

对此，国家与地方政府已提供了有力的政策支撑。国家层面将成渝定位为“生态文明建设先行示范区”，要求其在绿色低碳发展方面探索新路径。四川与重庆也陆续出台一系列规划及政策文件。例如，《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》[39]强调绿色转型，《四川省“十四五”节能减排综合工作方案》[40]、《重庆市工业领域碳达峰实施方案》[41]等则设定具体节能减排目标与产业绿色化路径。两地同步实施《推动川渝能源绿色低碳高质量发展协同行动方案》，以水电、天然气、风电、光伏和氢能为核心建设清洁能源基地，鼓励企业使用绿电、购买碳汇。这些政策涵盖产业结构调整、能源结构优化、重点行业节能降碳改造、绿色技术创新推广及市场机制建设（如探索碳排放权交易）等多个方面，为区域绿色低碳转型提供明确指引与制度保障。

2.3 稀土永磁材料在成渝绿色低碳转型中的角色

在这一宏大转型进程中，稀土永磁材料技术的创新与应用具有独特且关键的作用，与成渝地区的资源禀赋和发展需求高度匹配。四川攀西地区是轻稀土的主要产地[5]，该地区具备从矿山开采、分离提纯、金属冶炼、磁材制造到电机生产的完整产业链，拥有国内重要的稀土资源储备，为相关产业发展提供了物质支撑。四川绵阳和成都是全国重要的磁性材料研发与生产基地，汇聚了众多高校和科研院所，在材料科学、电机设计、工艺改进等研发方向具有强劲实力。重庆拥有庞大的制造业应用市场，特别是新能源汽车、高效电机、风电设备等稀土永磁下游应用领域的需求尤其旺盛。这种“资源-材料-研发-应用”的链条雏形，让稀土永磁技术有望成为推动成渝地区工业领域深度减污降碳的重要技术支点。

例如，相关主体大规模推广使用高性能稀土永磁电机，对区域内大量存量传统工业电机进行改造或替换，可直接带来显著的节电效果，削减碳排放量。另外，支持本地风电装备企业采用高性能永磁发电机，该做法能提高清洁能源的效率，提升清洁能源本地化水平。相关政策助力重庆等地新能源汽车产业发展，推动交通领域向电动化转型。

具体而言，大规模推广采用高性能稀土永磁电机改造或替代区域内庞大的工业电机存量，可直接带来显著的节电效果和碳排放削减；支持本地风电装备企业应用高性能永磁发电机，能提升清洁能源的效率和本地化水平；助力重庆等地新能源汽车产

业的发展,则直接推动交通领域电动化转型。

2023年,四川省经济和信息化厅发布《关于促进四川省稀土产业高质量发展的实施意见》[42]。该意见指出,成渝地区将依托绵阳、乐山、眉山等地建设稀土新材料产业基地,重点发展钕铁硼磁体、永磁牵引电机、储氢合金,目标是将磁材本地配套率从目前的20% 提升至60%。这意味着一辆重庆产新能源车的驱动电机、一台成都产风电机组,都能直接用上本地稀土永磁产品。这将减少产品长途运输产生的额外排放。依托本地资源和技术产业基础,相关主体发展壮大稀土永磁产业,推动该产业广泛应用,这是成渝地区实现工业深度减排、培育绿色新动能、提升产业链竞争力的重要手段。

2.4 成渝地区在低碳转型过程中面临的技术与产业瓶颈

然而,将这一潜力转化为现实成效,成渝地区在推进低碳转型特别是充分发挥稀土永磁技术价值的过程中,仍面临一系列技术和产业层面的瓶颈挑战[43]。

(1)关键金属供应风险。钕、镨、镝等稀土元素全球分布集中,价格在过去20年出现多轮大幅波动。一旦海外资源受限,成渝下游的新能源汽车、风电整机厂商将面临成本上升或供应中断。

(2)在技术层面,绵阳巨星永磁虽取得进展,如"超高性能58SHT磁钢"将使用温度从传统的100 ℃提高到150 ℃,但在超高综合性能磁体(如同时满足极高磁能积BH_{max}≥52 MGO、矫顽力和耐温性180 ℃ 矫顽力保持率≥92 %)的稳定量产、前沿技术(如高效无重稀土磁体、先进回收技术)的突破性创新方面,与国际顶尖水平尚有差距,无重稀土磁体仍处中试,核心专利海外布局不足5%。例如,《面向新兴产业的新材料发展战略研究》中提到中国原始创新能力不足、核心技术空心化,高端稀土功能材料被国外垄断,速凝、氢破碎、渗镝等关键工艺仍依赖日本[44],这限制了其在高端装备领域的应用竞争力。同时,高端应用人才短缺。永磁电机设计、氢燃料电池用稀土储氢材料研发需要跨学科团队,而成渝地区相关高端研发人员不足全国的8%,成为新技术产业化的现实瓶颈。

(3)稀土生产环节本身排放高。现有研究显示,每生产1 t稀土氧化物平均排放12 t二氧化碳和含氟废气。如果本地冶炼环节不能同步升级,绿色电机带来的减排收益会被上游排放抵消。这导致稀土资源绿色开发与高效循环利用体系尚未健全。上游稀土开采冶炼的环境成本(如污染治理)依然较高,区域内规模化、经济性好的稀土永磁体回收再利用网络和商业模式还处于起步阶段,未能有效形成"资源-产品-再生资源"的绿色闭环。

(4)产业链协同不足。川渝虽已出台联合行动方案,但磁材企业、整车厂、风电整机厂之间的技术标准、回收体系尚未打通,废旧电机再制造率不足10%[45]。"材料-器件-应用"各环节的衔接还不够紧密高效。上游材料供应稳定性、成本竞争力有待提升,中游器件设计制造能力需加强,下游应用端(特别是传统高耗能企业)对采用高效永磁电机等新技术进行节能改造的动力和能力有时不足,存在信息不对称和初期投入顾虑。区域内部的协同也有提升空间,跨行政区(如川渝之间、核心城市与周边地区)的产业规划协调[46]、创新资源共享、环境标准统一、市场壁垒消除等方面仍需深化。

这些技术和产业瓶颈,如不有效破解,将制约稀土永磁技术对成渝地区绿色低碳转型的赋能深度和广度。突破这些瓶颈,需要区域层面在政策协同、创新联合攻关、绿色金融支持以及循环经济基础设施建设等方面付出更多努力。

3 产业链协同与减污降碳路径分析

3.1 产业链协同的概念与重要性

利用稀土永磁材料推动成渝地区绿色低碳转型,需要先理解产业链协同的内涵与价值。产业链协同的本质,是产业链各环节(从上游资源到中游制造,再到下游应用及最终回收利用)及相关参与者(企业、政府、科研机构、服务机构等),为实现共同目标(如效率提升、成本降低、创新加速、环境挑战应对),在技术、信息、标准、政策、空间布局等方面开展的深度协调、合作与整合。

成渝双城经济圈的低碳转型进程可类比为多主体协同参与的系统性工程,其中稀土永磁材料作为关键物质载体,扮演着串联产业链各环节绿色价值传递的核心角色;而产业链协同机制则构成这一系统高效运转的制度基础与运行规则,其作用在于保障绿色技术、资源要素及环境效益在产业链各环节的有序传导与最优配置。这种协同并非局限于传统意义上的供需交易关系,而是体现为产业链上下游主体通过资源整合、技术协同、数据共享及环境责任共担所形成的深度耦合关系。通过类似生态系统中各组分的协同共生模式,实现能源利用效率的最大化与稀土资源环境负荷的最小化,最终达成全产业链的绿色价值增值。

稀土永磁产业技术密集、环节多、应用广，有效的协同对其尤为关键。这种协同可显著提升资源配置效率，加速技术创新与成果转化，降低交易成本，增强产业链应对风险的能力[47]（如资源供应波动、技术变革、环境规制），最终形成强大的整体竞争力，为区域减污降碳目标提供坚实的产业组织基础。

从理论层面看，产业链协同的减污降碳效应源于三重机理：其一，基于交易成本理论，纵向协同通过上游资源供应与下游应用需求的信息实时对接（如川渝建立的稀土-电机需求数据平台），可减少因“供需错配”导致的过度生产（如磁材库存积压），降低无效能耗（据调研，成渝地区因信息不对称导致的磁材过度生产约占年产量的8%，对应年额外碳排放约2.3万t）；其二，依据创新生态系统理论，横向协同（如产学研联合攻关）可加速绿色技术溢出，如成都高校研发的低重稀土磁体技术通过企业联合在3个月内实现产业化，较传统转化周期缩短60%，减少研发阶段的能耗浪费；其三，基于协同治理理论，跨区域协同通过统一环保标准与资源配置（如川渝统一稀土冶炼废水排放标准），可避免“监管洼地”导致的环境成本转嫁，据测算，成渝统一环保标准后，稀土冶炼单位排放强度下降12%。

3.2 稀土永磁材料产业链的主要环节与协同机制

聚焦到稀土永磁材料产业链本身，已具有清晰的结构，主要包含若干关键环节。最前端为稀土资源环节，涵盖稀土的勘探、开采及冶炼分离。上游部分构成产业的起点。紧随其后的是稀土永磁材料生产环节，将分离提纯的稀土金属或合金，通过各种工艺制备成高性能磁体（如烧结钕铁硼、黏结钕铁硼等）。之后是磁性器件与组件的设计制造环节，将制备的磁体加工或集成化为可直接使用的部件（如电机转子）。然后进入终端应用集成环节，将磁性器件装配至最终产品，如高效电机、风力发电机、新能源汽车驱动系统、节能家电等。最后也是十分重要的一个环节，即废旧磁体以及含磁产品的回收再利用，形成资源的闭环。

推动这条产业链的绿色低碳发展，核心在于如何构建有效的协同机制。

协同可从纵向层面展开。例如，从供应端，确保上游材料供应稳定、品质统一且成本处于可控范围；中游段可以进一步推动材料性能设计或器件设计尽可能与下游应用需求端进行精准匹配，像联合开发适用于特定工况（如中低性能或低成本磁体、高温场景下）的高效电机。

协同也可以从横向层面开展。例如，同行企业在标准制定、共性技术研究（如低重稀土技术、高性能磁体研究开发）、市场应用拓展等方面开展合作。又如，通过如磁材企业与电机设计院、风电整机厂深度配合，实现跨行业协作。

纵向协同中，磁材企业与电机厂商的联合设计可使磁体利用率从传统的65% 提升至89%（以重庆某电机厂数据为例），减少切割加工环节的材料浪费与能耗（每台电机加工能耗降低约1.2 kWh）；横向协同中，调研显示成渝5家磁材企业共建的低重稀土技术实验室，通过设备共享使单位研发成本降低30%，技术迭代速度提升40%。2024年成功研发的无镝磁体较传统产品碳排放减少18%。

此外，网络交叉协同也不可或缺。交叉协同包括构建活跃的创新生态系统，促使高校、科研院所的基础研究与企业的产业化需求紧密衔接，实现产学研三方合作，加快技术突破与应用推广。对于成渝这样的跨行政区经济圈，区域协同意义重大。各地政策与管理模式存在差异，就需要打破地方壁垒，在产业规划布局、环保政策实施、创新资源共享（如共建研发平台、检测中心）、市场准入等方面形成合力，避免重复建设与恶性竞争。例如，四川攀西拥有矿山，绵阳、乐山聚集磁体工厂，重庆的长安、赛力斯需要高效电机，只有把需求信号实时传回矿山，冶炼厂才知道该多生产哪一种稀土氧化物；只有磁体厂提前参与电机设计，才能避免“磁材过剩、电机缺磁”的尴尬。

3.3 成渝地区稀土永磁材料产业链的现状与挑战

聚焦成渝地区，当地稀土永磁产业链已具备一定基础，形成了较为明确的区域分工特点。在四川尤其是绵阳，凭借“中国科技城”的科研机构及稀土产业基础，是国内重要的磁体材料供应地。成都集中了较强的研发力量，在材料科学、电机设计等领域具备优势；重庆依托雄厚的制造业根基，特别是汽车、摩托车、通用机械及笔记本电脑产业，成为重要的下游应用市场，对高效电机等需求旺盛。这种“绵阳生产-成都研发-重庆应用”的格局，为成渝双城经济圈的区域协同推进发展提供了天然条件。

但实际协同的深度与效率仍有不小提升余地。当前成渝稀土永磁产业链如同一条未完全拉展的绳索，上游开采与中游冶炼环节常各自为政。上游稀土资源（主要分布于四川）的绿色、稳定且低成本的供应面临挑战，环保压力与开采成本影响着材料

端的竞争力。中游环节中,磁体生产与器件设计制造的衔接时常不够紧密,高端器件设计能力相对不足,制约了本地磁体在高端市场的应用。下游应用端,尽管重庆等地需求庞大,部分传统制造企业对采用高效稀土永磁电机等新技术进行节能改造的积极性不高,原因包括初期投入成本较高、对技术认知不足及缺乏有效的融资支持机制。区域内部协同机制尚未完全理顺,川渝两地在产业规划对接、环保标准统一、创新平台共建共享、要素自由流动等方面仍存在一些阻碍,影响了资源在更大范围的优化配置。此外,成渝地区回收再利用环节相当薄弱,缺乏规模化、规范化的回收网络与先进处理技术,宝贵的稀土资源未能有效循环,也加重了环境负担。

成渝地区的实践显示,产业绿色转型需凭借区域资源条件。四川攀西稀土矿与重庆制造产业基地形成相互补充:绵阳设立稀土永磁再生利用中心,回收电机中的磁体原料;成都规划低重稀土磁体中试基地,攻克高温退磁问题。此外,借助“绿电 + 数字化”方式改造传统工厂,如重庆某电机企业运用智能控制系统改进磁体充磁流程,单台设备每年节电 4.2 万 kWh。某制造企业采用高效永磁同步电机,结合先进变频调速与智能控制策略,其生产系统高负荷运行时能耗下降约 25%,产品输出质量保持稳定[42]。这些尝试证实了稀土永磁技术创新与制度创新协同的必需性。

3.4 减污降碳路径的多维度分析

要实现成渝地区深度减污降碳,需从多维度综合采取措施,构建系统性路径。在绿色低碳转型的大背景下,稀土产业通过数据、智能技术与绿色要素的深度融合,大幅提高资源利用效率与环境可持续性[48]。对于成渝双城经济圈,绿色低碳转型若仅依赖关停高耗能工厂,经济会迅速失去发展动力。

资源维度层面,川渝两地正开展“以废定产”试点:通过回收的废旧磁体,核算未来三年可再利用的钕、镨、镝数量,再据此确定矿山开采额度,防止过度开采。技术减排是最直接且核心的途径,其关键在于借助高效技术替代,从源头实现节能降耗。例如,中科院宁波材料所与绵阳磁材企业合作,将传统烧结炉改造为氢气隧道窑,每吨磁材的天然气消耗减少 30%,二氧化碳排放随之降低。

推广层面,在成渝地区,重中之重是推动高性能稀土永磁电机在工业领域的广泛应用,替代区域内庞大的老旧、低效电机存量。这包括钢铁、化工、建材等高耗能行业的泵、风机、压缩机等关键设备改造,也包括推动新建项目直接采用高效永磁技术。这不仅直接降低工业用电量,也减轻了发电端的化石能源消耗和污染排放。推广应用稀土永磁直驱/半直驱风力发电机,提升本地风能利用效率,增加清洁能源供应。支持新能源汽车产业(重庆是重要基地)发展,本身就是交通领域电气化减碳的关键。新质生产力给出的解决方案是“更换引擎”:用更轻便、更高效、更智能的技术替代旧技术,实现增长与减碳同步推进。稀土永磁材料正是这台新引擎中的关键部件。它能减轻电机重量、提高运行效率,直接降低电力消耗;能让风电叶片在更低风速下实现发电,提高绿色电力占比;还可对废热、废磁进行回收再利用,形成循环闭环。

现有产业链协同仍存短板,如调研的 5 家成渝电机企业中,仅 2 家参与上游磁体企业的联合设计,导致 40% 的磁体因尺寸不匹配需二次加工,额外增加能耗 15%;绵阳某磁材企业反映,因川渝稀土氧化物纯度标准不统一(四川要求 99.95%,重庆部分企业接受 99.9%),每年因质量返工损失约 300 万元,对应碳排放增加 500 t。

因此,结构减排路径聚焦更宏观的产业调整,即优化区域产业构成,逐步降低高耗能、高排放产业占比,同时大力培育发展以稀土永磁材料及应用为代表的高技术、高附加值、低排放绿色低碳产业,推动产业体系向“绿色化”升级。管理减排路径强调通过优化管理与制度创新挖掘减排空间。例如,在成渝区域内推动构建稀土永磁产业的绿色供应链管理体系,要求上下游企业在采购、生产、物流等环节共同遵循更高环保标准,促进全链条环境绩效提升;探索建立覆盖重点排放企业的碳排放权交易市场或环境权益交易机制,借助市场手段激励企业主动减排。

3.5 产业链协同促进成渝低碳转型的策略

要充分释放上述减污降碳路径的潜力,尤其在成渝地区挖掘稀土永磁技术的巨大减排价值,需要大力强化并优化产业链协同,以及系统性的策略支撑。

(1)着力打造区域一体化创新联合体。整合绵阳、成都等成渝地区的研发资源,联合四川大学、重庆大学、电子科技大学、西南科技大学等高校,相关科研机构及行业龙头企业,如西南应用磁学研究所、绵阳巨星永磁有限公司,针对区域内超高性能磁体量产、低成本低重稀土技术、高效回收工艺等

共性关键技术难题开展协同研究，共享研发设备与成果，加快创新突破及本地转化进程。

(2)加强上下游供需衔接与技术融合。磁材生产企业需与电机、风电设备、新能源汽车制造企业构建更密切的协作模式，联合开发适配成渝本地产业特征(如高温高湿环境、特定运行条件)的高效可靠应用方案。可定期举办对接活动，共建示范生产线或应用展示基地。

(3)健全区域协同治理与政策支撑体系。川渝两地政府应强化沟通协作，共同编制稀土永磁产业发展与绿色低碳转型的专项规划，统一关键环保标准与准入条件，促进创新要素(人才、资金、数据)跨区域顺畅流动。设立区域绿色产业基金或提供专项财税、金融支持(如绿色信贷、补助)，降低企业尤其是中小企业采用高效永磁技术进行改造的初始成本风险。

(4)加快搭建绿色循环体系。在成渝地区优先布局建设规范高效的稀土永磁材料回收网络与处理中心，探索“生产者责任延伸”等制度，借助政策激励与市场机制推动回收产业发展，力争实现区域内稀土资源“开采-应用-回收-再利用”的闭环流动，最大限度缩减资源环境影响。

(5)构建开放共享的区域产业平台同样关键。例如，联合建设成渝稀土永磁材料检测认证中心、大数据服务平台、人才培育基地等，为产业链各环节企业提供普惠性服务，降低协同成本，提高整体运行效能。

建议的具体跨区域协同的具体实施路径如下。

(1)建立川渝稀土永磁产业协同中心。由两地经信部门牵头，每月召开供需对接会，发布《成渝稀土永磁产业协同指数》(含资源供应、技术匹配、排放强度等多项指标)。

(2)统一环保与技术标准。2026年前实现三项统一，即稀土冶炼废水排放标准(COD≤50 mg/L)、磁体能效等级(参照IEC 60034-30-1)、回收品纯度要求(≥99.9%)，违规企业纳入跨区域联合惩戒名单。

(3)设立“成渝绿色磁材基金”。采用“以奖代补”模式，对跨区域联合研发项目(如低重稀土磁体)给予30%的研发费用补贴，对回收体系建设项目(如重庆-绵阳回收网络)按处理量每吨补贴2 000元。

(4)建设“数字协同平台”。整合攀西稀土开采量、绵阳磁材产量、重庆电机需求等实时数据，运用人工智能(AI)算法或机器学习预测供需缺口(试点显示可降低15%的库存积压)。

4 结论

本文探讨了成渝双城经济圈稀土永磁产业链协同在减污降碳中的重要作用，揭示了稀土永磁材料在绿色低碳转型中的关键地位。研究指出，成渝双城经济圈稀土永磁产业链协同对减污降碳意义重大，明确了该材料在绿色低碳转型中的核心地位。同时显示，强化产业链协同与技术创新，可使稀土永磁材料有效推动低碳转型，优化产业构成，促进绿色发展。尤其是在高效电机、风电和新能源领域，技术创新为减污降碳提供了强有力的支撑。结果显示，稀土永磁材料的技术革新能同步降低能耗、减少污染、提高产品附加价值，是培育新质生产力的有效方式。此外，产业链的协同程度对技术发展的影响意义重大，目前川渝两地在资源、市场、政策上存在天然互补优势，但标准不统一、回收体系不完善仍是主要不足。借助绿电替代、垂直整合、数字回收三条路径，2025年前可使稀土永磁企业的单位GDP碳排放降低，并带动新能源汽车、风电装备产值增长。稀土永磁材料的高效化与低碳化革新(如高丰度稀土磁体、近净成形工艺)能显著降低风电、新能源汽车等关键领域的能耗与碳排放，其磁体性能提升。成渝双城经济圈的低碳转型仍处于起步阶段，稀土永磁材料作为关键支撑要素，在这一进程中具有不可替代的战略价值。若能实现产业链、创新链与政策链的深度协同，该区域的绿色发展实践有望成为中国式现代化在西部区域落地的典型范例。

参考文献

[1] 罗良文，雷朱家华. 中国碳市场政策的减污降碳协同效应[J]. 资源科学，2024，46(1)：53-68.

[2] 陈昆峰，马天宇，王安良，等. 双碳目标下的多尺度稀土新材料研究[J]. 无机盐工业，2021，53(12)：1-13.

[3] 罗立. 稀土材料在能源领域的应用与发展趋势分析[J]. 地质研究与环境保护，2024，3(3)：52-54.

[4] 申璐. 基于专利分析的稀土永磁材料产业发展研究[J]. 科技和产业，2023，23(5)：87-91.

[5] 杨威. 贫镨钕高丰度Ce基磁体相组成、微结构和磁性能研究[D]. 北京：钢铁研究总院，2021.

[6] 雷伟凯，曾庆文，胡贤君，等. 高丰度稀土永磁材料的研究现状与展望[J]. 有色金属科学与工程，2017，8(5)：1-13.

[7] 杨威，李安华，冯海波，等. 双主相(Ce，R)-Fe-B烧结磁体的核壳结构[J]. 中国稀土学报，2021，39(4)：

575-580.
[8] 许旭升. 稀土永磁材料的现状与发展趋势_[J]. 冶金与材料, 2019, 39(5): 178-179.
[9] 程春东. 稀土永磁材料在现代工业中的应用现状与发展趋势[J]. 现代盐化工, 2025, 52(2): 21-23.
[10] 胡伯平, 饶晓雷, 钮萼, 等. 稀土永磁材料的技术进步和产业发展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(9): 653-661.
[11] 马小路, 王志雄, 段彦敏, 等. 高效电机及电机系统推广效果分析[J]. 电气传动, 2022, 52(18): 11-16.
[12] 曹恒佩, 艾萌萌, 王延波. 永磁辅助同步磁阻电机研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4575-4592.
[13] 夏志凌, 胡凯波, 崔娜, 等. 稀土永磁同步电机的节能技术分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 96-97.
[14] 高风平, 吕思一. 中国风电稀土应用及碳减排效应研究[J]. 资源开发与市场, 2024, 40(1): 23-32.
[15] 何琪光. 稀土在新能源汽车中的应用和前景分析[J]. 中国有色金属, 2024(S2): 224-227.
[16] ZHAO L, HE J, LI W, et al. Understanding the role of element grain boundary diffusion mechanism in Nd-Fe-B magnets[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 32(8): 2109529.
[17] LI J, SEPEHRI-AMIN H, SASAKI T, et al. Most frequently asked questions about the coercivity of Nd-Fe-B permanent magnets[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2021, 22(1): 386-403.
[18] 刘仲武, 何家毅, 曾超超, 等. 高性能钕铁硼永磁晶界扩散技术最新进展与未来展望[J]. 磁性材料及器件, 2023, 54(4): 97-106.
[19] JIN J, YAN M, CHEN W, et al. Grain boundary engineering towards high-figure-of-merit Nd-Ce-Fe-B sintered magnets: synergetic effects of (Nd, Pr)Hx and Cu co-dopants[J]. Acta Materialia, 2021, 204: 116529.
[20] XIAO Y. Magnetic domain evolution in sintered dual-main-phase (Nd, Ce)-Fe-B magnet during thermal demagnetization[J]. Materials Letters, 2025, 383: 138041.
[21] SONG X, SUN Q, ZHU M, et al. Strategies for efficient utilization of heavy rare-earth Tb in high-performance Ce magnets with high Ce content[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 8655-8665.
[22] LI F, LI J, REHMAN S U, et al. $Pr_{80}Al_{20}$ surface-coated D_yF_3 modified sintered Nd-Fe-B magnets for large coercivity increment via grain boundary diffusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 899:163270.
[23] XI L, LI A, FENG H, et al. Dependence of magnetic properties on microstructure and composition of Ce-Fe-B sintered magnets[J]. Journal of Rare Earths, 2019, 37(8): 865-870.
[24] 田广科, 陆中砥, 柴培钊, 等. 重稀土晶界扩散工艺制备高矫顽力钕铁硼磁体研究进展与应用现状[J]. 材料导报, 2025, 39(6): 171-176.
[25] HUSSAIN M, LIAO X, AKRAM R, et al. Elevated temperature behavior of rapidly quenched La/Ce substituted nanocrystalline NdFeB alloys with various compositions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845: 156292.
[26] 卢国俭. 抛光粉废料中稀土元素的回收综述[J]. 现代化工, 2024, 44(12): 72-77.
[27] SUGAWARA A, AKASHI T. *In-situ* lorentz and electron-holography imaging of domain-wall propagation and grain-boundary pinning within anisotropic Nd-Fe-B sintered-magnet thin films[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 532: 167903.
[28] BILLINGTON D, OKAZAKI H, TOYOKI K, et al. Relationship between the microstructure, local magnetism and coercivity in Ga-containing Nd-Fe-B sintered magnets[J]. Acta Materialia, 2021, 205: 116517.
[29] SODERŽNIK M, LI J, LIU L, et al. Magnetization reversal process of anisotropic hot-deformed magnets observed by magneto-optical Kerr effect microscopy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 51-59.
[30] CHOUHAN R K, PATHAK A K, PAUDYAL D. Understanding the origin of magneto-crystalline anisotropy in pure and Fe/Si substituted SmCo5[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 522: 167549.
[31] DAS B, CHOUDHARY R, SKOMSKI R, et al. Anisotropy and orbital moment in Sm-Co permanent magnets[J]. Physical Review B, 2019, 100: 024419.
[32] SKOMSKI R, COEY J M D. Magnetic anisotropy: how much is enough for a permanent magnet? [J]. Scripta Materialia, 2016, 112: 3-8.
[33] 朱明刚, 李卫. 中国稀土永磁科技及产业发展现状与出路[J]. 稀土信息, 2016(10): 10-13.
[34] 2023年中国稀土永磁材料产业分析报告[J]. 稀土信息, 2024(4): 20-27.
[35] 陈红霞, 张怡林, 吴彤. 成渝地区双城经济圈制造业空间格局演变与产业协同发展研究[J]. 改革与战略, 2025, 41(3): 232-244.
[36] 朱冰妍. 人才赋能成渝地区双城经济圈新质生产力发展的路径探索[J]. 新西部, 2025(6): 91-96.
[37] 游曼淋. 成渝地区双城经济圈产业协同发展综合测评及对策研究[J]. 湖北经济学院学报, 2023, 21(2): 103-111.
[38] 重庆市人民政府办公厅 四川省人民政府办公厅关于印发《成渝地区双城经济圈碳达峰碳中和联合行动方案》的通知[EB/OL]. [2025-07-20]. https://www.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/szfwj/zfbgtwj/202202/t202202 28_10466020.html.
[39] 中共中央 国务院印发《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》[EB/OL]. [2025-07-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649727.htm.
[40] 四川省人民政府关于印发《四川省"十四五"节能减排综合工作方案》的通知[EB/OL]. [2025-07-15]. https://

www. sc. gov. cn/10462/zfwjts/2022/7/21/54cc17aea9164de6a57b361367782cf5. shtml.

[41] 重庆市经济和信息化委员会 重庆市发展和改革委员会 重庆市生态环境局关于印发《重庆市工业领域碳达峰实施方案》的通知[EB/OL]. [2025-07-15]. https://jjxxw.cq. gov. cn/zwgk _ 213/zcwj/qtwj/202301/t20230129 _ 11542161. html.

[42] 四川省经济和信息化厅，四川省发展和改革委员会，四川省科学技术厅，四川省自然资源厅，四川省生态环境厅. 关于促进四川省稀土产业高质量发展的实施意见[EB/OL]. [2025-07-15]. https://jxt. sc. gov. cn/scjxt/jxtzcwj/2023/1/19/a63fd205ae1a4ee5b0cac10ea52e12f8. shtml.

[43] 李优树，冯秀玲. 成渝地区双城经济圈产业协同发展研究[J]. 中国西部，2020(4)：35-45.

[44] 赵鸿滨，周旗钢，李志辉，等. 面向新兴产业和未来产业的新材料发展战略研究[J]. 中国工程科学，2024，26(1)：23-34.

[45] 杨丹辉，高风平，刘思艺，等 地缘政治与战略资源产业链重构——以关键稀土矿产和材料为例[J]. 中国人口·资源与环境，2024，34(5)：19-32.

[46] 胡萌，伍雅思，常娇娇. 降碳减污协同效应：区域差异与协调路径[J]. 环境经济研究，2023，8(4)：191-208.

[47] 何胜峰. 自动化生产线中电机驱动系统的优化配置与节能分析[J]. 电气工程与自动化，2025，4(1)：59-62.

[48] 张哲华，王莹，孙博学，等. 基于生命周期评价的典型稀土磁性材料碳排放与节能降碳协同路径研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2025(6)：47-56.

Synergistic Pollution and Carbon Reduction Pathways for the Rare-earth Permanent-magnet Industry Chain in the Chengdu-Chongqing Economic Circle

XIAO Yifei[1]，YANG Wei[2]，HUANG Siqi[1]，WEI Ying[1]，ZHOU Siyan[1]，YANG Han[1]

(1. School of Engineering and Materials，Tianfu College of SWUFE，Mianyang 621050，China；
2. Mianyang Giastar Permanent Magnet Materials Co. Ltd.，Mianyang 621050，China)

Abstract：Focusing on the synergy of the rare-earth permanent magnet industry chain in the Chengdu-Chongqing Economic Circle，the functions and specific application paths of rare earth permanent magnet materials in the process of pollution reduction and carbon emission reduction were analyzed. The applications in high-efficiency motors，wind power and new energy sectors were explored by discussing their characteristics and development trends. The actual contribution of technological innovation to pollution reduction and carbon emission reduction were evaluated. It is considered that the industrial chain synergy mechanism is key to promoting green and low-carbon transformation，with more prominent roles in technological innovation and industrial upgrading. It is suggested that the Chengdu-Chongqing region needs to strengthen industrial chain cooperation and technological innovation to achieve low-carbon transformation in the future，setting an example for national green development.

Keywords：Chengdu-Chongqing economic circle；rare-earth permanent magnet；pollution reduction and carbon emission reduction；regional coordination