

稀土资源开发生态环境成本核算研究：方法与实证

THE ECOLOGICAL ENVIRONMENT COST ACCOUNTING OF
THE DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF RARE EARTH RESOURCES:
METHOD AND EMPIRICAL

葛察忠 张安文 董战峰 璩爱玉 曾贤刚 王爱云 程翠云 / 著



环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

稀土资源开发生态环境成本核算研究： 方法与实证

葛察忠 张安文 董战峰 璩爱玉 著
曾贤刚 王爱云 程翠云

中国环境出版集团·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

稀土资源开发生态环境成本核算研究: 方法与实证/
葛察忠等著. —北京: 中国环境出版集团, 2017.12

ISBN 978-7-5111-3476-9

I. ①稀… II. ①葛… III. ①稀土金属—矿产资
源开发—生态环境—成本计算—中国 IV. ①F426.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 325471 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 葛 莉
责任校对 任 丽
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (第二分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2018 年 3 月第 1 版
印 次 2018 年 3 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 10.5
字 数 196 千字
定 价 40.00 元



【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编著委员会名单

顾 问：黄润秋

组 长：邹首民

副组长：王开宇

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

本书项目技术组

项 目 名 称：稀土资源开发生态环境成本核算技术与环境损失评估

项目负责人：葛察忠

技术组组长：董战峰

项目组成员（以姓氏拼音拼序）：

陈占恒	程翠云	韩晓英	李红祥	李 平	李瑞萍
刘一力	李振民	龙 凤	马国霞	宁 佳	牛京考
彭 菲	秦昌波	璩爱玉	王爱云	王小君	吴 琼
杨威杉	於 方	虞慧怡	张安文	曾贤刚	赵学涛
周夏飞	朱文泉				

总 序

目前，全球性和区域性环境问题不断加剧，已经成为限制各国经济社会发展的主要因素，解决环境问题的需求十分迫切。环境问题也是我国经济社会发展面临的困难之一，特别是在我国快速工业化、城镇化进程中，这个问题变得更加突出。党中央、国务院高度重视环境保护工作，积极推动我国生态文明建设进程。党的十八大以来，按照“五位一体”总体布局、“四个全面”战略布局以及“五大发展”理念，党中央、国务院把生态文明建设和环境保护摆在更加重要的战略地位，先后出台了《环境保护法》《关于加快推进生态文明建设的意见》《生态文明体制改革总体方案》《大气污染防治行动计划》《水污染防治行动计划》《土壤污染防治行动计划》等一批法律法规和政策文件，我国环境治理力度前所未有，环境保护工作和生态文明建设的进程明显加快，环境质量有所改善。

在党中央、国务院的坚强领导下，环境问题全社会共治的局面正在逐步形成，环境管理正在走向系统化、科学化、法治化、精细化和信息化。科技是解决环境问题的利器，科技创新和科技进步是提升环境管理系统化、科学化、法治化、精细化和信息化的基础，必须加快建立持续改善环境质量的科技支撑体系，加快建立科学有效防控人群健康和环境风险的科技基础体系，建立开拓进取、充满活力的环保科技创新体系。

“十一五”以来，中央财政加大对环保科技的投入，先后启动实施水体污染控制与治理科技重大专项、清洁空气研究计划、蓝天科技工程专项等专项，同时设立了环保公益性行业科研专项。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行

业科研专项紧密围绕《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》《国家创新驱动发展战略纲要》《国家科技创新规划》和《国家环境保护科技发展规划》，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 479 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、化学品、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，已验收的项目中，共提交各类标准、技术规范 1232 项，各类政策建议与咨询报告 592 项，授权专利 626 项，出版专著 367 余部，专项研究成果在各级环保部门中得到较好的应用，为解决我国环境问题和提升环境管理水平提供了重要的科技支撑。

为广泛共享环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，不断提高环境治理能力现代化水平，为持续改善我国环境质量提供强有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长
黄润秋

前 言

稀土是世界公认的发展高新技术、国防尖端技术的战略资源，是 21 世纪新材料的宝库，其重要性越来越明显。我国是世界稀土资源最丰富的国家，也是世界上唯一能够大量供应不同等级、不同品种稀土产品的国家。我国已成为世界稀土生产、消费和出口的第一大国，在国际上具有举足轻重的地位。但是这一相对优势却是建立在高环境成本代价、低资源价格及浪费型开采基础上的，我国远未成为稀土高技术产业的强国。要将我国的稀土资源优势转化为技术和经济优势，实现我国从稀土生产大国到稀土产业强国的跨越发展，必须重视开展稀土产业发展的基础理论以及关键技术方法研究，建立科学的稀土资源可持续开发利用技术和管理体系。其中，建立国家稀土资源开发的生态环境成本核算技术体系，系统评估我国稀土资源开发的生态环境影响，并制定实施相关的调控政策是我国稀土产业可持续发展战略的必然选择，是实现我国从稀土生产大国到稀土产业强国的跨越发展，推动稀土产业绿色发展转型、提高国际产业竞争力的迫切需要。

本书是环保公益性行业科研专项项目“稀土资源开发生态环境成本核算技术与环境损失评估”的主要研究成果。根据实地调研、专家咨询并结合文献调研等，评估了我国稀土资源开发对生态和环境的影响，系统总结了国际上广泛采用的资源与环境经济核算的主要方法体系，结合国内外资源环境经济核算经验和我国稀土资源开发特点，构建了稀土资源开发生态环境成本核算总体框架，采用治理成本法和污染损失法分别核算包头轻稀土资源、赣州中重稀土资源开发生态环境成本，最后提出了稀土资源可持续开发利用建议。全书共分为 8 章内容。

第 1 章稀土资源开发及利用状况。概括介绍了稀土元素及其应用领域和产业链、全球稀土资源开发现状、我国稀土资源分布及开发现状等。

第2章资源开发生态环境成本核算研究进展。通过梳理 SEEA2003、NAMEA、SERIEE 和绿色 GDP 等综合资源与环境经济核算体系和能源电力、交通、煤炭、矿山开发等行业资源与环境经济核算方法,评估了国内外资源环境经济核算方法的最新研究与实践进展,系统总结了国际上广泛采用的资源与环境经济核算的主要方法。

第3章稀土资源开发生态环境成本核算框架。结合国内外资源环境经济核算经验和我国稀土资源的资源特性、开发水平、生产工艺等不同特征,以及可能造成的生态破坏和环境污染类型,确定了我国稀土资源开发生态环境成本核算目标,提出生态环境成本核算的关键技术指标,构建了稀土资源开发生态环境成本核算的总体框架,明确了主要核算内容、核算方法以及核算步骤。

第4章稀土资源开发生态环境实物量核算。分别就水污染、大气污染、固废污染以及生态破坏确定了实物量核算方法。

第5章稀土资源开发生态环境价值量核算。基于治理成本法和污染损失法分别就水污染、大气污染、固废污染以及生态破坏确定了价值量核算方法。

第6章轻稀土资源开发生态环境成本核算:包头市。全面分析了包头市稀土资源开发对生态环境的影响,根据包头轻稀土资源开发的特点,结合第3章提出的核算方法和框架对包头稀土开发利用进行污染物实物量核算和环境污染价值量核算。

第7章中重稀土资源开发生态环境成本核算:赣州市。全面分析了赣州市稀土资源开发对生态环境的影响,根据赣州中重稀土资源开发的特点,结合第3章提出的核算方法和框架对赣州稀土开采阶段生态破坏损失、环境污染损失以及冶炼分离阶段的环境污染损失进行核算。

第8章结论与展望。构建了稀土资源开采和冶炼的生态破坏损失和环境污染损失核算框架,为开展其他矿产资源开发的生态环境损失核算提供基本的方法体系。通过稀土资源开发生态环境成本核算,包头、赣州稀土开发环境成本均呈上升趋势,建议按照市场化的原则加快推进稀土定价机制改革,使稀土开采中的资

源折耗成本与生态环境外部成本在稀土资源的价格中充分显现。

项目的实施过程中,得到了环境保护部科技司以及政法司的大力支持,赣州市环保局、包头市环保局等单位对调研工作给予了大力支持,在此表示感谢!本项目由中国稀土学会、国土资源部中国地质科学研究院、中国人民大学等单位共同承担,在此对所有参与单位的专家表示衷心的感谢!特别感谢中国环境出版集团对出版工作的大力支持,高效的编辑工作为本书的顺利出版提供了保障。最后,请允许我代表各位作者向所有为本书出版做出贡献和提供帮助的朋友和同仁一并表示衷心的感谢!

希望本书的出版会对国内高校院所从事稀土资源可持续开发利用以及环境管理研究的专家学者、有关政府部门管理人员,以及相关专业的博士研究生、硕士研究生和本科生提供参考。此外,要说明的是,由于编者水平有限,难免存在不足之处,恳请广大同仁和读者批评指正!

葛察忠

2017年11月13日

目 录

第 1 章 稀土资源开发及利用状况	1
1.1 稀土资源及其应用	1
1.2 我国稀土资源概况与开发现状	6
第 2 章 资源开发生态环境成本核算研究进展	15
2.1 资源与环境经济核算研究进展	15
2.2 行业资源与环境经济核算研究进展	20
第 3 章 稀土资源开发生态环境成本核算框架	24
3.1 核算目标	24
3.2 主要内容	25
3.3 核算方法	27
3.4 核算步骤	34
第 4 章 稀土资源开发生态环境实物量核算	37
4.1 稀土资源开发水污染实物量核算	37
4.2 稀土资源开发大气污染实物量核算	40
4.3 稀土资源开发固体废物实物量核算	53
4.4 稀土资源开发生态破坏实物量核算	53
第 5 章 稀土资源开发生态环境价值量核算	55
5.1 稀土资源开发水污染价值量核算	55

5.2 稀土资源开发大气污染价值量核算..... 57

5.3 稀土资源开发固体废物价值量核算..... 61

5.4 稀土资源开发生态破坏价值量核算..... 63

第 6 章 轻稀土资源开发生态环境成本核算：包头市 72

6.1 稀土资源开发利用现状 72

6.2 稀土资源开发生态环境影响 80

6.3 稀土资源开发生态环境成本核算方法..... 88

6.4 环境成本核算结论 91

6.5 稀土资源开发生态恢复对策与措施..... 100

第 7 章 中重稀土资源开发生态环境成本核算：赣州市..... 103

7.1 稀土矿产资源开发利用现状 103

7.2 稀土矿产资源开发生态环境影响..... 111

7.3 稀土资源开发生态环境成本核算方法..... 119

7.4 环境成本核算结论 123

7.5 稀土资源开发污染修复与生态恢复对策..... 135

第 8 章 结论与展望 141

8.1 主要结论 141

8.2 展望与建议 143

参考文献 145

第 1 章

稀土资源开发及利用状况

1.1 稀土资源及其应用

1.1.1 稀土元素介绍

稀土是门捷列夫元素周期表中第三副族中原子序数从 57 到 71 的 15 个镧系元素和另外两个与其电子结构和化学性质相近的钪、钇元素，共 17 个元素的简称。15 个镧系元素包括镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、镱、铈、铉、铊、铋、镱、镱。稀土元素具有独特的物理和化学性质，不仅被广泛应用于冶金机械、石油化工、玻璃陶瓷、农业、轻工、纺织等传统领域，而且日益广泛地应用于航空航天、电子信息、新材料、新能源、生物医药、高端装备制造等高新技术产业。

稀土元素因具有独特的光、电、磁及化学性能，被称为 21 世纪新材料的宝库。由于供应来源有限、全球市场容量小、代用程度低、军需程度高以及地缘政治风险等原因，被许多国家列为战略资源，在国民经济和现代科学领域得到重要应用。2006 年美国国防部公布的 35 种高技术元素中，包括除铪以外的 16 种稀土元素，占全部高技术元素的 45.7%，而日本科技厅选出的 26 种高级元素中，16 种稀土元素包括在内，占 61.5%。世界各国重视开展稀土功能材料的应用研究，几乎每 3~5 年就有一次稀土新材料应用的新突破。

1.1.2 稀土应用领域

稀土的应用领域，国内一般分为传统领域和新材料领域。稀土传统应用领域包括：

冶金/机械、石油/化工、玻璃/陶瓷、农业/轻工/纺织等。稀土新材料领域包括：稀土永磁材料、稀土发光材料、稀土抛光材料、稀土催化材料、稀土储氢材料等。

(1) 稀土在传统领域中的应用

近年来，稀土在冶金/机械、石油/化工、玻璃/陶瓷、农业/轻工/纺织等传统领域中的用量，整体上呈稳步增长趋势，但是由于稀土在新材料领域中应用的快速增长，其应用比例呈快速下降趋势。

1) 在冶金/机械领域中的应用

在冶金过程中用稀土金属或合金脱氧、脱硫，能起到净化和调质作用。用于稀土金属的高活泼性，能脱去金属液中的氧、硫等，能净化金属液，控制硫化物及其他化合物形态，起到变质、细化晶粒和强化基体等作用。因此，可利用混合稀土金属、稀土硅化物及稀土有色金属中间化合物等来炼制优质钢、有色金属及合金材料等。稀土加入各种铝合金或镁合金中，用以制造轮船引擎上的叶轮、飞机及汽车发动机和导弹上的部件；在铝铅合金加入适当的稀土可以提高电缆的抗拉强度和耐磨性，而不降低其导电性。

2) 在石油/化工领域中的应用

石油化工中稀土主要用于裂化催化（FCC）领域，用来提高催化剂的活性和稳定性，提高原料油裂化转化率，增加汽油和柴油的产率。我国约 80%的成品汽油和 35%的成品柴油均产自裂化催化装置。稀土助剂应用于石油催化裂化催化剂中，可显著改善催化剂的活性和结构稳定性，提高汽油产率和燃烧质量，改善催化剂的硫转移活性，从而减少石油催化裂化过程中二氧化硫的排放，降低燃油中的硫含量。此外，稀土催化剂在甲烷化工、合成气化工、甲醇化工等行业具有重要应用。

3) 在玻璃/陶瓷领域中的应用

稀土玻璃主要是指含有稀土氧化物的硼酸盐和硅酸盐系统的光学玻璃。光学玻璃要求高度透明、均匀、高折射率、无色散，稀土元素（镧、钇、铈等元素）对玻璃的光学特性会产生很大的影响，因而稀土元素在光学玻璃中不可或缺。随着稀土应用研究的不断深入，应用范围日益扩大。除稀土光学玻璃之外，稀土另外在着色感光玻璃、光敏微晶玻璃、旋光玻璃、光致变色玻璃、红外玻璃、有色玻璃、防辐射及耐辐射玻璃等多种新型光功能玻璃中都起着十分重要的应用。

陶瓷材料一般分为传统陶瓷和精细陶瓷，精细陶瓷是高纯度天然无机物或人工合成的无机化合物，具有其他材料通常不能达到的某些特殊功能。将稀土元素添加于陶瓷材

料中,能使其特性大幅度改善。精细陶瓷可分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类,稀土结构陶瓷主要是在大规模集成电路、高温燃气机,陶瓷发动机和高温轴承等高新技术应用的结构材料;稀土功能陶瓷主要应用于陶瓷电容器、导电陶瓷、电光陶瓷、可变电阻、燃料电池、光纤通信器材、传感器、护目镜、微波滤波器、谐振器等。

4) 在农业/轻工/纺织领域中的应用

目前稀土在农业中的应用有农用产品、饲料等。稀土在轻工及纺织中的应用有合成树脂、橡胶催化剂、纤维助染剂、塑料热稳定剂、加工改性剂、成核剂、转光剂等。

(2) 稀土在新材料领域中的应用

近年来,由于低碳经济的快速发展,稀土在新材料领域的发展及应用增长十分迅速,应用量所占比重迅速提高。

1) 稀土永磁材料

自被发现的30年以来,钕铁硼一直是当今世界上磁性最强的永磁材料。由于制备方法不同(或用途不同),钕铁硼材料主要分为烧结钕铁硼磁体和黏结钕铁硼磁体两大类。我国经过近30年的发展,钕铁硼产量已经由最初的年产十几吨,发展到2012年毛坯产量7.0万t,占全球总产量(8.72万t)的80.3%。

钕铁硼永磁材料已经广泛应用于电子信息、汽车工业、医疗设备、能源交通等众多领域。钕铁硼材料是支撑整个绿色能源等战略性新兴产业的核心材料,对建立完整的低碳减排绿色产业链具有长远的战略意义。未来随着各国对新能源和节能环保项目的大力推动,稀土永磁在风电和电动汽车的用量还在持续增长,因此未来稀土在永磁方面的应用有很大的发展空间。

2) 稀土发光材料

稀土发光材料(荧光粉)是高清显示和节能照明等器件的关键支撑材料之一。节能照明领域目前主要包括三基色节能灯照明、半导体照明(发光二极管,即LED)以及金卤灯照明,显示领域主要包括液晶显示(LCD)和等离子平板显示(PDP)。从目前我国的应用领域及消费结构看,约90%的稀土发光材料需求来自于节能照明和高清显示行业。

3) 稀土储氢材料

镍氢电池具有环境友好、快速充放电、低成本、宽温区($-40\sim 70^{\circ}\text{C}$)使用的良好特性,且在快速充放电过程中性能相对稳定,在抗震、防水防热、无毒害物质产生方面具有更高安全性,势必在今后的市场中发挥越来越大的作用。

全球 95%以上的镍氢电池产自中国和日本，其中中国储氢合金产量超过全球总产量的 70%。稀土储氢合金目前主要用在镍氢小型电池和镍氢动力电池领域。近年来，在混合动力汽车的快速发展拉动下，稀土储氢材料产量稳步增长。

现有混合动力车（HEV）电池 90%以上的市场份额为镍氢动力电池，前三大 HEV 制造商分别为丰田、本田和现代，三者占据全球市场份额的 90%以上。2012 年 3 月，丰田在中国启动云动计划，加速在中国的事业步伐。在今后的 5~10 年镍氢电池仍是电动汽车用电池的主流，将会以每年 10%左右的速度增长。

4) 稀土催化材料

稀土催化剂在石油化工、机动车尾气净化、催化燃烧、脱硫脱硝、稀土聚合催化以及燃料电池（主要是固体氧化物燃料电池）等具有重要应用。

稀土催化材料的主要作用：①提高催化剂储氧能力；②提高活性金属的分散度，改善活性金属颗粒界面的催化活性；③提高催化材料的热稳定性；④促进水气转化和蒸汽重整反应；⑤提高晶格氧的活动能力；⑥提高催化材料的抗污染能力；⑦稀土易与多种有机、无机官能团形成多价态、多配位数的稀土配合物。

稀土催化剂在机动车尾气净化中的应用增长迅速。近 10 年来，已在全球商业化应用的机动车尾气催化剂产品主要包括汽油车及摩托车用三元催化剂（TWC）、柴油车氧化催化剂（DOC）、柴油颗粒捕集器（DPF）及选择性催化还原催化剂（SCR）、压缩天然气（CNG）、车用尾气净化催化剂（DOC）。据 BASF 公司 2011 年的统计，2010 年机动车催化剂的销售总额达 37 亿欧元。从产品种类看，轻型车催化剂占 80%以上，重型柴油车占 14%左右，其余为摩托车催化剂，而从增长趋势看，重型柴油车催化剂的占比会逐渐增大，而轻型车会相对增长缓慢。

5) 稀土抛光材料

随着我国稀土抛光粉应用市场的发展成熟和生产企业的技术进步，不同应用领域对稀土抛光粉性能指标的要求明显分化，根据不同的质量要求和价格承受力，稀土抛光粉行业将细分为玻璃饰品、触控玻璃、液晶显示玻璃和光学玻璃等几个细分领域。

稀土新材料种类繁多，用途广泛，除以上几类稀土新材料外，还有稀土超磁致伸缩材料、磁致冷材料、稀土磁光储存材料、稀土微波材料、巨磁阻材料、稀土发热材料等。随着科技进步和研究的深入，未来稀土新材料将会不断涌现。

1.1.3 稀土产业链分析

稀土产品包括稀土原材料产品、稀土冶炼加工产品、稀土功能性产品。稀土原材料产品，即稀土采、选产品，包括稀土原矿、稀土精矿、碳酸稀土和氯化稀土等稀土混合物产品。稀土冶炼加工产品指在稀土原材料产品基础上经过分离或进一步加工得到的稀土产品，一般包括单一稀土氧化物、混合稀土氧化物、稀土金属及合金等。稀土功能性产品包括各种功能材料、助剂等，如稀土磁性材料、稀土催化材料、稀土发光材料、稀土储氢材料、稀土抛光材料等，以及稀土高分子助剂及其他助剂等。

因此，根据以上分析，稀土产业链可表示如图 1-1 所示。一般来说，稀土只有经过冶炼分离变成稀土化合物、稀土氧化物、稀土金属或者合金才能用于合成功能性产品。因此，稀土资源开发过程应该包含稀土采、选、冶炼过程。本书所述的全国稀土资源开发生态破坏和环境污染调查，也主要是针对稀土采、选、冶炼过程。

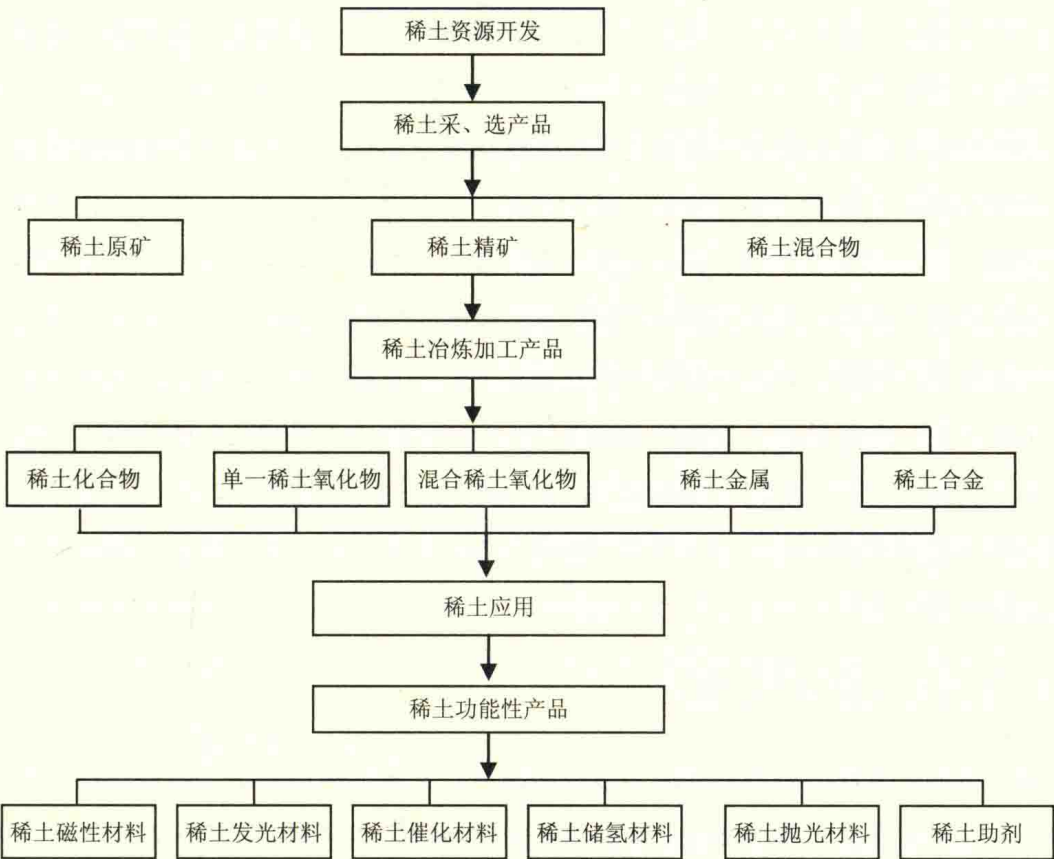


图 1-1 稀土资源开发的产业链