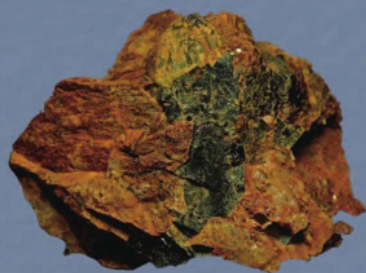



江西省 稀土产业 高质量发展研究

JIANGXISHENG XITU CHANYE
GAOZHILIANG FAZHAN YANJIU



冯雪娇 魏昌婷 著

 江西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

江西省稀土产业高质量发展研究 / 冯雪娇, 魏昌婷
著. -- 南昌: 江西科学技术出版社, 2021.12
ISBN 978-7-5390-7961-5

I. ①江… II. ①冯… ②魏… III. ①稀土金属-有色金属冶金-工业经济-产业发展-研究-江西 IV.
① F426.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 217064 号

国际互联网 (Internet) 地址: <http://www.jxkjcb.com>

选题序号: KX2020092

图书代码: B21186-101

责任编辑: 王凯勋 周楚倩

江西省稀土产业高质量发展研究

冯雪娇 魏昌婷 著

出版发行 / 江西科学技术出版社
社址 / 南昌市蓼洲街 2 号附 1 号
邮编 / 330009
电话 / 0791-86623491
印刷 / 江西骁翰科技有限公司
经销 / 各地新华书店
开本 / 710mm × 1000mm 1/16
印张 / 17.75
字数 / 211 千字
版次 / 2021 年 12 月第 1 版
印次 / 2021 年 12 月第 1 次印刷
书号 / ISBN 978-7-5390-7961-5
定价 / 68.00 元

赣版权登字 -03-2021-361

版权所有 侵权必究

(赣科版图书凡属印装错误, 可向承印厂调换)

技术研发体系。稀土资源高效提取分离技术具有国际领先的水平，独有的采选工艺和先进的分离技术为稀土资源的开发利用奠定了坚实基础。

“十三五”期间，国家政策发挥了协调稀土产业发展与环境保护和资源可持续利用关系的核心作用，并取得了重要成果。以“资源税”和“总量控制”为核心的行业管理体系逐步得到了完善和优化，成为中国由世界稀土制造中心向世界稀土创造中心转变的制度保障。不过，我国稀土产业可持续发展也面临较大挑战：现有开采技术生态破坏严重，环境治理难度大；资源综合利用率低；高端产品不足，产品附加值不高；总体技术水平和工程化水平与国际先进水平仍有较大差距。

2019年5月20日，习近平总书记在江西考察稀土产业时指出：“稀土是重要的战略资源，也是不可再生资源。要加大科技创新工作力度，不断提高开发利用的技术水平，延伸产业链，提高附加值，加强项目环境保护，实现绿色发展、可持续发展。”

因此，在稀土开发利用过程中，资源的合理利用和环境的有效保护是全球面临的共同挑战。近年来，我国在稀土的开采、生产、出口等环节综合采取措施，加大资源和环境保护的力度，促进了稀土行业健康可持续发展。

经过多年努力，我国已成为世界上最大的稀土生产、应用和出口国。当前，稀土行业也亟需加快形成以国内大循环为主体，国内国际双循环相互促进的发展新格局。今后，我国将继续按照世界贸易组织的规则，加强稀土行业的科学管理，向国际大市场供应先进的稀土产品，为世界经济发展和繁荣做出应有的贡献。

本书介绍了国内外稀土资源与储量情况和稀土产业发展基本情况，分析了国内外特别是江西稀土提取与分离的研发情况，重点研究了稀土永磁、稀土催化、稀土发光、稀土储氢、稀土陶瓷、稀土玻璃、稀土抛光粉等稀土新

材料，并对稀土新材料研发现状及前沿研发态势进行了分析，从电子信息、高端设备、医疗卫生、节能环保等方面阐述了稀土终端领域应用。江西省作为我国离子型稀土矿第一大省，本书重点列举了江西省稀土产业发展存在的问题，为江西省稀土产业发展方向和高质量发展提出了一定的建议。

全书分为九个章节。第一章稀土资源与储量；第二章稀土产业发展基本情况；第三章稀土提取与分离科技创新分析；第四章稀土新材料科技创新分析；第五章稀土终端应用；第六章江西省稀土废弃物污染防控与生态修复；第七章江西省稀土产业发展存在的问题；第八章江西省稀土产业发展方向；第九章推进江西省稀土产业高质量发展的建议。

本书是在充分借鉴国内外同行相关研究成果的基础上，结合江西省实际资源禀赋情况，提出江西稀土产业如何高质量发展的对策建议，旨在为江西省资源综合开发与利用尽绵薄之力。

本书是中国工程科技知识中心建设项目（CKCEST-2021-2-2）、江西省自然科学基金管理科学类项目（20202BAA208006）和江西省科学院“杰出青年学者”培养计划项目（2020-JCQN-04）的阶段性成果。本书得到中国科学院文献情报中心张超、费鹏飞、徐扬的大力支持和帮助，在此表示感谢。由于作者水平有限，本书还存在一些不足之处，敬请同行专家、学者以及从事科研管理实际工作的部门领导不吝指正，以便在今后的研究中不断改进和完善。本书是在借鉴和吸收大量前人研究成果的基础上完成的，在此对相关作者一并致以最诚挚的感谢。

冯雪娇

2021年9月



目录

第一章 稀土资源与储量	1
第一节 全球稀土资源分布与储量	1
第二节 我国稀土资源特点及分布情况	3
第三节 江西省稀土资源概况	6
第二章 稀土产业发展基本情况	9
第一节 全球稀土产业发展概况	9
一、美国稀土产业	11
二、日本稀土产业	18
第二节 中国稀土产业发展概况	24
一、政策	24
二、产业链	25
三、行业整合	29
第三节 江西稀土产业发展现状	32
一、政策	33
二、进口原料情况	34
三、离子型稀土矿山开采工艺	35
四、稀土分离与冶炼	35
五、稀土功能材料及应用	36
六、稀土二次资源回收	39
七、主要平台载体	40



第三章 稀土提取与分离科技创新分析	41
第一节 稀土提取与分离前沿基础研究态势	42
一、全球整体趋势分析	43
二、江西发展情况	53
第二节 稀土提取与分离技术研发态势	60
一、全球整体趋势分析	60
二、江西发展情况	71
第四章 稀土新材料科技创新分析	77
第一节 稀土功能新材料特性	77
一、稀土永磁材料	79
二、稀土催化材料	83
三、稀土发光材料	86
四、稀土储氢材料	89
五、稀土陶瓷材料	92
六、稀土玻璃	93
七、稀土抛光粉	95
第二节 稀土新材料前沿基础研究态势	96
一、全球整体趋势分析	96
二、中国稀土新材料前沿基础研究态势分析	111
三、南方五省、自治区稀土新材料前沿基础研究态势分析	121
第三节 稀土新材料技术研发态势	131
一、全球稀土新材料研发情况	131
二、中国稀土新材料研发情况	144
三、南方五省、自治区稀土新材料研发情况	148

第五章 稀土终端应用	163
第一节 在电子信息领域应用	163
一、稀土永磁材料与电子设备	164
二、稀土发光材料与照明、显示	164
三、抛光材料与电子信息产业	165
第二节 在高端装备领域应用	166
一、稀土永磁与轨道交通	167
二、稀土镁合金与高端装备	169
第三节 在医疗卫生领域应用	170
一、闪烁材料与核医学成像	171
二、稀土永磁与磁共振成像	172
第四节 在节能环保领域应用	174
一、稀土永磁与新能源汽车	175
二、稀土永磁与风电	176
第六章 江西省稀土废弃物污染防控与生态修复	177
第一节 关于稀土工业的法规与标准	177
一、法规	177
二、工业污染物排放标准	178
三、有害废水排放的国家标准	180
四、行业标准	181
第二节 稀土矿山废弃地成因及类型	182
第三节 稀土矿山生态修复技术概述	184
一、改良土壤	184
二、恢复植被	185
三、微生物修复	186
四、工程技术措施	187



五、联合修复技术	187
第四节 生态修复范例——赣南“龙南模式”	188
一、生态恢复前龙南开采稀土矿造成的主要环境问题	188
二、采空矿山的生态复垦技术	189
第七章 江西省稀土产业发展存在的问题	191
第一节 资源开采方面问题	191
一、中重稀土资源供应困难	191
二、稀土生产总量控制计划不匹配	192
第二节 分离与提取、回收方面问题	192
一、企业自动化、智能化水平不高	192
二、产能利用率偏低	192
第三节 新材料开发与应用方面问题	193
一、短板问题依然突出	193
二、成果转移转化率偏低	194
三、科技创新支撑力度偏弱	195
四、科技合作水平偏低	196
第四节 生态环境方面问题	196
一、原地浸矿环境问题日益突出	196
二、稀土矿山恢复治理及污染防治任务艰巨	196
三、离子型稀土矿开采环保标准缺乏	197
第八章 江西省稀土产业发展方向	198
第一节 加快稀土产业数字化转型	198
一、生产装备数字化	199
二、数据平台共享化	199
三、产业链水平现代化	199

第二节 加快稀土高端化应用	200
一、加大创新平台建设力度	200
二、推行人才驱动创新机制	201
三、加强原始创新	201
第三节 推进稀土国际化合作	201
一、加强政府间、企业间的沟通交流	202
二、加强与国际人员交流和稀土科技信息交流	202
三、提升江西省乃至我国企业在国际上的影响力	202
第四节 推进稀土绿色化发展	203
一、矿山治理	203
二、绿色开采	204
三、绿色生产	204
第九章 推进江西省稀土产业高质量发展的建议	205
第一节 资源开采方面	205
一、推进稀土矿山绿色开采	205
二、做强稀土二次回收产业	205
第二节 新材料应用方面	206
一、强化政策引导	206
二、攻克一批补短板技术	206
三、强化稀土材料研究成果转化与技术应用	207
四、开展协同创新、交叉综合性研究	208
第三节 生态环境方面	208
一、定期组织开展行业秩序整顿工作	208
二、推进绿色技术应用	209
三、创新监管方式	209



附件 1 稀土产业链全景图	210
附件 2 稀土永磁材料技术调研报告	211
第一节 前沿态势分析	211
一、国际稀土永磁材料研究前沿态势分析	211
二、中国稀土永磁材料研究前沿态势分析	218
三、江西省稀土永磁材料研究前沿态势分析	227
第二节 研发情况	230
一、国际专利技术分析	230
二、国内专利技术分析	237
三、江西省专利技术分析	241
附件 3 稀土镁合金材料技术调研报告	246
第一节 研究前沿态势分析	246
一、国际稀土镁合金材料研究前沿态势分析	246
二、中国稀土镁合金材料研究前沿态势分析	252
三、江西省稀土镁合金材料研究前沿态势分析	257
第二节 研发情况	258
一、国际专利技术分析	259
二、国内专利技术分析	265
三、江西省专利技术分析	269

第一章

稀土资源与储量

第一节 全球稀土资源分布与储量

稀土是镧系元素和钪、钇等共十七种金属元素的总称，也称为“工业维生素”，是关系到国家安全和发展的—种战略性矿产资源，其本身并不稀少，只是分布极不均匀。

世界稀土资源主要分布在中国、越南、巴西、俄罗斯、印度、澳大利亚、格陵兰岛、美国、南非、加拿大等国家和地区。据2018年美国地质调查局(USGS)公布的数据，世界稀土资源储量见表1-1所示。

表 1-1 世界稀土资源储量统计表

国家 / 地区	REO 储量 / 万吨	占比 / %
中国	4400	33.84
巴西	2200	16.92
越南	2200	16.92
俄罗斯	1800	13.85
印度	690	5.31
澳大利亚	340	2.62

(续表)

国家 / 地区	REO 储量 / 万吨	占比 /%
格陵兰岛	150	1.15
美国	140	1.08
南非	86	0.66
加拿大	83	0.64
其他国家	911	7.01
总计	13000	100.00

数据来源：美国地质调查局，2018，以稀土氧化物（REO）计

据美国地质调查局数据，2018年—2019年世界各国稀土开采量矿物见表1-2所示。

表 1-2 世界各国稀土开采量（万吨）

国家	2018	2019
中国	12	13.2
巴西	0.11	0.1
越南	0.092	0.09
俄罗斯	0.27	0.27
印度	0.29	0.3
澳大利亚	2.1	2.1
美国	1.8	2.6
泰国	0.1	0.18
缅甸	1.9	2.2
布隆迪	0.063	0.06
马达加斯加	0.2	0.2
其他国家	0.006	
总计	19	21.00

数据来源：《美国地质调查，矿物概要》2020年

全球稀土资源的不断开发导致全球稀土产量逐年递增。2018年增幅为28.8%，2019年增幅为11%，增量因素主要为中国增产、美国开采重启、独居石矿增加。按照每年大约消耗20万吨（REO）的静态数据计算，全球稀土储量可供开采数百年。全球稀土供应格局多元化、稀土冶炼分离技术的先进优势使得我国短期内仍然保持全球稀土供应大国的地位。

第二节 我国稀土资源特点及分布情况

我国稀土资源储备世界第一，储量丰富、稀土元素齐全、稀土品位高、分布面广而又相对集中，在全国2/3省（区）均有发现。呈现“北轻南重”的分布特点，北方以轻稀土为主，南方以中重稀土为主，离子型中重稀土则主要分布在江西赣州、福建龙岩等南方地区。我国稀土矿储量及分布情况见表1-3，各主要稀土矿稀土配分如表1-4所示。稀土资源总体分布有以下几个特点：

1. 内蒙古白云鄂博稀土共生矿占我国稀土工业储量的83%左右，是世界第一大稀土矿。铁、稀土、铈、钽、钪及钍的矿物共70余种，其中主矿段平均品位：Fe 35.97%、 RE_2O_3 6.19%、 Nb_2O_3 0.141%、铈储量660万吨，占全国72%，仅次于巴西。

2. 氟碳铈稀土矿占我国稀土工业储量的10%左右，主要分布在四川凉山（2.88%）、山东微山（7.69%）等地。

3. 离子型中重稀土矿（离子型稀土是指以离子形式吸附在矿物上的稀土，如，高岭土、蒙脱土等）占全国的2.9%，其中江西、广东、福建、湖南、广西等5省（自治区）总量就有146.89万吨，占比达99.23%，是离子型稀土矿的集中区；云南省有1.15万吨，仅占0.77%。

我国稀土资源成矿条件十分有利、矿床类型齐全。目前，地质科技工作者已在全国2/3以上的省（区）发现上千处矿床、矿点和矿化地，集中分布在内蒙古的白云鄂博、江西赣南、广东粤北、四川凉山和山东微山等地，形成北、南、西、东的分布格局。

表 1-3 我国稀土矿储量及分布情况

序号	省(自治区)地方	储量/万吨	储量占比
1	包头白云鄂博	3652	83%
2	山东微山	352	8%
3	四川凉山	132	3%
4	南方七省、自治区(广东、广西、江西、福建、浙江、湖南、云南)	132	3%
5	其他	132	3%
	合计	4400	100

数据来源：自然资源部，2018年，以REO计

表 1-4 中国主要稀土矿的稀土配分(以REO%计)

稀土组分	矿物型稀土矿		离子吸附型稀土矿		
	白云鄂博矿	四川氟碳铈矿	信丰型稀土矿	龙南型稀土矿	寻乌型稀土矿
La ₂ O ₃	25.00	29.49	27.66	2.18	17.33
Ce ₂ O ₃	50.07	47.56	3.23	<1.09	47.16
Pr ₆ O ₁₁	5.10	4.42	5.62	1.08	7.33
Nd ₂ O ₃	16.60	15.18	17.55	3.47	18.62
Sm ₂ O ₃	1.20	1.24	4.54	2.34	2.48
Eu ₂ O ₃	0.18	0.23	0.93	<0.37	0.63
Gd ₂ O ₃	0.70	0.65	5.96	5.69	1.55
Tb ₄ O ₇	<0.1 0.01	0.12	0.68	1.13	0.23
Dy ₂ O ₃	0.01	0.21	3.71	7.48	0.60
Ho ₂ O ₃	0.01	<0.1 0.05	0.74	1.60	0.63
Er ₂ O ₃	0.01	0.06	2.48	4.26	0.40
Tm ₂ O ₃	0.01	0.04	0.27	0.60	0.20
Yb ₂ O ₃	0.01	0.05	1.13	3.34	0.64
Lu ₂ O ₃	0.01	0.007	0.21	0.47	0.20
Y ₂ O ₃	0.43	0.7	24.26	64.90	2.55

在我国具有工业应用价值的稀土矿物主要有三种：包头混合型稀土矿、四川氟碳铈矿和南方离子型稀土矿。

我国稀土矿床、矿山基本情况如表 1-5、1-6 所示。稀土矿山主要有内蒙古白云鄂博矿、山东微山矿、四川凉山矿、南方七省离子吸附型稀土矿和海滨砂矿等。内蒙古白云鄂博稀土矿是我国最大的稀土矿山，是氟碳铈矿和独居石的混合矿，早期是作为开采铁矿的伴生矿物回收。四川省冕宁稀土矿资源储量仅次于内蒙古白云鄂博，属典型的北方型轻稀土矿。山东微山湖稀土矿以氟碳铈矿和氟碳钙为主，伴生有重晶石、方解石、石英、萤石等，稀土矿物嵌布粒度较粗，属易选矿石。广东、福建、广西、湖南等地的海滨砂矿伴生独居石矿，广东、广西、江西和河南等地还有磷钇矿。江西、福建、广东、湖南等南方七省区拥有离子吸附型稀土矿，其富含中、重稀土。尤其是江西风化壳淋积型稀土矿是我国特有的一种优势稀土矿种，稀土元素以离子形式吸附在稀土矿物上，稀土配分类型齐全，尤以富含铽、镝、铕、钆等高价的中、重稀土元素为主，是一种易选冶、珍贵的稀土矿。

表 1-5 稀土矿床基本情况

矿床类型	主要矿物组合	典型矿床
白云鄂博型	氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿、铈铁矿、烧绿石等	内蒙古白云鄂博铁-铈-稀土矿
花岗岩型铈、稀土矿床	褐帘石、独居石、褐钇铈矿等	广西贺州姑婆山含褐钇铈稀土矿
花岗伟晶岩型	独居石、黑稀土矿、磷钇矿、褐帘石	广东始兴河口稀土矿
与碱性正长岩有关的热液脉状型	氟碳铈矿、铈铈矿、褐帘石	四川凉山冕宁牦牛坪德昌大陆槽稀土矿、山东微山郗山稀土矿
正长岩-碳酸岩型	独居石、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、烧绿石	湖北竹山庙垭稀土矿
沉积型	独居石、方铈矿	贵州织金县新华含稀土磷矿
风化壳淋积型	——	江西龙南县足洞稀土矿、关西稀土矿、大田稀土矿
残坡积、(河流)冲积及滨海砂矿型	独居石、磷钇矿	广东电白电城冲积砂矿
变质岩型	独居石、磷钇矿、褐帘石	广东五和稀土矿、辽宁翁全沟硼铁稀土矿

表 1-6 稀土矿山基本情况

矿山	基本情况
内蒙古白云鄂博矿	白云鄂博矿是我国最大的稀土矿，是稀土与铁、铈、钍等元素共生的综合矿床，矿石保有量约 7.2 亿吨的混合矿，稀土氧化物（REO）平均品位为 5%。资源优势明显、采选冶炼技术成熟、产业链完整，在利用成本上比其他轻稀土矿山低，但 REO 平均品位并不高
山东微山矿	该矿属于石英-重晶石-碳酸盐稀土矿床，矿物及脉石成分简单，以氟碳铈矿和氟碳钙为主，伴生有重晶石、方解石、石英、萤石等，稀土矿物嵌布粒度较粗，属易选矿石
四川凉山稀土矿	牦牛坪稀土矿为我国第二大稀土资源基地，属典型的北方型轻稀土矿，已探明资源储量为（REO）316 万吨。资源储量大且易采、易选、易冶炼，是目前国内唯一一个能够进行大规模单独开采的稀土矿区。伴生矿丰富，包括重晶石、萤石等
南方七省（自治区）离子吸附型稀土矿	在江西、福建、湖南、广东、广西等地也有稀土矿床的发现，被统称为“南方七省（自治区）稀土矿”，其中，江西地区比较集中、量大，但是资源量相对于稀土集中区要少得多。该矿属于风化壳淋积型稀土矿。该类型矿具有分布面广、储量大、放射性低、开采容易、提取稀土工艺简单、生成成本低、产品质量高等特点

第三节 江西省稀土资源概况

江西省是我国离子型稀土矿第一大省，远景储量约 940 万吨，其中，中、重稀土占全国总量的 80% 左右。2012 年 10 月，南方稀土重要矿产所在地江西赣州获工信部批准，被命名为“稀土王国”。赣州稀土矿区有近 6000 平方千米，其中稀土规划矿区 2534 平方千米。经多年高强度的开采，离子型稀土保有储量下降幅度较大。2019 年中重稀土（折氧化物）保有量为 54.52 万吨，其中极其珍贵的资源重稀土矿（钇组元素占比 > 50%）占总量的 14.25%。赣州重稀土矿资源具有配分类型齐全、高价值元素含量高、放射性低等特点，铽、镝、钕、镨、钇