

稀土资源的全球分布与开发潜力评估

王路¹, 汪鹏^{1,2*}, 王翹楚², 刘颖¹, 张彪³, 陈伟强^{1,2,4*}

1. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341100

2. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

3. 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 包头 014010

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 稀土是重要的战略资源,然而目前全球稀土储量难以满足未来需求,因此寻找和开发潜在的稀土资源迫在眉睫。建立了稀土资源开发潜力评估指标体系并赋予权重,评估了全球稀土资源的分布及开发潜力,得出如下结论:(1) 稀土资源开发潜力评估指标体系由矿产资源开发潜力评估指标体系和政策环境评估指标体系构成,其中前者权重大于后者;(2) 中国是轻稀土储量最多的国家,丹麦(格陵兰)的重稀土储量十分可观;(3) 巴西的Prado矿、南非的Steenkampskraal矿、美国的Pea Ridge矿和俄罗斯的Tomtor矿是全球品位较高的稀土矿;(4) 俄罗斯、丹麦(格陵兰)、澳大利亚、加拿大和美国拥有除中国外最具开发潜力的稀土矿床。面对海外稀土供应潜力的持续提升,中国须加强本国稀土资源的勘查力度,掌握国际稀土产业发展的最新态势,积极谋篇布局,充分利用国外资源并抢占产业的科技制高点,努力保证中国稀土资源的供应安全和产业链优势。

关键词 稀土;远景储量;开发潜力;资源安全

稀土是重要的战略资源,也是不可再生资源^[1]。由于具有优良的光、电、磁等物理特性,能与其他材料组成性能各异、品种繁多的新型材料并大幅度提高其他产品的质量和性能,稀土成为支撑高科技发展必不可少的关键原材料,被誉为“新材料之母”^[2]。随着应用领域的不断扩展,全球稀土需求快速增

长。据统计,全球稀土资源的缺口每年都在10%以上且还在进一步扩大^[3-5]。截至目前,中国仍然是全球稀土储量最丰富、元素种类最齐全、稀土产品供给量最大的国家。但是,由于中国稀土资源的快速消耗,其在全球总储量中的占比逐渐下降^[6-7]。随着澳大利亚、美国、缅甸等国家稀土开采及冶炼

收稿日期:2022-02-09;修回日期:2022-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(42061049,52000168);中国科学院赣江创新研究院自主部署项目(E055B004);中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2021-3);国家重点研发计划项目(2020YFC1909101)

作者简介:王路,副研究员,研究方向为关键金属资源环境战略,电子信箱:lwang@gia.cas.cn;汪鹏(通信作者),副研究员,研究方向为金属-能源关联系统建模与分析,电子信箱:pwang@iue.ac.cn;陈伟强(共同通信作者),研究员,研究方向为环境系统工程、资源安全与可持续发展战略,电子信箱:wqchen@iue.ac.cn

引用格式:王路,汪鹏,王翹楚,等. 稀土资源的全球分布与开发潜力评估[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 27-39; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.08.003

规模的扩大,稀土产品全球供应的多元化格局逐渐形成,中国稀土资源和产品供应的全球占比也不断下降^[8]。

目前,全球许多国家重启或开始进行稀土资源的勘查工作,且中国之外的稀土企业产能正不断增加。在资源勘查方面,2011年后全球有超过200家专业勘探公司开始寻找潜在的稀土资源,中国以外的稀土储量在这之后的几年时间里翻了一番^[9],中国稀土储量也由最多时的全球占比71%降至目前的37%^[10],这些新增储量主要来自于澳大利亚、加拿大、丹麦(格陵兰)还有非洲的一些国家^[6]。在冶炼分离方面,2016年之前西方国家稀土产量仅占全球20%以下,2017年之后随着美国、澳大利亚等国新增产能的释放,西方国家稀土产量占比有所上升并在2018年之后升至30%。2019年(受新冠疫情影响,2020年及2021年的统计数据误差较大)中国稀土矿产量13.2万t,占全球的63%,美国、缅甸、澳大利亚分别占比12%、11%、10%^[6]。

随着国外稀土储量的不断增加以及产能的不断扩大,严重威胁到中国稀土产业在全球的战略地位。因此不仅要加大国内稀土资源的勘探和开发力度,还要加强对海外稀土产业的投资力度。随着中国“一带一路”倡议的实施,与沿线国家的合作不断加强,这为利用国外稀土资源,巩固和加强本土稀土产业的国际地位提供了契机。本研究拟梳理全球主要稀土矿分布及现状,对其开发利用潜力加以科学评估。

1 数据来源与评估方法

1.1 数据来源

研究数据由一手数据和二手数据组成。一手数据来自于官方和稀土矿运营公司披露的稀土矿信息,主要有政府勘探报告、公司年报、公司网站公开信息等。二手数据主要来自于:(1)个人或机构的研究成果,例如文献资料、商业数据库、券商报告、咨询公司报告等;(2)新闻报道。为确保数据准确,研究主要选取一手数据。对没有一手数据的稀土矿点,通过对不同来源获得的同一矿点数据进

行比对,互相验证,从而得到目前最新的、较可靠的数据。

1.2 评估方法

指标体系:参考弗雷泽研究所(Fraser Institute)2021年2月23日发布的采矿和勘探公司年度调查的结果《Survey of mining companies 2020》^[11]所指出的:矿产开发潜力主要由矿产本身的地质和经济因素决定,但一个地区的政策环境也是矿产开发潜力的一个重要的考虑因素。基于此,本研究将稀土资源开发潜力评估体系设定为由矿产资源潜力评估指标体系和政策环境指标体系构成(表1)。

表1 稀土资源开发潜力评估指标体系及权重分配

一级指标	二级指标	三级指标	文献
矿产资源 潜力	资源禀赋	储量	[12]
		品位	[12]
		类型	[12]
	资源价值	单价	[13]
		总价	[13]
		不确定性和宏观经济稳定性	[14]
政策环境 评估	先决条件	财务结构和发展	[14]
		公共治理	[14]
		商业环境	[14]
	潜在因素	市场准入、规模和潜力	[14]
		人力和自然资源	[14]
		成本构成	[14]
		物流绩效	[14]
差异化和 集聚经济	跨国公司和双边投资协定	[14]	
	创新与差异化	[14]	

矿产资源潜力评估包括资源禀赋以及资源价值评估。资源禀赋参考徐曙光等(2016)^[12]提供的指标体系,稀土资源价值评估以美国清洁能源制造分析中心(Clean Energy Manufacturing Analysis Center, CEMAC)2020年发布的《关键材料供应分析报告》中估算的全球稀土矿单位氧化物价格为依据赋值^[13];政策环境指标体系按照2020年全球对外直接投资国家吸引力指数(Global Foreign Direct Investment Country Attractiveness Index, GFICA)赋值^[14]。

GFICA指数根据先决条件、潜在因素、差异化和集聚经济3大因素分类,有60种不同的具体指

标。先决条件包括宏观经济稳定性、金融结构与发展、公共治理和营商环境等23个不同的子指标;推动投资的潜在因素包括市场准入和市场潜力、人力和自然资源、成本构成、有形基础设施等27个被认为是探索跨国企业对外投资的关键决策因素;差异化和集聚经济包括跨国公司数量、市场成熟度、专利申请数量等10个不同的因素作为差异化和集聚经济影响因素^[14]。

GFICA 指数所用数据库包括但不限于 CEPII 的 GeoDist 数据库、世界银行的 WDI 数据库、DGTPE-法国的机构概况数据库、世界银行的全球治理指标、Conference Board Total Economy Database、WIPO 数据库、UNCTAD STAT 数据库、WTO 数据库、ILO-KILM 数据库、世界交易所联合会数据库、IMF 的 CDIS、DOTS、FAS、IFS 和 WEO 数据库。所使用的指数计算方法可分为4个步骤:一致性分析、归一化、加权和聚合^[14]。

指标权重:根据弗雷泽研究所(Fraser Institute)2021年的研究结果^[11],矿产开发潜力中矿产资源潜力占到开发潜力评估的60%,政策环境占到开

发潜力评估的40%;根据徐曙光等(2016)的研究结果^[12],矿产资源潜力占到开发潜力评估的70%,其余因素占到30%。由于二者相差不大,因此本次研究选取2项研究成果折中考虑,即矿产资源潜力占到开发潜力评估的65%,政策环境占到35%。

潜力得分:根据已确定的稀土资源开发潜力评估指标体系,以及各影响因素的权重,计算全球各稀土矿点开发潜力综合得分。计算公式为

$$Q_1\omega_1+Q_2\omega_2+\dots+Q_n\omega_n=M$$

式中, Q_n 为稀土矿开采潜力影响因素; ω_n 为权重; M 为综合得分。

2 全球主要稀土矿远景储量分析

2.1 全球稀土矿点信息梳理

据统计,目前全球正在开发的稀土矿约600多个(图1),主要分布在亚洲、美洲和非洲^[7]。中国、美国、澳大利亚、加拿大、巴西和俄罗斯是拥有稀土资源储量及矿点数量较多的国家。



全球稀土资源分布及远景储量信息主要通过政府报告、文献资料、新闻报道等方式获得^[15-74]

图1 全球稀土资源分布及远景储量

中国稀土资源丰富,呈现“北轻南重”的特点^[8]。轻稀土矿以包头白云鄂博矿、山东微山矿和四川牦牛坪矿为代表,这3个矿的轻稀土储量占全国轻稀土总储量的94%以上^[8];中重稀土矿分布在江西、

广东、福建、广西、湖南、云南、浙江等南方省份,其中以江西赣州的离子型稀土矿储量最多,占该类矿床总储量的1/3以上^[9]。目前,中国2/3以上省(区)发现了稀土资源,累计矿床、矿(化)点千余处^[75]。

美国轻、重稀土资源也较为丰富。目前以 Mountain Pass 矿为代表的轻稀土矿和以 Round Top 为代表的重稀土矿分别处于运营状态和试生产阶段,其他已知矿床处于勘探或规划中。美国地质调查局(USGS)、美国国家地质学家协会(AASG)和其他联邦、州、私营部门组织合作,在2019年2月启动了新的“地球填图倡议”^[76],在全国范围内寻找稀土等关键矿产的重点潜力区,鼓励关键矿产勘探,未来美国稀土总储量和矿点数量都将逐渐增多。

澳大利亚是仅次于中国的目前世界第2大稀土矿产品出口国,其主要出口的稀土矿产品是由莱纳斯公司的 Mount Weld 矿生产的轻稀土产品,年产量约2万t,预计产量还将继续增加。2018年澳大利亚北方矿业公司开发的 Browns Range 矿首次进行试生产,该矿是目前除中国以外重要的以高品位镨、铽为主的重稀土磷钇矿。目前北方矿业公司还在对该矿深部及周边稀土资源进行勘查,预计可将矿山服务年限增加20年或翻倍^[77]。未来澳大利亚轻、重稀土资源储量和产量都将不断上升。

加拿大目前拥有许多正在勘探的稀土项目,但还没有形成有效产能。根据最新的勘探报告显示,加拿大的稀土资源非常丰富,预估稀土氧化物总量可达1500万t。Strange Lake、Nechalacho、Foxtrot 等稀土矿储量都很丰富,具有很高的开采价值。稀土开发商 Vital Metals 已与加拿大当地的 Det'on Cho Nahanni Construction 公司签署了一份采矿协议,目前已经在 Nechalacho 矿开展采矿前的准备工作^[78]。

巴西轻、重稀土资源潜力很大。Araxá 稀土矿是以碱性碳酸盐岩为主的轻稀土矿床,是巴西最先进的稀土项目,稀土品位4%,年产稀土氧化物约700t。据 BNamericas 网站报道,目前巴西矿业公司塞拉贝尔德(Serra Verde)已投资1.5亿美元在戈亚斯州的米纳苏市建设了一座稀土选矿厂,该厂主要生产重稀土产品。随着新勘探和开发项目的部署,巴西的稀土储量和产量还将继续增加^[79]。

2013年,俄罗斯巨头亚历山大·涅墨西斯控股的 ICT 集团,协同俄罗斯国有企业 Rostec 公司出资10亿美元,共同开发位于雅库特地区的俄罗斯最大稀土矿——Tomtor。虽然俄罗斯稀土储量丰富

但品位较低,且很多矿点位于没有进行基础设施建设的地区,开采条件不足。因此,目前 Tomtor 稀土矿尚未进行开采。2019年,俄罗斯政府将稀土开采税从8%降低到4.8%,期望利用这一举动激励企业的稀土开发热情^[80]。

此外,西方国家关注的丹麦(格陵兰)Kvæn-fjeld 矿储量也非常丰富。该矿包含几个富含稀土、铀和锌的大型多元素矿床,重稀土比例很高,但由于当地民众环保呼声较高,政府尚未进行开采。越南和缅甸一直以来都是中重稀土资源储量较多的国家,也是向中国出口中重稀土资源最多的国家,但由于国内政局不稳,加上常年的私挖乱采,导致储量急剧下降^[81]。非洲布隆迪的 Gakara 矿是非洲唯一正在开采的轻稀土矿,产量在逐年上升。

2.2 全球稀土矿远景储量分析

2.2.1 稀土总储量分析

由于世界各国稀土矿勘查阶段不同,已公布的稀土储量核算标准也不同,因此本研究通过收集已公开的全球稀土矿点资料,以远景储量为统计标准,从资料中筛选出全球稀土矿点远景储量信息,再以中国稀土矿的稀土边际品位为标准^[10],对已知稀土矿点进行二次筛选,得到目前具有经济价值的可采稀土矿点名单,并按照远景储量从高到低进行排名。

中国白云鄂博矿位居第1,澳大利亚 Olympic Dam 矿位居第2,巴西 Morro dos Seis Lagos 矿位居第3(图2(a))。由于部分国家的稀土远景储量数据在统计过程中未对稀土品位加以限制,所以有许多目前不具有实际开采价值的矿点也被统计在内。例如澳大利亚的 Olympic Dam 矿目前以生产铜、铀和金为主,尽管稀土远景储量巨大,但品位仅为0.42%,低于稀土矿可采的边际品位,只有随着稀土生产技术的提高才可能具有开发价值。

稀土矿品位高低是判断其是否具有经济价值的关键因素。本研究梳理了全球主要稀土矿的品位数据(图2(b))。结果显示,除独居石砂矿外,巴西 Prado 稀土矿的品位排名第1,达到20%;南非 Steenkampskraal 稀土矿的品位排名第2,达14%;美国 Pea Ridge 稀土矿和俄罗斯 Tomtor 稀土矿共同排

名第3,品位达12%。虽然这些稀土矿品位很高,但远景储量都较小。品位是评价稀土矿开发潜力的重要指标,但同时也要考虑稀土矿所属地的经济、文化、交通等方面的因素。例如南非 Steenkampskraal 稀土矿和肯尼亚 Mrima Hill 稀土矿的品位较高,但是由于综合开采成本高,开发相对缓慢。

由于国外公开资料对稀土矿远景储量的估算标准不一,为了使储量具有可比性,找出具有开发价值的矿点,本研究在全球已知矿点稀土远景储量

统计分析的基础上,对品位加以限制,统计品位超过1%的稀土矿点(图2(c))。结果显示中国白云鄂博矿在储量上仍居世界首位;加拿大 Niobec 矿位居第2,但其目前以开采铈矿为主,稀土资源的开发还未进行,已公开的稀土储量只是粗略的估值;丹麦(格陵兰)Kvanefjeld 稀土矿储量排名第3,但由于矿山开采可能造成的环境污染,使得国内反对声很高,政府暂停了开采计划。

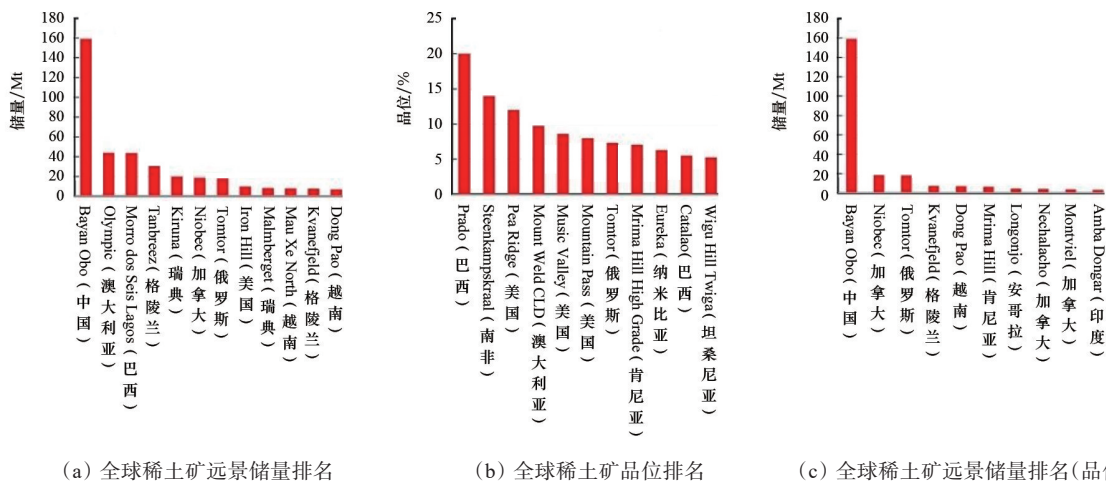


图2 全球稀土远景储量及品位排名

2.2.2 稀土分元素储量分析

研究按照稀土品位≥1%对全球主要稀土矿点

进行筛选后,对筛出矿点进行分元素储量排名(图

3)。轻稀土元素镧、铈、镨、钕排名中,中国白云鄂

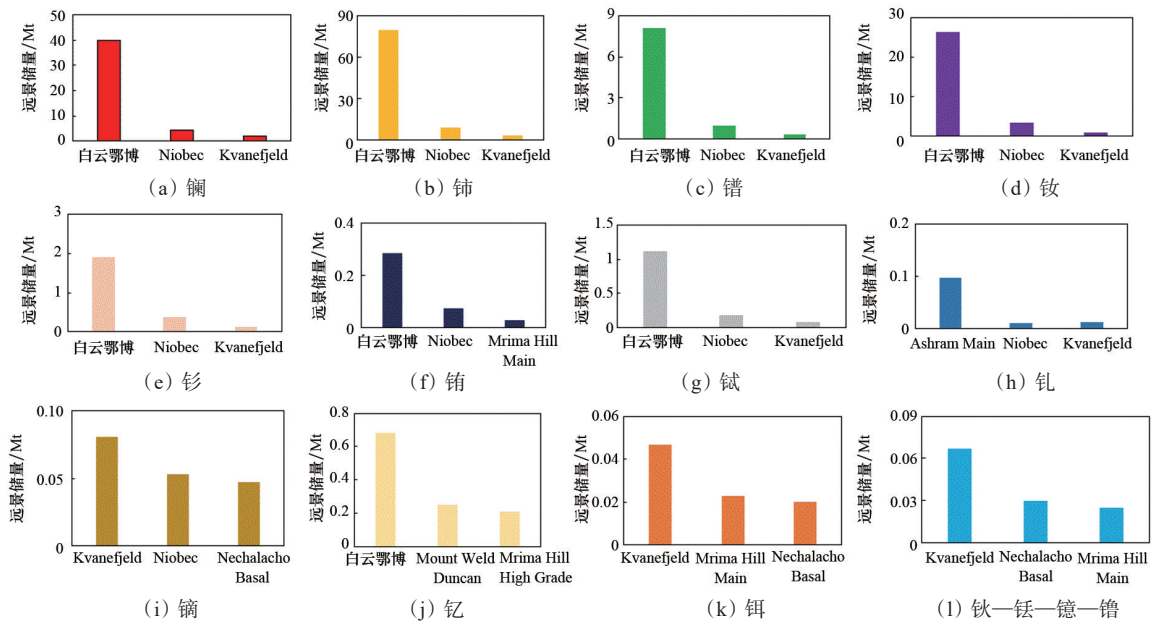


图3 全球稀土矿远景储量排名(分元素,稀土总品位≥1%)

博矿位居第1,其次是加拿大Niobec矿和格陵兰Kvanefjeld矿。中重稀土元素排名中,中国白云鄂博矿在钐、铈、钇和钪的储量排名中位居第1,格陵兰Kvanefjeld矿在镨、铽、铪、铀、铈、镱的储量排名中位居第1。加拿大Nechalacho Basal以及肯尼亚Mrima Hill Main矿的中重稀土储量也很丰富。目前,加拿大Niobec矿和Nechalacho Basal矿、肯尼亚Mrima Hill Main矿还处在地质勘探初期阶段,储量数据会随着地质调查的不断深入而增加。由此可见,未来全球轻稀土元素的供应依然要依赖于中国的白云鄂博矿,而中重稀土元素的供应可能会出现多元化的局面。

3 国外稀土资源开发计划

随着稀土元素应用的不断拓展,目前全球稀土矿储量及产能将无法未来需求,各国纷纷开始加大本国稀土资源的勘查和开发力度,与国外建立合作联盟,寻求多元化的供应市场,保障本国稀土资源的供应安全(图4、图5)。

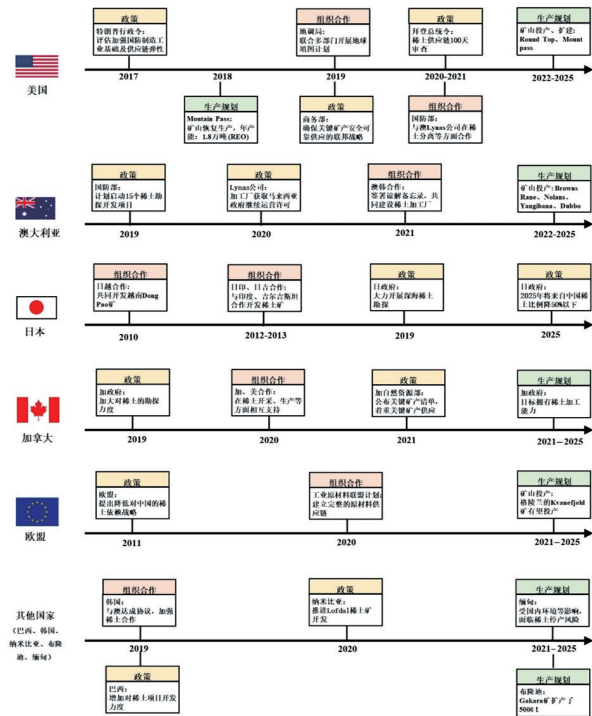


图4 国外稀土矿生产规划

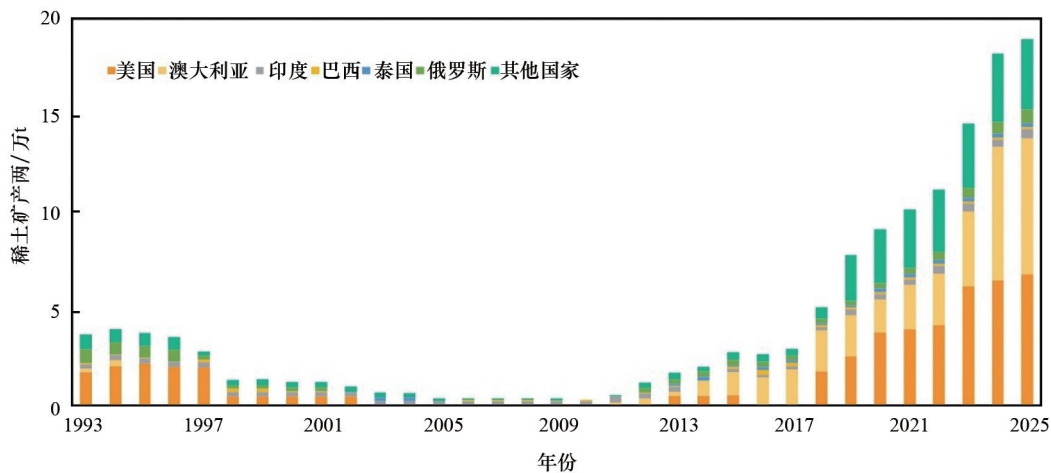


图5 1993—2025年海外稀土产量变化趋势

3.1 美国

美国有着丰富的稀土资源和正在开采的矿山,但由于需求量很大,仍然面临资源供应不足的问题。2020年,美国稀土矿开采量为3.8万吨,全部由Mountain Pass矿产出;2023年,Round Top矿预计

可以实现商业化,年开采量约2万吨;2024年,Mountain Pass矿将开启第2阶段计划,年开采量预计达4万吨。因此,2023年之后美国稀土总开采量预计超6万吨。此外,近期澳大利亚和美国的地质部门签署了合作协议,共同勘探和开发包括稀土在内的

关键矿产,同时澳大利亚莱纳斯公司也与美国国防部签署了一份合同,开始为美国德克萨斯州一家大型稀土分离工厂 Blue Line 进行初步设计工作^[82]。

3.2 澳大利亚

澳大利亚是目前除中国外世界第2大稀土矿产品供应国,正在开采的矿山包括莱纳斯公司的 Mount Weld 矿,澳大利亚战略金属公司的 Dubbo Zirconium 矿、阿拉弗拉资源公司的 Nolans 矿、北方矿业公司的 Browns Range 矿、黑斯廷斯公司的 Yanginana 矿等^[44-46]。2019年澳大利亚的稀土矿开采量为 2.1 万 t,2020 年受新冠肺炎疫情影响,其年产量降低到 1.7 万 t,2021 年产能恢复,达 2.2 万 t。2022 年,Mount Weld 矿计划开采 2.65 万 t 稀土矿;2023 年,Browns Range 矿和 Yangibana 矿投产,预计年开采量分别为 0.32 万 t、0.89 万 t;2024 年,Nolans 矿投产,年产量预计可达 2 万 t;2025 年,Dubbo Zirconium 矿投产,预计年产量 0.12 万 t^[47-54]。因此,2023 年澳大利亚稀土开采量将达到 3.85 万 t,2024 年将达到 6.85 万 t,2025 年将达到 7.00 万 t。

3.3 加拿大

加拿大自然资源部公布了该国的关键矿产清单,该清单将加拿大定位为关键矿产及材料的主要供应国(包括稀土元素)^[38]。清单所列矿产均可以在加拿大生产,并具备根据全球需求为海外供应链提供矿产资源的能力。尽管加拿大目前还没有开始开发稀土资源,但 Strange Lake 矿、Nechalacho 矿、Foxtrot 矿等都具有较高的稀土品位和储量,开采价值很大。近 2 年加拿大加大了对稀土矿的开发,已经在 Nechalacho 矿进行采矿前的准备工作^[39-41]。

3.4 日本

由于缺乏本土稀土资源,日本所需稀土全部依赖进口。从 20 世纪 90 年代开始,日本就有计划地储备稀土,目前储备的稀土可以满足本国 50 年的需求。此外,日本政府促成了日本石油天然气金属公司(JOGMEC)给予澳大利亚莱纳斯公司 2.5 亿美元的贷款。日本银行三菱 UFJ 金融集团也对该矿进行投资(占股 9.99%)。在莱纳斯公司经营困难期间日本政府延长了贷款期限(延长 3 年),降低了

贷款利率(低至 2.5%),保障了公司的业务正常化。同时,公司遵守承诺稀土产品优先供应日本市场。目前日本采购的大部分镨钕氧化物都由该公司供应,成为了该公司在全球的最大买家^[82]。

3.5 欧洲

2020 年欧盟发起成立欧洲工业原材料联盟(ERMA),意图建立欧盟完整的原材料供应链,增强“欧盟在稀土永磁材料供应链方面的韧性”,减少对外依赖,提高原材料从采矿到废物回收的能力。通过将供应链多样化,以及提升欧盟自身在稀土提取、加工和回收方面的能力,使得欧洲稀土供应链变得更具韧性和可持续性^[67-70]。

3.6 其他国家或地区

目前俄罗斯正在加大对稀土资源的开发力度,预计 2025 年开采稀土矿 0.7 万 t^[47];布隆迪 Gakara 稀土矿预计在 2022 年开采稀土矿 0.5 万 t^[64];纳米比亚 Lofdal 稀土矿预计 2024 年开采稀土矿 0.15 万 t^[66];马达加斯加 Tantalus 稀土矿预计在 2022 年开采稀土矿 0.3 万 t^[68];印度预计在 2025 年开采稀土矿 0.5 万 t^[83]。此外,蒙古、缅甸、越南等国的稀土资源也很丰富。蒙古稀土储量大,但由于勘查规范与国外不一致等问题,并未被国际社会认可。缅甸是目前世界上最重要的中重稀土资源供应国之一,但由于本国稀土矿一般为私人开采,详细数据较难统计。

4 国外稀土矿开发潜力评估

根据已建立的全球稀土资源开发潜力评估指标体系,通过识别要素间重要性的差别,依据已确定的矿产资源潜力比重 65%,政策环境指标比重 35%,对稀土资源开发潜力各指标进行权重赋值(表 2),并计算全球各稀土矿点开发潜力综合得分,对海外稀土矿的开发潜力进行评估(表 3)。

其中,矿产资源潜力中涉及的指标从相应的参考文献中获得,政策环境评估指标由 2020 年全球对外直接投资国家吸引力指数(GFICA)^[14]直接提供。以美国 Mountain Pass 矿为例,其最终综合得分为

(储量)0.1015×(储量权重)0.2261+(品位)

表2 稀土资源开发潜力评估指标体系及权重分配

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重
矿产资源潜力	0.6500	资源禀赋	0.4812	储量	0.2261
				品位	0.1515
				类型	0.1036
		资源价值	0.1688	单价	0.1025
				总价	0.0663
				不确定性和宏观经济稳定性	0.0261
政策环境评估	0.3500	先决条件	0.1167	财务结构和发展	0.0146
				公共治理	0.0351
				商业环境	0.0409
		潜在因素	0.1167	市场准入、规模和潜力	0.0266
				人力和自然资源	0.0279
				成本构成	0.0246
		差异化和集聚经济	0.1167	物流绩效	0.0376
				跨国公司和双边投资协定	0.0503
				创新与差异化	0.0664
合计	1.0000		1.0000		1.0000

表3 海外稀土矿开发潜力排名(前50名)

排名	矿点	国家	得分	排名	矿点	国家	得分
1	Tomtor	俄罗斯	0.91	26	Round Top	美国	0.44
2	Kvanefjeld	丹麦(格陵兰)	0.87	27	Bokan	美国	0.44
3	Mount Weld	澳大利亚	0.85	28	Gakara	布隆迪	0.41
4	TANBREEZ	澳大利亚	0.81	29	Norra Kärr	瑞典	0.41
5	Niobec	加拿大	0.79	30	Araxú	巴西	0.40
6	Strange Lake	加拿大	0.79	31	Olserum	瑞典	0.39
7	Kipawa	加拿大	0.75	32	Bear Lodge	美国	0.37
8	Ashram	加拿大	0.71	33	Kutessay II	吉尔吉斯斯坦	0.36
9	Zone 3	丹麦(格陵兰)	0.67	34	Ngualla	坦桑尼亚	0.36
10	Mountain Pass	美国	0.64	35	Browns Range	澳大利亚	0.36
11	Montviel	加拿大	0.60	36	Wigu Hill Twiga	坦桑尼亚	0.35
12	Nechalacho	加拿大	0.60	37	Dong Pao	越南	0.34
13	Hoidas Lake	加拿大	0.58	38	Storkwitz	德国	0.33
14	Two Tom	加拿大	0.56	39	La Paz	美国	0.33
15	Lavergne-Springer	加拿大	0.54	40	Aksu Dıamas	土耳其	0.33
16	Seligdar	俄罗斯	0.54	41	Steenkampskraal	南非	0.33
17	Foxtrot	加拿大	0.52	42	Mrima Hill	肯尼亚	0.32
18	Buckton	加拿大	0.49	43	Zandkopsdrift (JV)	南非	0.32
19	Grande-Vallée	加拿大	0.49	44	Glenover	南非	0.32
20	Elliott Lake Teasdale	加拿大	0.48	45	Xiluvo	莫桑比克	0.27
21	Eco Ridge	加拿大	0.47	46	Tantalus	马达加斯加	0.26
22	Sørensen	丹麦(格陵兰)	0.46	47	Nolans	澳大利亚	0.25
23	Sarfartoq	丹麦(格陵兰)	0.46	48	Yangibana	澳大利亚	0.25
24	Serra Verde	巴西	0.45	49	Dubbo Zirconia	澳大利亚	0.25
25	Lofdal	纳米比亚	0.45	50	Brockmans	澳大利亚	0.24

$0.9104 \times (\text{品位权重})0.1515 + (\text{类型})0.2821 \times (\text{类型权重})0.1036 + (\text{单价})0.6893 \times (\text{单价权重})0.1025 + (\text{总价})0.4324 \times (\text{总价权重})0.0663 + (\text{政策环境})1.0000 \times (\text{政策环境权重})0.35 = 0.6394$ 。

其中,三级指标储量、品位、类型、单价、总价和一级指标政策环境都是进行归一化处理后的数值。归一化后,各种类型的数值之间才可以进行横向对比,最终的综合得分结果才具有对比的意义。

根据本研究评估方法,目前最具开发潜力的稀土矿主要分布于俄罗斯、丹麦(格陵兰)、澳大利亚、加拿大和美国。其中,加拿大的稀土矿除开发潜力较大外,其矿点数量也较多。虽然目前白云鄂博矿仍然是世界第一大稀土矿,但随着国外稀土资源的逐渐开发,中国稀土资源优势正被逐渐削弱。因此,加强中国稀土资源勘查力度,开展已知矿体深部和外围、未知区域的资源勘查工作,掌握中国稀土资源禀赋,对制定稀土产业发展战略意义重大。

目前国外拥有大量具有极大开发潜力的稀土矿,中国可以通过加强合作,共同开发稀土资源,减轻中国稀土资源的供应压力,增加稀土供应链的抗风险能力。此外,通过对各国稀土矿点开发的生态环境损失成本及环境污染进行测算,可以识别出最适合开发的稀土矿,减少稀土开采所造成的生态环境问题。

5 结论

通过对全球稀土资源分布及现状的系统梳理,分析了全球主要稀土供应国未来的稀土发展规划及可能增加的产能,评估了全球主要稀土矿的开发利用潜力,识别了中国在稀土领域开展国际合作和矿业投资的对象,主要得出以下3点结论:

1) 中国白云鄂博矿、澳大利亚 Olympic Dam 矿和巴西 Morro dos Seis Lagos 矿的稀土远景储量居世界前3位。除独居石砂矿外,巴西 Prado 矿、南非 Steenkampskraal 矿、美国 Pea Ridge 矿和俄罗斯 Tomtor 矿位居世界稀土矿品位排名前列。单元素远景储量排名中,中国白云鄂博矿、加拿大 Niobec 矿和格陵兰 Kvanefjeld 矿位列轻稀土元素远景储量

前3名;中国中重稀土远景储量巨大,格陵兰 Kvanefjeld 矿、加拿大 Nechalacho Basal 矿中重稀土储量也很可观。

2) 轻稀土供应方面,除中国外,未来美国、澳大利亚、加拿大等国的轻稀土产量会逐渐增加。其中,美国和澳大利亚合作在德州建立稀土分离厂,澳大利亚和马来西亚合作在关丹市扩建稀土分离厂,未来全球轻稀土供应将趋于多元化。

中重稀土供应方面,除中国外,目前只有缅甸的稀土矿被大量用于中重稀土元素的提取。但由于缅甸政局不稳定,稀土资源开发管理混乱,中重稀土资源无法形成稳定供应。随着丹麦(格陵兰)中重稀土资源的发现,未来这一局面将被改写,但没有稀土分离能力以及环保问题将阻碍其开发。因此,中国南方的中重稀土资源仍是目前全球唯一可以保证稳定供应的资源来源。

3) 目前,国外拥有大量具有较大开发潜力的稀土矿,主要分布在俄罗斯、丹麦(格陵兰)、澳大利亚、加拿大和美国。其中,加拿大的稀土矿点除了开发潜力较大外,其矿点的数量也较多。因此,与稀土资源丰富的国家合作开发稀土矿,可以稳定中国稀土产业的国际地位,保障中国稀土资源的供应安全。

针对以上全球稀土资源的现状、稀土供应的态势以及海外稀土矿的开发潜力,本研究从国家层面、企业层面和研究层面对中国稀土产业未来发展提出建议:

1) 随着经济全球化,生产和资本更加社会化和国际化,加上各个国家矿业发展水平的巨大差异,给国际矿业投资和合作提供了空间。依托中国“一带一路”倡议,通过对沿线国家矿业投资环境的分析,筛选出适合中国稀土企业投资及合作的目标国家,提前进行产业布局。同时,结合中国稀土产业的技术优势、人才优势、产业链优势、研发优势等,制定国外稀土资源合作开发及贸易策略,完善国家合作和投资的保障措施,为中国企业在外投资合作提供政策支持。

2) 国内稀土企业应找准自身定位,结合优势,在充分分析目标国家投资环境的基础上筛选真实

可靠的优质项目,寻求可靠的国际合作伙伴,在擅长的勘查开发阶段介入,扬长避短,不能生搬硬套国内的运行模式,需要结合当地的特点,优化股权比例,降低投资风险,打造企业联合体,共同运营国际项目,通过合作发挥各自优势,互利共赢。严格遵守当地的矿业投资的相关法律政策,加强与当地政府和企业的合作,树立良好的企业形象,对可能发生的政治风险、企业投资风险等做到提前预防,最大程度地化解风险。同时,企业要加强人才建设,根据自身情况聘用和培养优秀人才,加强核心技术研发,建立有效的知识产权保护体系。

3) 针对稀土产业长期存在的稀土采选冶生态环境污染、轻重稀土平衡利用、清洁生产绿色工艺技术、稀土产品回收工艺及策略、二次资源综合利用、稀土产品价格体系、稀土产业链价值增值、稀土国际贸易策略及政策保障等问题,设立相应的研究课题支持学术层面的研究工作;同时加快稀土产业数据库建设,加强信息技术在稀土产业的应用,支持大数据分析研究以及相关的模型、工具的开发;加大稀土材料关键技术研发的投入,弥补中国稀土高端应用不足的短板,立足系统视角支持中长期的稀土-能源-环境-经济耦合研究,发挥稀土节能环保领域中的价值和支撑作用。

参考文献(References)

- [1] 习近平在江西考察并主持召开推动中部地区崛起工作座谈会[EB/OL]. (2019-05-22)[2022-02-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-05/22/content_5393815.htm.
- [2] 李仁虎,陈磊,贾立君,等. “稀土大国”迈向“稀土强国”[N]. 经济参考报, 2018-09-10(04).
- [3] 李仲学,周宝炉,赵怡晴. 未来世界稀土供需格局分析及对策[J]. 稀土, 2016, 37(3): 153-158.
- [4] 刘思德. 2018年世界稀土矿资源供给状况[J]. 稀土信息, 2019(1): 26-28.
- [5] 陈占恒. 国外稀土资源开发与稀土供求关系[J]. 稀土信息, 2018(9): 39-41.
- [6] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2021[R]. New York: U.S. Geological Survey, 2021.
- [7] 张丹琳. 当前稀土资源现状与供需形势分析[J]. 国土资源情报, 2020(5): 37-41.
- [8] 中华人民共和国国务院办公厅. 中国的稀土状况与政策[R]. 北京: 人民出版社, 2012.
- [9] 邱麟惠. 中国稀土产业安全评估与对策研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. 稀土矿产地质勘查规范: DZ/T 0204—2002[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2002.
- [11] Jairo Y, Elmira A. Survey of mining companies 2020[R]. Vancouver: Fraser Institute, 2021.
- [12] 徐曙光, 闫卫东, 孙春强, 等. 2016年世界主要国家矿业投资环境评价[J]. 国土资源情报, 2016(12): 10-16.
- [13] Zhou B L, Li Z X, Chen C C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies[J]. Minerals, 2017, 7(11): 203.
- [14] A global foreign direct investment country attractiveness index 2020[EB/OL]. [2021-03-31]. <http://www.fdiattractiveness.com>.
- [15] Gröger J, Proske U, Hanebuth T J J, et al. Cycling of trace metals and rare earth elements (REE) in acid sulfate soils in the Plain of Reeds, Vietnam[J]. Chemical Geology, 2011, 288(3/4): 162-177.
- [16] Moody M D. Mother lode: The untapped rare earth mineral resources of Vietnam[R]. Newport: Naval War College, 2013.
- [17] Stans Energy Corporation. Announces kutessay II JORC resource estimate, and final five years of soviet mining data[EB/OL]. [2021-04-19]. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA594225>.
- [18] Indian Bureau of Miners. Indian minerals yearbook[EB/OL]. [2021-05-19]. <http://ibm.nic.in/index.php?c=pages&m=index&id=551>.
- [19] Kovalenko V I, Tsaryeva G M, Goreglyad A V, et al. The peralkaline granite-related Khaldzan-Buregtey rare metal (Zr, Nb, REE) deposit, western Mongolia[J]. Economic Geology, 1995, 90(3): 530-547.
- [20] Drysdall A R, Jackson N J, Ramsay C R, et al. Rare element mineralization related to Precambrian alkali granites in the Arabian Shield[J]. Economic Geology, 1984, 79(6): 1366-1377.
- [21] Orris G J, Grauch R I. Rare earth element mines, deposits and occurrences[M]. Denver: United States Geological Survey, 2002: 29-33.
- [22] Noble A C. Bear lodge project Canadian NI 43-101 technical report on the mineral reserves and resources and development of the bull hill mine, Wyoming[R]. Sandy: Roche Engineering Incorporated, 2014.

- [23] Bentzen E H, Hassan G, Galbraith L, et al. Preliminary economic assessment on the bokan mountain rare earth element project near ketchikan[M]. Alaska: Tetra Technologies Incorporated, 2013: 22–24.
- [24] Long K R, van Gosen B S, Foley N K, et al. The principal rare earth elements deposits of the United States: A summary of domestic deposits and a global perspective [M]. Dordrecht: Springer, 2012: 12–14.
- [25] Erik O P, David S B. Independent NI 43–101 finalized for La Paz REE project[R]. Perth: Australian American Mining Corporation Limited, 2011.
- [26] MP Materials Corporation. 2020 annual report[R]. Washington, D. C: MP Materials Corporation, 2021.
- [27] Pingitore N, Clague J, Gorski D. Round Top Mountain rhyolite (Texas, USA), a massive, unique Y-bearing-fluorite-hosted heavy rare earth element (HREE) deposit [J]. *Journal of Rare Earths*, 2014, 32(1): 90–96.
- [28] Gagnon G, Rousseau G, Camus Y, et al. NI 43–101 technical report: Preliminary economic assessment: Ashram rare earth deposit for commerce resources corporation[R]. Québec: SGS Canada Incorporated, 2015.
- [29] Eccles D R, Nicholls S, Dufresne M B. National Instrument 43–101 technical report: Consolidated and updated inferred resource estimate for the Buckton Zone, SBH Property, Northeast Alberta[R]. Ontario: DNI Metals Incorporated, 2013.
- [30] Jason C, Tudorel C, Kathleen A A, et al. NI 43–101 report: Technical report on the eco ridge mine project, Elliot Lake, Ontario, Canada[R]. Ontario: Roscoe Postle Associates Incorporated, 2012.
- [31] Paktunc A D, Davé N K. Formation of secondary pyrite and carbonate minerals in the Lower Williams Lake tailings basin, Elliot Lake, Ontario, Canada[J]. *American Mineralogist*, 2002, 87(5/6): 593–602.
- [32] Miller R R. Pantellerite-hosted rare earth element mineralization in southeast Labrador: The Foxtrot deposit[C]// Simandl G J, Neetz M. *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*. Berlin: Springer, 2015: 109–117.
- [33] Orbite Aluminae Incorporated. NI 43–101 revised technical report, preliminary economic assessment on orbite [R]. Quebec: Orbite Aluminae Incorporated, 2011.
- [34] Hellman P L, Duncan R K. Evaluation of rare earth element deposits[J]. *Applied Earth Science*, 2014, 123(2): 107–117.
- [35] Camus Y, Laferrière A. NI 43–101 technical report: Mineral resource estimation: Kipawa deposit, Zeus Project, Quebec[R]. Québec: SGS Canada Incorporated, 2010.
- [36] Friedrichs P, Meyer F M. REE database management system: Evaluation of REE deposits and occurrences[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2017, 3(1): 13–31.
- [37] Belzile Solutions Incorporated. NI 43–101 technical report: Montviel rare earth project[R]. Québec: Belzile Solutions Incorporated, 2015.
- [38] Jordens A, Marion C, Langlois R, et al. Beneficiation of the Nechalacho rare earth deposit. Part 1: Gravity and magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 99: 111–122.
- [39] Lafleur M P J, Eng P, Ayad M A B, et al. NI 43–101 technical report to present the mineral resources of the rare earth elements zone Niobec Mine[R]. Québec: IAM-GOLD Corporation, 2012.
- [40] Gowans R M, Lewis W J, Shoemaker S, et al. NI 43–101 Technical report on the preliminary economic assessment (PEA) for the strange lake property, Quebec, Canada[R]. Ontario: Micon International Limited, 2014.
- [41] Daigle P. Resource estimate and technical report for the Two Tom REE deposit of the Red Wine complex, Labrador, Canada[R]. Ontario: Tetra Technology Incorporated, 2012.
- [42] Paulick H, Rosa D, Kalvig P. Rare earth element (REE) exploration potential and projects in greenland[R]. Copenhagen: The Geological Survey of Denmark and Greenland, 2015.
- [43] Thrane K, Kalvig P, Keulen N. REE deposits and occurrences in Greenland[C]//ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference. Milos: Greece, 2014: 4–7.
- [44] Dostal J. Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks[J]. *Resources*, 2017, 6(3): 34.
- [45] Cook N J, Ciobanu C L, O’Rielly D, et al. Mineral chemistry of rare earth element (REE) mineralization, Browns Ranges, Western Australia[J]. *Lithos*, 2013, 172: 192–213.
- [46] Smartt M. Charley Creek rare earths project scoping study results[R]. Northern Territory: Crossland Uranium Mines Limited, 2013.
- [47] Jaroni M S, Friedrich B, Letmathe P. Economical feasibility of rare earth mining outside China[J]. *Minerals*, 2019, 9(10): 576.
- [48] Taylor R D, Shah A K, Walsh G J, et al. Geochemistry and geophysics of iron oxide-apatite deposits and associated waste piles with implications for potential rare

- earth element resources from ore and historical mine waste in the eastern adirondack Highlands, New York, USA[J]. *Economic Geology*, 2019, 114(8): 1569–1598.
- [49] Hellman P L, Duncan R K. Evaluation of rare earth element deposits[J]. *Applied Earth Science*, 2014, 123(2): 107–117.
- [50] Jaireth S, Hoatson D M, Mieztis Y. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 62: 72–128.
- [51] Capital Mining Limited. Annual report[EB/OL]. [2021–04–19]. <http://www.capitalmining.com.au>.
- [52] Arafura Resources. Annual report[EB/OL]. [2021–04–19]. <http://www.arultd.com/investorcentre/reports/annual-reports.htm>.
- [53] Reynolds L J, Porter T M. Geology of the Olympic dam Cu–U–Au–Ag–REE deposit[J]. *Hydrothermal Iron Oxide Copper–Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, 2000, 1: 93–104.
- [54] Verplanck P L, Mariano A N, Mariano J A. Rare earth element ore geology of carbonatites[J]. *Society of Economic Geologists*, 2016, 18: 5–32.
- [55] Neumann R, Medeiros E B. Comprehensive mineralogical and technological characterization of the Araxú (SE Brazil) complex REE (Nb–P) ore, and the fate of its processing[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 144: 1–10.
- [56] Pinto Ward C. Controls on the enrichment of the Serra Verde rare earth deposit, Brazil[M]. London: Imperial College London, 2017: 13–19.
- [57] Ribeiro C C. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO[D]. Brasília: Tese (Doutorado em Geologia)–Universidade de Brasília, 2008.
- [58] Takehara L, Silveira F V, Santos R V. Potentiality of rare earth elements in Brazil[M]. *Rare Earths Industry*, 2016: 57–72.
- [59] Harmer R E, Nex P A M. Rare earth deposits of Africa [J]. *Episodes*, 2016, 39(2): 381–406.
- [60] Weng Z, Jowitz S M, Mudd G M, et al. A detailed assessment of global rare earth element resources: Opportunities and challenges[J]. *Economic Geology*, 2015, 110(8): 1925–1952.
- [61] Ripfumelo M A. Consideration of rare earth elements (REE'S) associated with coal and coal ash in South Africa[D]. Johannesburg: University of Johannesburg (South Africa), 2017.
- [62] Witley C J, Swinden S, Trusler G, et al. NI 43–101 technical report and mineral resource estimate for the songwe hill rare earth element (ree) project, Phalombe District, Republic of Malawi[R]. Johannesburg: Main Street America Group, 2019.
- [63] Dill H G. A review of mineral resources in Malawi: With special reference to aluminum variation in mineral deposits[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, 47(3): 153–173.
- [64] Swinden H S, Siegfried P. Amended 43–101 technical report on the rare earth element occurrences in the lofdal carbonatite complex, Kunene Region Khorixas District, Namibia[R]. Halifax: Namibia Rare Earths Incorporated, 2011.
- [65] Pollard B, Mapleson D. NI 43–101 technical report for the mrima hill niobium and rare earth project, Kwale District, Kenya[R]. Kelowna: Pacific Wildcat Resources Corporation, 2013.
- [66] Buyse F, Dewaele S, Decrée S, et al. Mineralogical and geochemical study of the rare earth element mineralization at Gakara (Burundi)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 124: 103659.
- [67] Sarapää O, Al Ani T, Lahti S I, et al. Rare earth exploration potential in Finland[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 133: 25–41.
- [68] Balomenos E, Davris P, Deady E, et al. The EURARE project: Development of a sustainable exploitation scheme for Europe's rare earth ore deposits[J]. *Johnson Matthey Technology Review*, 2017, 61(2): 142–153.
- [69] Reed G C. NI 43–101 technical report, Norra Kärr REE—Zirconium deposit[R]. Twickenham: GBM Minerals Engineering Consultants Limited, 2015.
- [70] Yang X, Heino N, Pakkanen L. Beneficiation studies of a rare earth ore from the olserum deposit[J]. *Natural Resources*, 2019, 10(9): 346–357.
- [71] Eilu P. Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia[J]. *Geological Survey of Finland*, 2012, 53: 401.
- [72] Niegisch M, Kamradt A, Borg G. The upper zone of the Storkwitz carbonatite[M]. Sachsen: Landesamt für Umwelt, 2020: 17–29.
- [73] Deady E, Goodenough K, Lacinska A, et al. Rare earth element placer deposits and alkaline volcanics: A case study from Aksu Dıamas, Çanakli, Turkey[J]. *Applied Earth Science*, 2016, 125(02): 79–80.
- [74] Zaitsev V, Kogarko L N. Sources and perspectives of REE in the Lovozero massif (Kola Peninsula, Russia)

- [C]/European Minerals Conference. Kola Peninsula: EMC2012, 2012: 290.
- [75] 国务院发展研究中心信息网. 全球矿产资源信息平台 [EB/OL]. [2021-03-23]. <http://worldminal.drcnet.com.cn/www/mineral>.
- [76] United States Geological Survey (USGS). President proposes \$860 million USGS budget for FY2019[EB/OL]. (2018-02-12)[2021-05-23]. <https://www.usgs.gov/news/featured-story/president-proposes-860-million-usgs-budget-fy2019>.
- [77] Northern Minerals. Browns range project[EB/OL]. [2021-04-19]. <http://northernminerals.com.au>.
- [78] Canada's rare earth deposits can offer substantial competitive advantages[EB/OL]. [2021-04-19]. https://www.cbj.ca/canada_s_rare_earth_deposits_can_offer_substantial_competitive_a.
- [79] de Campos M, Rodrigues D, de Castro J. A Recent developments in the Brazilian rare earth industry[C]. 24th International Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications, Darmstadt Germany, Aug. 28, 2016 (4): 523-533.
- [80] Samsonov N Y, Tolstov A V, Pokhilenko N P, et al. Possibilities of Russian hi-tech rare earth products to meet industrial needs of BRICS countries[J]. African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, 2017, 9(5): 637-644.
- [81] Khoi N N. Mineral resources potential of Vietnam and current state of mining activity[J]. Applied Environmental Research, 2014, 36(1): 37-46.
- [82] Mez L. Rare earth strategies of Japan and EU/Germany [M]. Wiesbaden: The Ecological Modernization Capacity of Japan and Germany, 2020: 171-184.
- [83] Verplanck P L. Rare earth element resources: Indian context[J]. Economic Geology, 2020, 115(8): 1875-1876.

Global distribution and development potential of rare earth resources

WANG Lu¹, WANG Peng^{1,2*}, WANG Qiaochu², LIU Ying¹, ZHANG Biao³, CHEN Weiqiang^{1,2,4*}

1. Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341100, China
2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Urban Environment and Health, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
3. Inner Mongolia University of Science and Technology, School of Mining and Coal, Baotou 014010, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The rare earth is an important strategic material, but its current global reserves cannot meet the future demand. Therefore, it is urgent to find and develop potential rare earth resources. Based on previous research results, this paper proposes an evaluation index system, with assigned weights, to evaluate the development potential of the global rare earth resources. The following conclusions can be drawn. (1) The evaluation index system is composed of that of the mineral resource development potential and that of the policy environment, with a greater weight for the former and a smaller weight for the latter. (2) In terms of the prospective reserves, China has the largest reserves of the light rare earth, while Denmark (Greenland) has the largest reserves of the heavy rare earth. (3) In terms of the deposit grade, Prado mine in Brazil, Steenkampskraal mine in South Africa, Pea Ridge mine in the United States and Tomtor mine in Russia are among the top rare earth grades in the world. (4) In terms of the deposit development potential, Russia, Denmark (Greenland), Australia, Canada and the United States have the most potential rare earth deposits without counting China. In the face of the increasing supply potential of the global rare earth, China must increase the exploration of its own resources, fully understand the latest development trend of the international rare earth industry, make plans in advance, make full use of the overseas rare earth resources, and ensure the supply security and the industrial chain advantages of China's rare earth resources.

Keywords rare earth; prospective reserves; development potential; resource security ●



(责任编辑 刘志远)