

基于文献计量的过去 30 a 稀土开发环境效应研究综述

万 臣¹, 周 丹^{1,2*}, 薛 冰^{1,3*}

1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 赣州 341000

2. 江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 赣州 341000

3. 中国科学院污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016

摘 要: 稀土开发环境效应是地球环境及可持续发展领域的重要课题, 过去 30 a 以来, 全球稀土产量增加了 400%, 但稀土开发环境效应研究一直缺乏系统综述。以 Web of Science 核心合集和中国知网 (CNKI) 数据库为基础, 基于定量分析与定性认知相结合的判读方法, 对过去 30 a 以来稀土开发环境效应研究文献进行计量分析并开展讨论, 揭示稀土环境效应研究发展特点与发展趋势。研究表明: 稀土开发环境效应研究文献从 2011 年开始呈现快速增长, 但研究团体具有明显地方性且协作程度较低; 中文文献侧重于稀土开发的宏观环境问题研究, 而外文文献则侧重于微观机理研究; 中国是重要的知识创造中心, 美国是国际合作网络中心; 研究主题主要包含环境效应来源、影响因素、环境后果以及技术方法等。未来需要加强稀土开发环境效应的全过程生命周期研究, 提升中国合作中心地位, 强化对稀土开发的深度认知和数据积累。

关键词: 稀土开发; 环境效应; 文献计量; 综述

A review of the environmental effects of rare earth development in the past 30 years based on bibliometrics

WAN Chen¹, ZHOU Dan^{1,2*}, XUE Bing^{1,3*}

1. College of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

2. Jiangxi Key Laboratory of Mining & Metallurgy Environmental Pollution Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

3. Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Rare earths have become indispensable and vital elements in the modern industry due to their unique physical and chemical properties, and their roles as strategic resources and critical raw materials are becoming more and more prominent. Over the past 30 years, the global production of rare earth oxides has increased by 400%, of which China's rare earth oxides (REO) production has always dominated. Still, the development of rare earth resources also faces many environmental issues. Therefore, it is of great

收稿日期: 2022-01-15; 录用日期: 2022-02-21; 网络出版: 2022-03-16

Received Date: 2022-01-15; Accepted Date: 2022-02-21; Online first: 2022-03-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC1805100); 国家自然科学基金项目 (51664024, 21767012); 江西省人才计划 (jxsq2018102126)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (2019YFC1805100); National Natural Science Foundation of China (51664024, 21767012); Jiangxi Talents Project (jxsq2018102126)

通信作者: 周 丹, E-mail: zhoudan1122@163.com; 薛 冰, E-mail: xuebing@iae.ac.cn

Corresponding Author: ZHOU Dan, E-mail: zhoudan1122@163.com; XUE Bing, E-mail: xuebing@iae.ac.cn

引用格式: 万 臣, 周 丹, 薛 冰. 2023. 基于文献计量的过去 30 a 稀土开发环境效应研究综述 [J]. 地球环境学报, 14(4): 409–424.

Citation: Wan C, Zhou D, Xue B. 2023. A review of the environmental effects of rare earth development in the past 30 years based on bibliometrics [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(4): 409–424.

fundamental significance to carry out a systematic summary and prospect of the environmental effects of rare earth development and its knowledge development for enhancing and promoting the green development and development of rare earths. By applying the CiteSpace, we developed a method with a combination of quantitative analysis and qualitative cognition to carry out bibliometric analysis from 1990 to 2020, aiming to clarify the systematic knowledge and development trend of the environmental effects of rare earth development, which can provide a reference for the green development decision-making of rare earths and reference. **Materials and methods** The literature was obtained from the core collection databases of China National Knowledge Infrastructure and Web of Science, with a time window from 1990-01-01 to 2020-12-31. First, a literature database containing 417 pieces (including 246 Chinese and 171 English pieces) was constructed based on manual interpretation. Then, CiteSpace and text analysis methods were used to analyze the knowledge map of the research literature and present the main research objects, sources of environmental effects, influencing factors, environmental consequences, and research methods of rare earth environmental effects. **Results** 2010 was a significant turning point year for literature publication. Chinese scholars and their outcomes dominated a significant position in the output of research results of rare earth environmental effects globally. Research on environmental effects has gradually turned to specific environmental and has initially formed a research community. Environmental effects, influencing factors, and environmental consequences are presented, followed by a systemic summary of the research methods. **Discussion** The ecological and environmental problems caused by the development and utilization of rare earths have become a bottleneck restricting sustainable development. As the main producer and exporter of rare earth resources, China has made great contributions to the stable supply of rare earth products worldwide, but the development of rare earths is also accompanied by a series of deep environmental problems and ecological and health damage. In the international knowledge cooperation network system, the United States is in the central position, while China is in the sub-central position, which shows the imbalance between China's contribution to rare earth resources and the discourse power of rare earth knowledge. In the environmental management of rare earths, there is an urgent need to follow the concept of comprehensive management of the whole process and the whole life cycle, from the source of production, production process and even export trade to systemic management. At the same time, we should consider introducing ecological compensation and other governance tools, so as to provide policy and financial support to the ecological restoration of rare earth resources mining areas. **Conclusions** Strengthening the research on the environmental effects of rare earth development has important supporting significance for further enhancing and promoting the green development of rare earths. Systematic knowledge summarization plays a fundamental role in promoting, improving, and innovating disciplinary research. The research on the environmental effects of rare earths has entered a rapid development track, but further improvement is needed in knowledge network collaboration and research system design. **Recommendations and perspectives** China needs to promote international cooperation, select some excellent scientific research institutions, and cultivate them into international knowledge cooperation centers to enhance the right to speak. Systematically promote the research on the integration of high-efficiency green development and ecological restoration of rare earths, and simultaneously promote the green development capabilities of rare earths at the scientific and technological level.

Key words: rare earth development; environmental effects; bibliometrics; review

稀土因其独特的物理化学性质而成为现代工业中不可或缺的重要元素, 且其战略资源地位和作为关键性原材料的角色越来越凸显 (Tennesen, 2014; Law, 2019; European Commission, 2020)。过去 30 a 以来, 全球稀土氧化物 (REO) 产量从

1989 年的 6×10^4 t 迅速增加至 2020 年的 2.4×10^5 t (张博等, 2018; USGS, 2021)。根据美国地质调查局的统计数据, 1995—2020 年, 中国 REO 产量累计达到 2.56×10^6 t, 占全球总产量的 82%, 其中 2005—2010 年年度产量占比一度高达 97%

(USGS, 2021)。2012年6月国务院新闻办公室发布的《中国的稀土状况与政策》白皮书特别指出中国供应着全球90%以上的稀土需求(http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2012n/202207/t20220704_130078.html),但由于在相当长的一段时间内大量稀土资源被私挖、盗采和走私等原因而未被纳入统计数据,中国稀土实际产量贡献应远高于美国地质调查局数据(郑国栋等, 2021)。

稀土资源的独特成矿地质特征及其物理化学性质,使得稀土开发也面临着一系列生态风险及深层次环境问题,威胁到稀土产业的可持续发展(王珍, 2015; Balaram, 2019; Tian et al., 2020; Yin et al., 2021)。例如:《中国的稀土状况与政策》白皮书明确指出“稀土开采、选冶、分离存在的落后生产工艺和技术,严重破坏地表植被,造成水土流失和土壤污染、酸化,使得农作物减产甚至绝收”。过去30 a是稀土资源开发及产业蓬勃发展的30 a,但同时也是环境生态问题涌现以及对其环境效应认知不断积累和深化的首要时期,因此,系统总结稀土开发环境效应及其知识挖掘,对于进一步促进稀土绿色开发和发展具有重要意义(McLellan et al., 2014; Wang et al., 2017; Lee and Wen, 2018)。当前,国内外学者在稀土开发环境效应方面取得了一定数量的研究成果,围绕稀土资源开发利用过程的环境成本评估(马国霞等, 2017a)、稀土加工过程产生环境影响(徐丰等, 2020)、稀土产品生命周期评价(Schreiber et al., 2021)等研究主题进行了综述工作,但在稀土开发环境效应研究成果的覆盖性及系统性方面仍然有一定的不足。

因此,本研究着重围绕稀土开发环境效应的研究组织、研究热点和研究前沿等问题,基于CiteSpace文献计量可视化分析软件,采用定量分析与定性认知相结合的判读方法,对1990—2020年相关中英文文献进行了统计和可视化分析,并开展研究文献主题内容分类阐述,梳理总结了稀土环境效应的产生途径、影响因素、环境后果和研究方法等四方面的主要研究内容,从而促进厘清稀土开发环境效应的系统知识及发展趋势,可为后续研究和稀土绿色发展决策提供借鉴和参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

研究所用中文文献源于中国知网(CNKI),

英文文献源于Web of Science(WOS)核心合集数据库。在检索过程中,通过CNKI专业检索功能,以检索式SU(主题,%)=稀土*(污染+环境影响+环境效应+生命周期评价)进行检索,同时在WOS核心合集数据库,精确检索“TS(主题)=[‘rare earth’ and (‘pollution’ or ‘environment impact’ or ‘environment effect’ or ‘life cycle assessment’)]”([‘稀土’和(‘污染’或‘环境影响’或‘环境效应’或‘生命周期评价’)]”。检索时间跨度为1990-01-01至2020-12-31,共得到983篇中文文献和1141篇英文文献,然后通过人工逐一阅读其标题和摘要,识别并剔除公告、通知、内容不符合等类型文献,最终构建了包含417篇中英文文献(中文文献246篇、英文文献171篇)的文献数据库。

1.2 研究方法

CiteSpace是用来分析、挖掘和可视化科研文献数据的工具软件(Chen, 2006),通过系列可视化图谱展示某一知识领域关键和前沿的信息及演变进程(刘亦晴和梁雁茹, 2020; Azam et al., 2021; 薛冰等, 2022)。本研究基于CiteSpace 5.8.R3,对研究文献进行知识图谱分析,包括发文量及其国别分布、研究热点与阶段以及关键词聚类等,挖掘1990—2020年稀土环境效应研究知识体系及其演化趋势。随后进一步结合文献内容分析,梳理稀土环境效应的研究特征,总结归纳稀土环境效应主要研究对象、环境效应来源、影响因素和环境后果以及研究方法等(图1)。

2 稀土开发环境效应知识图谱分析

2.1 文献数量趋势及合作网络

文献计量结果显示:2010年为文献发表的重要转折年份,其中1990—2010年为缓慢增加阶段,期间发表文献数量较少;而2011—2020年为快速增长阶段,文献数量显著增加(图2)。需要注意的是,2005年之前的稀土相关英文文献中基本没有讨论其开发环境效应的论文,而2010年以后中英文文献数量均显著增加,表明稀土开发环境效应的研究开始引起了广泛关注。其中值得关注的背景事件是中国在2010年开始实施严格的稀土出口配额制,旨在减少污染和保护资源,稀土行业密集开展了环境治理、结构调整和各种专项整治,使得稀土开发的环境问题进入了研究及决策层面(周美静等, 2020)。

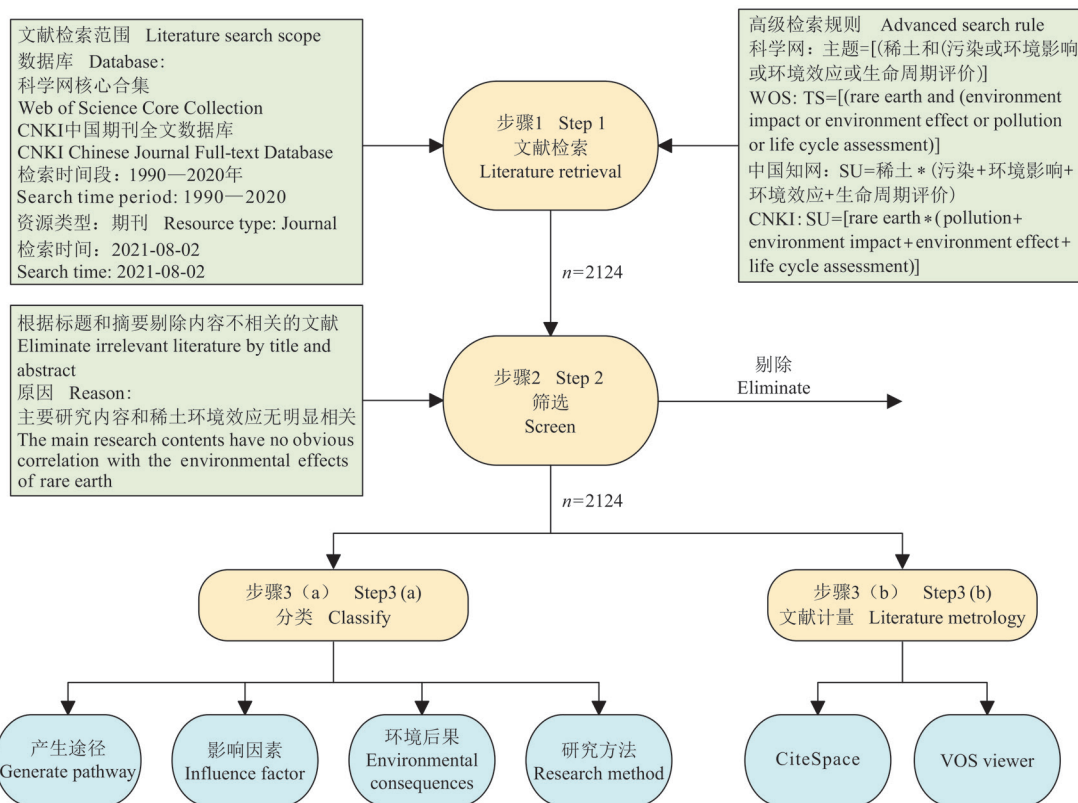
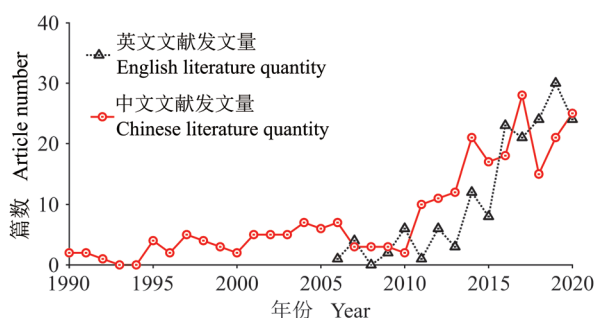


图 1 文献检索及筛选流程

Fig. 1 Literature search and screening process

图 2 基于 CNKI 和 WOS 数据库的 1990—2020 年
中英文文献年度发表统计Fig. 2 Statistics of Chinese/English literatures during
1990—2020 in CNKI and WOS databases

从作者合作网络视角来看,统计文献涉及的中英文作者总数为 923 位(其中中文文献涉及中文作者总数 677,英文文献作者总数 290 且以中国学者为主),但其中仅发表 1 篇论文的作者有 813 位,占总数的 88%。进一步考察文献的产出机构,统计分析结果显示:国内稀土环境效应研究领域研究机构合作网络图谱共生成 255 个节点,180 条连线,网络密度为 0.0056,其中江西理工大学出现次数最多(34 频次),其后依次是内蒙

古科技大学(13 频次)、中国科学院(12 频次)等,且机构主要分布在江西、内蒙古等稀土资源主要分布区。国际稀土环境效应研究领域机构合作网络图谱共生成 200 个节点,214 条连线,网络密度为 0.0108,其中频次居前机构主要有中国科学院(Chinese Academy of Sciences, 27 频次)及中国科学院大学(University of Chinese Academy of Sciences, 21 频次)、南京师范大学(Nanjing Normal University, 21 频次)等。进一步开展国家和地区合作视角的文献计量分析(图 3),共生成 36 个节点,52 条连线,网络密度为 0.0825。结果表明文献最多来源地为中国(99 篇),其次为美国(23 篇)、德国(13 篇)、意大利(12 篇)、法国(10 篇)。但是从中心性角度分析,合作网络中心性最高的是美国(0.49),而后依次为法国(0.37)和中国(0.34)。总体来看,知识图谱分析结果表明:目前关于稀土开发环境效应研究主要集中于中国及中国学者,中国在全球稀土环境效应的研究成果产出中占主体地位,但在国际及境内外合作研究网络中,美国处于国际知识合作网络中心,而中国处于次中心地位。

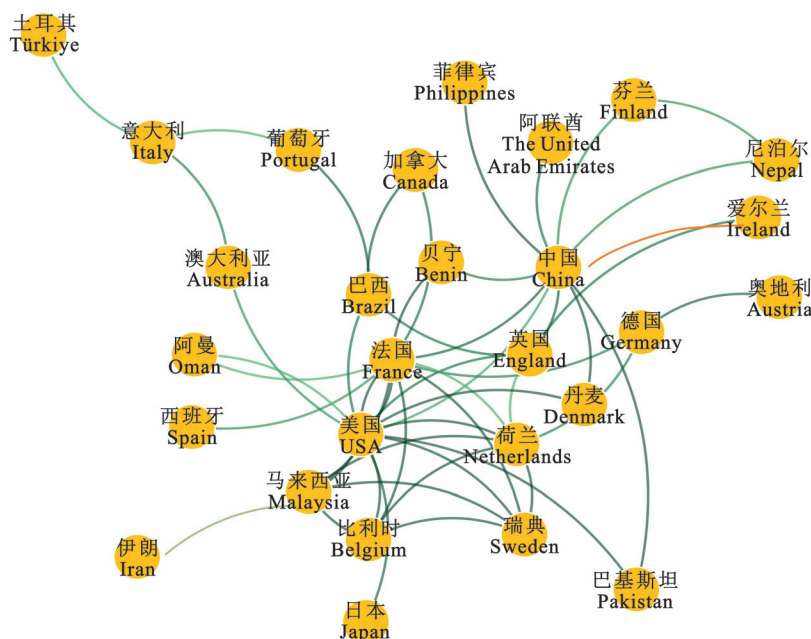


图3 基于英文文献的国家/地区合作网络图谱
Fig. 3 Collaboration network map based on English literature

2.2 研究热点识别

关键词是文章内容的高度概括,因此可以借助关键词共现网络分析展现学科研究热点和发展趋势(Chen, 2006)。通过构建1990—2020年文献中出现频次大于4的关键词共现网络(图4)识别过去30 a 稀土开发环境效应研究热点及其变化特征。分析结果表明:中文文献中出现频次位居前5的关键词有“稀土”(50次)、“稀土元素”(32次)、“污染”(19次)、“离子型稀土矿”(18次)以及“环境影响”(17次);英文文献中则为“rare earth element”(REE, 稀土元素)(94次)、“lanthanum”(镧)(38次)、“heavy-metals”(重金属)(26次)、“growth”(增长)(25次)以及“pollution”(污染)(24次)。中英文文献出现频次 ≥ 10 的关键词共有35个,但仅占关键词总数量的1.72%,表明稀土环境效应文献关键词的中心度低,多元化现象明显。就关键词频次演变趋势来看,稀土开发环境效应研究逐渐转向于面向土壤、水体等具体环境要素,并初步形成了以“离子型稀土矿”、“life cycle assessment (LCA, 生命周期评价)”等为主要对象的研究群落。

2.3 研究阶段划分

基于关键词突现时区图开展聚类分析,得到

网络模块化评价指标(Modularity Q)值为0.55($Q > 0.3$, 代表聚类较好)及网络同质性平均值(weighted mean silhouette, S)为0.8154($S > 0.5$, 代表同质性较高),表明图谱聚类合理(李先跃, 2019)。结果显示:稀土环境效应研究演进历程基本可以分为两个阶段,其中:阶段1(1991—2008年)为研究起步期,主要集中于稀土开发利用过程造成的放射性污染,“空气吸收剂量率”和“天然放射性核素”两个关键词的突现度分别为2.26和1.89;阶段2(2009—2020年)为分化发展阶段,形成了不同的研究分支。在阶段2中,“原地浸矿”、“地下水污染”、“离子型稀土矿”、“稀土元素”、“食品”、“土壤修复”等关键词呈现较高突现度,其中原地浸矿和离子型稀土矿的持续时间最长,这表明离子型稀土矿的环境效应是该阶段的研究主线;国际研究领域则以“roots”(根)、“horseradish”(辣根)、“accumulation”(堆积物)、“stress”(压力)、“calcium”(钙)、“thorium”(钍)、“China”(中国)、“impact”(影响)、“health-risk assessment”(健康风险评估)、“sustainability”(可持续性)等关键词为代表并呈现了较高突现度。基于关键词突现对比分析,中文文献较侧重于宏观环境问题而英文文献侧重于微观要素及机理研究等(图5)。

要方法和技术手段(图6)。

3.1 产生途径

稀土环境效应产生途径主要有稀土矿的开采、产品加工、元素及产品使用、回收利用和废弃阶段等。其中研究最多的是稀土矿的开采, 共计139篇(中文文献95篇, 英文文献44篇), 而稀土回收利用的环境效应分析仅有7篇(中文文献2篇, 英文文献5篇), 包含稀土的全生命周期, 研究对象则主要集中于赣州离子型稀土和白云鄂博轻稀土。在离子型稀土开采阶段, 主要关注浸取过程中污染来源及其环境效应, 认为化学试剂使用及逃逸的细微颗粒物等是主要污染来源, 同时对开采地的环境生态扰动产生了直接或

间接的环境效应。例如: 以硫酸铵为浸出剂的离子吸附稀土矿原位浸出法, 因渗漏等技术措施不完善, 易造成矿区及周边地区土壤和水体氮化物污染严重(Liu et al., 2018)。Xu et al. (2021) 揭示了“池浸”“堆浸”等开采技术以及土壤条件的影响, 发现相关开采活动对土地和植被造成了严重破坏, 使得矿区生态环境质量持续下降。在轻稀土开采阶段, 由于采取露天开采工艺, 对土壤和植被的污染最直接也最严重, 并伴随着大量放射性元素造成区域大气污染(于晓燕等, 2020)。Tian et al. (2018) 研究了轻稀土采矿过程, 发现产生的金属颗粒物是造成矿区空气污染的重要因素。



图5 关键词突现时区图谱(a: 中文关键词; b: 英文关键词)

Fig. 5 Burstiness time-zone of the key words (a: Chinese key words; b: English key words)

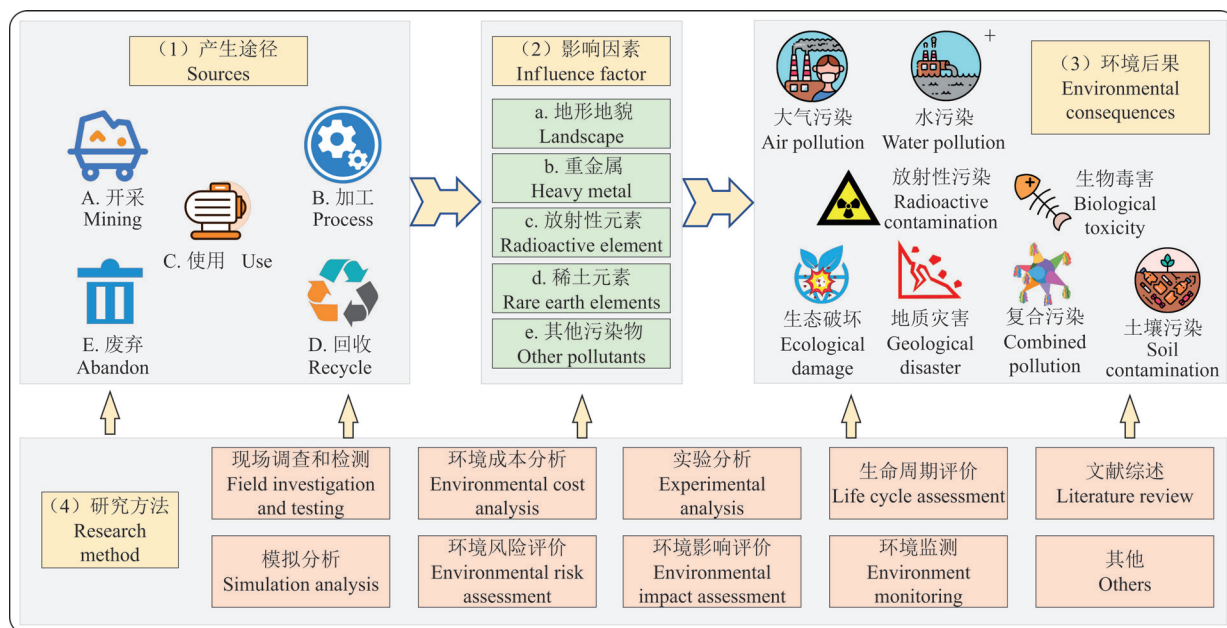


图 6 稀土开发环境效应研究主题分布及方法技术

Fig. 6 Thematic distribution and methods of research on environmental effects of rare earths development

产品加工阶段的环境效应主要来源于选矿和金属冶炼环节,且稀土金属冶炼阶段比普通金属(例如铜、铝土矿和钢)造成的环境影响更大(Weng et al., 2016; 李振民等, 2017)。轻稀土和离子型中重稀土选矿阶段使用大量的各种酸、碱和萃取剂等化工原料是污染物的主要来源(黄小卫等, 2011)。此外,氟碳铈矿、独居石、磷钇矿或其他稀土矿物在选矿加工时均会释放钍等放射性元素,对周围生物健康安全造成威胁(Findeiß and Schäffer, 2017)。与南方离子型稀土萃取分离过程相比,轻稀土硫酸法冶炼过程有着严重的大气污染(於方等, 2017)。在稀土元素和产品使用阶段则既会产生环境负效应,也有正效应。例如:使用含钆磁共振成像造影剂时,钆会被释放到水环境中从而造成水污染(Martino et al., 2017),或使用含稀土农用化学品时,会导致稀土元素在土壤中积累并在食物网转移(Naccarato et al., 2020),但稀土催化剂在汽车尾气治理、烟气脱硫脱硝治理、焦化污水处理等环保领域亦有巨大应用前景(易师和刘荣丽, 2014)。在回收利用阶段,主要针对稀土尾矿和含稀土废品回收等(张光伟和崔学奇, 2012; 许礼刚, 2015),而其环境效应因素主要来源于草酸等试剂使用以及不同回收技术路径下产生的资源环境效应等。例如:稀土尾矿回收生产氧化钪

过程中的环境影响主要来自草酸(Wang et al., 2020a),从钕铁硼磁铁废料中提取稀土的新回收工艺则有助于显著降低环境影响(Schulze et al., 2018)。而在废弃阶段,既有研究表明废弃稀土矿是有毒金属和稀土元素污染的重要来源(Atibu et al., 2018),废弃矿渗漏污染对生物和生态系统具有显著的毒理学影响(He et al., 2018),同时,含稀土电子废品直接或间接排放到环境中也会造成污染问题(Moreira et al., 2020)。稀土环境效应的产生途径广泛,在原材料获取、产品制造和回收阶段,环境影响主要来自工程行为和化学试剂的使用,并受稀土种类及其生产工艺影响;稀土产品使用会带来正负两方面的环境影响,不同稀土产品使用造成的环境影响不同;开采后的矿山和报废产品是稀土废弃阶段的环境影响来源。

3.2 影响因素

稀土环境效应的影响因素主要有稀土元素、放射性物质、重金属、工程行为及其他污染物。其中研究最多的影响因素是稀土元素,共计 162 篇(中文文献 56 篇,英文文献 106 篇),值得注意的是在稀土开发释放的放射性物质研究上,相关中文文献有 45 篇,而英文文献仅为 4 篇。实际上,稀土元素在环境中无处不在(Wei et al.,

2020), 稀土资源开发利用将增加稀土元素的环境释放量 (Wang et al., 2020b)。Malhotra et al. (2020) 研究了稀土元素污染水体的渠道, 发现含有稀土元素的陈旧设备废弃等行为均会增加水体污染可能性。由于稀土矿物中伴生有钍系和铀系天然放射性核素, 稀土生产加工过程会释放大量放射性物质 (任炳湘等, 1991)。范磊 (2011) 对比分析了 2 家典型稀土企业废水和底泥的放射性, 发现 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 3 种核素在环境中有累积, ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 的测量结果多次超过江苏省天然环境上限。王国珍 (2007) 对稀土企业历年来大量积累的废渣进行放射性调查, 发现其存在放射性比活度超标风险。重金属释放是稀土开发利用时产生的重要环境变化 (谢金亮等, 2020), 但其主要来源于稀土矿物和化学试剂 (孟磊等, 2020), 例如 Liu et al. (2020) 发现离子型稀土矿开采中的高浓度硫酸铵浸出剂会改变土壤环境性质, 从而导致伴生重金属的释放。对于其他污染物, 如轻稀土开采释放的粉尘 (Tian et al., 2020), 离子型中重稀土开采排放的氨氮 (邓振乡等, 2019), 以及稀土冶炼过程产生的二氧化硫、氟化物、二氧化氮等污染物 (丁祥等, 2020; 于晓燕等, 2020), 主要受到相对落后的生产技术水平等影响; 而矿山地形地貌景观破坏、基岩裸露和坡面不稳定以及植被破坏和表土流失等问题主要受到开发方式的影响 (李成等, 2019; 罗婷和郑明贵, 2019; 尚锦燕, 2020)。

3.3 环境后果

稀土环境效应研究涉及的环境后果包括水污染、土壤污染、大气污染、放射性污染、生物毒害、生态破坏、气候变化、地质灾害和协同污染等, 这是稀土环境效应影响的具象体现。文献研究最多的环境后果是生物毒害, 共计 101 篇 (中文文献 29 篇, 英文文献 72 篇), 而协同污染的环境效应分析仅有 7 篇 (中文文献 1 篇, 英文文献 6 篇)。其中, 水污染主要来自离子型稀土矿开采 (高志强和周启星, 2011)、尾矿渗漏和工业排放 (高际攻等, 2002)。例如: 离子型稀土矿开采会造成水体稀土元素、三氮 (离子态的氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮) 和硫酸盐污染 (涂婷等, 2017; 赵永红等, 2020), 且其水污染具有潜在性、持续性的特点 (刘斯文等, 2015)。土壤污染是稀土开采和尾矿废弃等行为造成的重

要环境后果之一 (王文华等, 2017; 罗婷和郑明贵, 2019)。苏文湫和祝怡斌 (2016) 发现稀土废弃堆浸场和母液处理车间的土壤汞含量超标, 综合潜在生态风险为轻度。在稀土大气污染研究方面, 邓丽锋和袁良 (2019) 发现稀土工业区局部环境中的大气污染显著超标, 王爱云等 (2017) 对白云鄂博稀土选矿过程进行研究, 发现生产工艺过程导致了大气污染物的增量排放。稀土开发过程中的放射性污染对人类生命和健康构成潜在威胁 (杨新兴等, 2015), 例如: 母岩高铀离子型稀土矿采矿行为会将几千年富集积累的铀释放到居民的生活环境, 从而造成环境风险 (黄敏等, 2020); 许明发等 (2019) 研究南方离子型稀土矿开采、选矿和冶炼等稀土开发利用过程中各固体物料的放射性水平后提出, 应将除杂渣作为放射性源项进行监管。生物毒害作用和生态及地质灾害也是稀土开发过程中引起的重要环境后果。既有研究表明, 稀土元素可影响动物的消化、呼吸、生殖、神经、血液和免疫系统等 (Tian et al., 2020), 释放到土壤环境中的稀土纳米颗粒可能会影响微生物, 从而扰乱陆地生物地球化学循环 (Yue et al., 2020)。生态破坏后果则包括矿山植被覆盖度降低、水土流失、富营养化等 (Yu et al., 2012; 徐丰等, 2020), 并进一步对生物多样性产生破坏性影响 (Li et al., 2010; 王东仓和黄建英, 2017)。地质灾害则主要表现为尾矿堆滑坡和注液井布置造成的采场滑坡塌陷等 (姚栋伟等, 2016)。同时, 需要注意的是, 由于稀土的高伴生特点, 使得环境后果常常体现为复合效应, 例如: Gong et al. (2019) 通过研究不同稀土元素间毒性的相互作用发现, Y-La (钇-镧) 和 La-Ce (镧-铈) 混合物毒性具有协同效应; Bai et al. (2019) 研究同时暴露于铬酸盐和各种稀土元素的工人健康发现, 它们对人的脱氧核糖核酸 (DNA) 损伤产生交互影响。同时, 稀土与酸雨联合污染严重影响植物生存, 已成为新的环境问题 (Zhang et al., 2018)。

3.4 研究方法

目前, 关于稀土环境效应研究方法主要有文献综述、实验分析、调查检测、污染监测、模拟分析以及生命周期评价、环境影响评价、风险评估和环境成本核算等。其中中文文献研究涉及较多的方法有文献综述 (87 篇)、实验分析 (54

篇)和调查检测(41篇),而英文文献研究涉及较多的方法依次为实验分析(78篇)、调查检测(44篇)和生命周期评价(22篇)。

文献综述法在稀土元素的环境效应(Zhang et al., 2009)、稀土矿区的污染现状(涂婷等, 2017)和稀土开发导致的环境问题(邓丽锋和衷良, 2019)领域相对比较广泛,主要用于对部门或者专业领域学科知识的初步总结及梳理。实验分析方法主要有盆栽实验(任学军等, 2011; Zicari et al., 2018; He et al., 2019)及淋滤实验(杨元根等, 1999)等。现场调查检测法多应用于开发利用过程释放的放射物质(程丰民, 2007; 桑园和覃波, 2017)、稀土元素含量(孙峰等, 2013; 雒婉霞等, 2016)和重金属(叶晓萍和罗润香, 2019; 谢金亮等, 2020)等物质元素检测。稀土环境监测包括现场监测和遥感监测,例如借助自动化监测设备对稀土矿区地下水中 pH 值、氨氮等关键指标的变化进行无线远程监测(王炯辉等, 2015),或采用卫星图像遥感解译和野外调查相结合的方法对稀土矿区的矿山土地压占、矿山地质灾害、矿山环境污染、尾矿库分布、矿山恢复治理和矿山开采点等状况进行遥感监测(杨显华等, 2015)以及对稀土冶炼分离厂厂区及周边环境空气、水、土壤开展辐射监测(陈小红, 2018)。模拟分析是利用调查分析资料,结合模型、软件和方法等进行模拟分析。例如:利用软件模拟稀土分离项目地下水污染以展示污染物在岩体介质中的扩散方式和污染晕呈现形式(洪淑娜等, 2014),或利用数值模拟软件对稀土矿区地下水氨氮污染进行数值模拟(徐水太等, 2016)。

生命周期评价法(LCA)近几年被广泛用于稀土产品生产过程的环境影响研究,但大多集中在稀土氧化物的生产领域。通过对稀土矿开采进行生命周期评价有助于为项目开发过程中的后续决策提供信息并减少其环境影响(Pell et al., 2019), Bailey et al. (2020)在 2020 年对已发表的稀土氧化物生产 LCA 文章进行较为全面的综述,认为 LCA 是评估稀土氧化物生产对环境影响的最广泛接受的方法,同时也指出 LCA 的三个主要方法问题是数据差距、分配和废物管理。环境影响评价是指对拟议中的人为活动可能造成的环境影响进行分析论证,并在此基础上提出采取的防治措施和对策的方法。例如:潘正现和谢庆剑(2014)从

工艺技术先进性、资源能源利用指标、产品指标、污染物产生指标、废物回收利用指标等方面对某稀土永磁材料生产项目开展了环境影响评价,进而对其清洁生产水平进行了评估。风险评价主要针对稀土开发及建设项目的分析和预测项目活动存在的潜在危害,量化测评某一事件或事物带来的影响或损失的可能程度,主要指标包含单因子污染指数、综合污染指数、污染负荷指数、地积累指数和生态风险指数法(王文华等, 2017)以及稀土毒性系数等(Chen et al., 2020),从而建立面向稀土开发及建设的生态风险体系。环境成本核算基于市场价值法、机会成本法和防护费用法等核算框架,对稀土资源开发环境成本进行量化研究(鞠丽萍等, 2020),可以反映稀土资源开发利用对生态环境的影响程度,对稀土产业可持续发展有一定的借鉴意义(徐丰等, 2020)。马国霞等(2017b)利用多种数据源,对不同稀土资源进行环境成本核算,发现扣除生态环境成本后我国稀土产业利润为负;罗婷和郑明贵(2019)建立离子型稀土矿土壤环境成本模型对 12 个离子型稀土矿进行研究后发现,各个稀土矿的土壤环境成本差异较大。

4 研究展望

稀土资源开发利用导致的严重生态环境问题已成为制约稀土产业可持续发展的瓶颈。加强稀土开发环境效应研究,对于进一步提升和促进稀土绿色发展具有重要的支撑意义,而系统的知识总结对于促进、改善和革新学科研究具有基础性作用。基于过去 30 a 的中英文文献总结,发现稀土环境效应研究进入快速发展轨道,文献数量呈现快速增长态势,但学者及机构之间合作程度偏低,形成众多小型的、分散的合作网络,中国是重要的知识创造中心,但美国却是国际合作网络中心。未来应进一步加强稀土开发环境效应的合作研究,着力选择一批优秀的科研机构推进知识网络合作,将其打造为国际合作网络中心,以进一步提升稀土开发环境效应领域的话语权。

不同生命周期阶段的稀土环境效应产生途径多样化,因此带来的影响因素和环境后果均存在较大差异。稀土开发环境效应研究未来将呈现 2 个方向的进一步分化:一是宏观的环境问题及环境现象研究,例如大尺度上的环境污染问题及其治理;另一个则是不同稀土元素的微观环境机理。

同时,对于多元素引起的复合环境效应等问题也迫切需要深入研究,系统推动稀土高效绿色开发与生态修复一体化,在源头上推进开采工艺革新,同时降低化学试剂的使用,并同步推进生态恢复工作,加强地表植被恢复及景观重建;在生产过程中注重绿色生产工艺,加强对危险性物质的使用监控,应建立工人健康评价监测体系,加强对人体健康的保护;特别注意废弃物回收环节,着力于提升稀土产品的回收率,并在此过程中加强运用生命周期评价等系统分析方法,在科学及技术层面同步推进稀土的绿色回收能力。

参考文献

- 陈小红. 2018. 四川案例稀土冶炼分离厂辐射环境监测分析[J]. *环境与可持续发展*, 43(4): 49–51. [Chen X H. 2018. Environmental radiation monitoring in a rare earth smelting separation plant in Sichuan [J]. *Environment and Sustainable Development*, 43(4): 49–51.]
- 程丰民. 2007. 山东省某稀土矿环境放射性污染现状调查与防治对策[J]. *中国辐射卫生*, 16(2): 204–205. [Cheng F M. 2007. Investigation on the present situation of environmental radioactive pollution in a rare earth mine in Shandong Province and its prevention and control counter measures [J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 16(2): 204–205.]
- 邓丽锋, 衷 良. 2019. 稀土开发导致的环境问题及污染治理措施研究[J]. *科技创新导报*, 16(28): 119, 121. [Deng L F, Zhong L. 2019. Study on environmental problems caused by rare earth development and pollution control measures [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 16(28): 119, 121.]
- 邓振乡, 秦 磊, 王观石, 等. 2019. 离子型稀土矿山氨氮污染及其治理研究进展[J]. *稀土*, 40(2): 120–129. [Deng Z X, Qin L, Wang G S, et al. 2019. Ammonia nitrogen pollution and progress in its treatment of ionic rare earth mines [J]. *Chinese Rare Earths*, 40(2): 120–129.]
- 丁 祥, 王建军, 况 侨, 等. 2020. 离子型稀土矿冶炼分离过程中的环境影响分析[J]. *矿冶*, 29(2): 98–104. [Ding X, Wang J J, Kuang Q, et al. 2020. Environmental impact analysis of ion-type rare earth ore metallurgy and separation process [J]. *Mining and Metallurgy*, 29(2): 98–104.]
- 范 磊. 2011. 太湖流域稀土企业放射性废水污染调查[J]. *环境监测管理与技术*, 23(1): 34–38. [Fan L. 2011. Investigation on pollution of radioactive wastewater discharged by rare earth enterprises in Taihu Lake area [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 23(1): 34–38.]
- 高际玫, 董俊岭, 张 娜. 2002. 包头市四道沙河流域稀土行业废水对水环境影响分析[J]. *内蒙古环境保护*, 14(3): 31–33. [Gao J M, Dong J L, Zhang N. 2002. The impact of rare-earth industry wastewater on the water environment in Si Dao Sha He Basin of Baotou City [J]. *Inner Mongolia Environmental Protection*, 14(3): 31–33.]
- 高志强, 周启星. 2011. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. *生态学杂志*, 30(12): 2915–2922. [Gao Z Q, Zhou Q X. 2011. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(12): 2915–2922.]
- 洪淑娜, 蓝俊康, 陈丽娜, 等. 2014. 利用GMS模拟预测崇左市拟建稀土分离项目影响区岩溶水污染[J]. *桂林理工大学学报*, 34(1): 99–106. [Hong S N, Lan J K, Chen L N, et al. 2014. Prediction of ground water pollution in karst aquifer with conduit based on GMS simulation in Chongzuo of Guangxi [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 34(1): 99–106.]
- 黄 敏, 吴开兴, 王永航, 等. 2020. 母岩高铀离子型稀土矿采区的放射性污染风险浅析[J]. *中国稀土学报*, 38(1): 11–20. [Huang M, Wu K X, Wang Y H, et al. 2020. Elementally analysis of radioactive contamination risk in mining district of ion-type REE deposit formed by weathering of granites with high uranium content [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 38(1): 11–20.]
- 黄小卫, 张永奇, 李红卫. 2011. 我国稀土资源的开发利用现状与发展趋势[J]. *中国科学基金*, 25(3): 134–137. [Huang X W, Zhang Y Q, Li H W. 2011. Development trend and research progress of rare earth extraction in China [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 25(3): 134–137.]
- 鞠丽萍, 祝怡斌, 翟广鹏. 2020. 两种采矿方法下离子型稀土矿山生态环境成本量化对比研究[J]. *稀土*, 41(5): 143–149. [Ju L P, Zhu Y B, Zhai G P. 2020. Comparative study on ecology environmental cost of two mining methods in ion-adsorption rare earth mine [J]. *Chinese*

- Rare Earths*, 41(5): 143–149.]
- 李成, 彭捷, 陈建平, 等. 2019. 陕西省矿山地形地貌景观损毁现状与修复技术 [J]. *灾害学*, 34(4): 143–147, 152. [Li C, Peng J, Chen J P, et al. 2019. Current situation of landscape damage and rehabilitation technology of mine topography in Shaanxi Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 34(4): 143–147, 152.]
- 李先跃. 2019. 中国文化产业与旅游产业融合研究进展及趋势——基于 CiteSpace 计量分析 [J]. *经济地理*, 39(12): 212–220, 229. [Li X Y. 2019. Research progress and trend of integration of Chinese cultural industry and tourism industry: based on CiteSpace analysis [J]. *Economic Geography*, 39(12): 212–220, 229.]
- 李振民, 王勇, 牛京考. 2017. 中国稀土资源开发的生态环境影响及维护政策 [J]. *稀土*, 38(6): 144–154. [Li Z M, Wang Y, Niu J K. 2017. The influence of rare earth resources exploitation on ecology and environment and the protection policy [J]. *Chinese Rare Earths*, 38(6): 144–154.]
- 刘斯文, 黄园英, 朱晓华, 等. 2015. 离子型稀土采矿对矿山及周边水土环境的影响 [J]. *环境科学与技术*, 38(6): 25–32. [Liu S W, Huang Y Y, Zhu X H, et al. 2015. Environmental effects of ion-absorbed type rare earth extraction on the water and soil in mining area and its peripheral areas [J]. *Environmental Science & Technology*, 38(6): 25–32.]
- 刘亦晴, 梁雁茹. 2020. 基于 CiteSpace 软件的我国稀土出口研究进展与热点分析 [J]. *中国矿业*, 29(7): 44–51. [Liu Y Q, Liang Y R. 2020. Research progress and hot spot analysis of China's rare earth export based on CiteSpace software [J]. *China Mining Magazine*, 29(7): 44–51.]
- 罗婷, 郑明贵. 2019. 基于恢复费用法的离子型稀土矿山土壤环境成本量化研究 [J]. *稀土*, 40(6): 133–143. [Luo T, Zheng M G. 2019. Quantitative study on soil environmental cost of ion-adsorption rare earth mines based on recovery cost method [J]. *Chinese Rare Earths*, 40(6): 133–143.]
- 雒婉霞, 赵清荣, 程晓华, 等. 2016. 乌鲁木齐地区市售奶粉中稀土元素含量调查 [J]. *疾病预防控制通报*, 31(4): 64–67. [Luo W X, Zhao Q R, Cheng X H, et al. 2016. Investigation on rare earth contents in milk powder sold in Urumqi, Xinjiang [J]. *Bulletin of Disease Control & Prevention (China)*, 31(4): 64–67.]
- 马国霞, 王晓君, 於方, 等. 2017a. 我国稀土资源开发利用的环境成本及空间差异特征 [J]. *环境科学研究*, 30(6): 817–824. [Ma G X, Wang X J, Yu F, et al. 2017a. Evaluation of environmental costs of rare earth exploitation and analysis of their spatial difference characteristics in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 30(6): 817–824.]
- 马国霞, 朱文泉, 王晓君, 等. 2017b. 2001—2013 年我国稀土资源开发生态环境成本评估 [J]. *自然资源学报*, 32(7): 1087–1099. [Ma G X, Zhu W Q, Wang X J, et al. 2017b. Evaluation of ecological and environmental cost of rare earth resource exploitation in China from 2001 to 2013 [J]. *Journal of Natural Resources*, 32(7): 1087–1099.]
- 孟磊, 王琼, 祝怡斌, 等. 2020. 赣州某稀土冶炼场地重金属污染特征 [J]. *有色金属 (矿山部分)*, 72(4): 115–119. [Meng L, Wang Q, Zhu Y B, et al. 2020. Pollution characteristics of heavy metals in a rare earth smelt plant in Ganzhou [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 72(4): 115–119.]
- 潘正现, 谢庆剑. 2014. 稀土永磁材料生产项目环境影响评价的清洁生产水平分析 [J]. *大众科技*, 16(11): 69–70. [Pan Z X, Xie Q J. 2014. Analysis of cleaner production level in the environmental impact evaluation on the rare earth permanent magnetic materials production project [J]. *Popular Science & Technology*, 16(11): 69–70.]
- 任炳湘, 沈耀锐, 徐玲琦. 1991. 稀土加工行业放射性污染危害及监测 [J]. *环境监测管理与技术*, 3(2): 30–33. [Ren B X, Shen Y R, Xu L Q. 1991. Harm and monitoring of radioactive pollution in rare earth processing industry [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 3(2): 30–33.]
- 任学军, 任艳军, 杜彬, 等. 2011. 轻稀土浸种对油菜镉铬胁迫的生物学效应 [J]. *南方农业学报*, 42(12): 1503–1506. [Ren X J, Ren Y J, Du B, et al. 2011. Biological effects of soaking rapeseeds in light rare earth metals under Cd and Cr stress [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 42(12): 1503–1506.]
- 桑园, 覃波. 2017. 独居石冶炼过程中的放射性污染与防护 [J]. *有色冶金节能*, 33(1): 52–55. [Sang Y, Qin B. 2017. Radioactive pollution and protection in monazite smelting process [J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 33(1): 52–55.]

- 尚锦燕. 2020. 离子型稀土矿开采工艺对环境的影响及综合治理 [J]. *现代矿业*, 36(12): 234, 238. [Shang J Y. 2020. Impact of mining technology of ionic rare earth on the environment and comprehensive treatment [J]. *Modern Mining*, 36(12): 234, 238.]
- 苏文湫, 祝怡斌. 2016. 赣州稀土矿山废弃地土壤重金属污染现状评价 [J]. *有色金属 (矿山部分)*, 68(4): 81–85. [Su W Q, Zhu Y B. 2016. Evaluation of the soil heavy metal pollution in Ganzhou rare earth mine wasteland [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 68(4): 81–85.]
- 孙 峰, 冯秀娟, 陈小攀. 2013. 稀土矿区污染农田土壤治理后稀土元素的赋存形态分析 [J]. *环境科学与技术*, 36(6): 32–36, 52. [Sun F, Feng X J, Chen X P. 2013. Speciation analysis of rare earth elements (REEs) in farmland of mining area [J]. *Environmental Science & Technology*, 36(6): 32–36, 52.]
- 涂 婷, 王 月, 安 达, 等. 2017. 赣南稀土矿区地下水污染现状、危害及处理技术与展望 [J]. *环境工程技术学报*, 7(6): 691–699. [Tu T, Wang Y, An D, et al. 2017. Present situation, hazard and treatment technology of groundwater pollution in rare earth mining area of southern Jiangxi [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 7(6): 691–699.]
- 王爱云, 李以科, 李瑞萍, 等. 2017. 内蒙古白云鄂博稀土资源开发利用生态环境影响成本分析 [J]. *地球学报*, 38(1): 94–100. [Wang A Y, Li Y K, Li R P, et al. 2017. Environmental cost analysis of the development and utilization of the Bayan Obo rare earth resources, Inner Mongolia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(1): 94–100.]
- 王东仓, 黄建英. 2017. 稀土矿露天开采过程的污染 [J]. *环境与发展*, 29(7): 51, 53. [Wang D C, Huang J Y. 2017. Pollution of open-pit mining in rare earth [J]. *Environment and Development*, 29(7): 51, 53.]
- 王国珍. 2007. 稀土冶炼“三废”及放射性污染现状及治理建议 [J]. *稀土信息*, (8): 19–23. [Wang G Z. 2007. Present situation of “three wastes” and radioactive pollution in rare earth smelting and its control suggestions [J]. *Rare Earth Information*, (8): 19–23.]
- 王炯辉, 张 喜, 陈道贵, 等. 2015. 南方离子型稀土矿开采对地下水的影响及其监控 [J]. *科技导报*, 33(18): 23–27. [Wang J H, Zhang X, Chen D G, et al. 2015. Influence of during south ion-absorbed-type rare earth deposit mining on groundwater and it's monitoring [J]. *Science & Technology Review*, 33(18): 23–27.]
- 王文华, 赵 晨, 赵俊霞, 等. 2017. 包头某稀土尾矿库周边土壤重金属污染特征与生态风险评价 [J]. *金属矿山*, (7): 168–172. [Wang W H, Zhao C, Zhao J X, et al. 2017. Pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metals in soils around rare tailings in Baotou [J]. *Metal Mine*, (7): 168–172.]
- 王 珍. 2015. 中国稀土资源开发和环境保护问题研究 [J]. *浙江工业大学学报 (社会科学版)*, 14(1): 13–17. [Wang Z. 2015. On the development of China's rare earth resources and environment protection [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology (Social Science)*, 14(1): 13–17.]
- 谢金亮, 张建锋, 刘永兵, 等. 2020. 白云鄂博稀土伴生矿区土壤重金属污染及其环境评价 [J]. *中国水土保持科学*, 18(2): 92–101. [Xie J L, Zhang J F, Liu Y B, et al. 2020. Heavy metal pollution and environmental assessment in the soil of the rare earth associated mining area in Bayan Obo [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 18(2): 92–101.]
- 徐 丰, 李恒凯, 王秀丽. 2020. 离子吸附型稀土开采的环境问题及成本评估进展 [J]. *稀土*, 41(4): 119–127. [Xu F, Li H K, Wang X L. 2020. Progress in environmental problems and cost assessment of ion-adsorption rare earth mining [J]. *Chinese Rare Earths*, 41(4): 119–127.]
- 徐水太, 项 宇, 刘中亚. 2016. 离子型稀土原地浸矿地下水氨氮污染模拟与预测 [J]. *有色金属科学与工程*, 7(2): 140–146. [Xu S T, Xiang Y, Liu Z Y. 2016. Simulation and predication of ammonia nitrogen contamination of groundwater in ionic adsorption rare earth *in situ* leaching mining [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 7(2): 140–146.]
- 许礼刚. 2015. 国外稀土资源回收循环利用模式对我国的启示 [J]. *矿山机械*, 43(10): 10–13. [Xu L G. 2015. Enlightenment to China from foreign recycling mode of rare earth resource [J]. *Mining & Processing Equipment*, 43(10): 10–13.]
- 许明发, 赖晓洁, 廖燕庆, 等. 2019. 南方离子型稀土开发利用中各固体物料放射性的研究 [J]. *中国辐射卫生*, 28(3): 299–302. [Xu M F, Lai X J, Liao Y Q, et al. 2019. Study on radioactivity of solid materials in development and utilization of southern ionic rare earths [J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 28(3): 299–302.]
- 薛 冰, 赵冰玉, 李京忠. 2022. 地理学视角下城市复杂性

- 研究综述——基于近 20 年文献回顾 [J]. *地理科学进展*, 41(1): 157–172. [Xue B, Zhao B Y, Li J Z. 2022. Urban complexity studies from the perspective of geography: a review based on the literature in the past 20 years [J]. *Progress in Geography*, 41(1): 157–172.]
- 杨显华, 黄洁, 田立, 等. 2015. 基于高分辨率遥感数据的矿山环境综合治理研究——以冕宁牦牛坪稀土矿为例 [J]. *国土资源遥感*, 27(4): 115–121. [Yang X H, Huang J, Tian L, et al. 2015. A discussion on comprehensive governance of mine environment based on high resolution remote sensing data: a case of Maoniuping REE deposit, Mianning County [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 27(4): 115–121.]
- 杨新兴, 李世莲, 尉鹏, 等. 2015. 环境中的放射性污染及其危害 [J]. *前沿科学*, 9(1): 4–15. [Yang X X, Li S L, Yu P, et al. 2015. Radioactive pollution in the environment and its harm [J]. *Frontier Science*, 9(1): 4–15.]
- 杨元根, 袁可能, 何振立. 1999. 淋滤条件下红壤中稀土元素的环境化学行为研究 [J]. *环境保护科学*, 25(4): 25–28, 41. [Yang Y G, Yuan K N, He Z L. 1999. Research on environmental effect of REE in red soil under leaching conditions [J]. *Environmental Protection Science*, 25(4): 25–28, 41.]
- 姚栋伟, 程莉, 李天慈, 等. 2016. 稀土矿不同开采方式引发地质环境问题及治理 [J]. *山西建筑*, 42(10): 198–200. [Yao D W, Cheng L, Li T C, et al. 2016. Research on geological environmental problems led by different mining methods of rare earths ore and the measures of recovery and management [J]. *Shanxi Architecture*, 42(10): 198–200.]
- 叶晓萍, 罗润香. 2019. 惠州稀土矿区冬季蔬菜的重金属污染分析 [J]. *广东化工*, 46(17): 20–21. [Ye X P, Luo R X. 2019. Analysis on heavy metal pollution of vegetables in winter in Huizhou rare earth mining area [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 46(17): 20–21.]
- 易师, 刘荣丽. 2014. 稀土催化剂在环保领域中的研究和应用 [J]. *中国环保产业*, (10): 30–33. [Yi S, Liu R L. 2014. Research and application of rare-earth catalyst in environmental protection field [J]. *China Environmental Protection Industry*, (10): 30–33.]
- 于晓燕, 宋宇辰, 魏光普, 等. 2020. 轻稀土开采、冶炼对环境影响及修复治理研究 [J]. *应用化工*, 49(10): 2630–2635. [Yu X Y, Song Y C, Wei G P, et al. 2020. Study on the effects of light rare earth mining and smelting on environmental pollution and remediation [J]. *Applied Chemical Industry*, 49(10): 2630–2635.]
- 於方, 王晓君, 马国霞, 等. 2017. 2000—2013 年包头轻稀土矿“三废”污染物产排量变化及环境成本核算 [J]. *中国稀土学报*, 35(4): 537–545. [Yu F, Wang X J, Ma G X, et al. 2017. Analysis of changes of production and emission of three wastes pollutants and evaluation of environment cost of rare earth refining in Baotou from 2000 to 2013 [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 35(4): 537–545.]
- 张博, 宁阳坤, 曹飞, 等. 2018. 世界稀土资源现状 [J]. *矿产综合利用*, (4): 7–12. [Zhang B, Ning Y K, Cao F, et al. 2018. Current situation of worldwide rare earth resources [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (4): 7–12.]
- 张光伟, 崔学奇. 2012. 我国稀土尾矿资源的综合回收利用现状及展望 [J]. *矿业研究与开发*, 32(6): 116–119. [Zhang G W, Cui X Q. 2012. Current status and prospect of comprehensive recovery and utilization of rare earth tailings in China [J]. *Mining Research and Development*, 32(6): 116–119.]
- 赵永红, 张涛, 成先雄. 2020. 离子吸附型稀土矿区土壤与水环境氨氮污染及防治技术研究进展 [J]. *稀土*, 41(1): 124–132. [Zhao Y H, Zhang T, Cheng X X. 2020. Advance of ammonia nitrogen pollution and control techniques for soil and water environment in ion-adsorption rare earth mines [J]. *Chinese Rare Earths*, 41(1): 124–132.]
- 郑国栋, 王琨, 陈其慎, 等. 2021. 世界稀土产业格局变化与中国稀土产业面临的问题 [J]. *地球学报*, 42(2): 265–272. [Zheng G D, Wang K, Chen Q S, et al. 2021. The change of world rare earth industrial structure and the problems faced by China's rare earth industry [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 265–272.]
- 周美静, 黄健柏, 邵留国, 等. 2020. 中国稀土政策演进逻辑与优化调整方向 [J]. *资源科学*, 42(8): 1527–1539. [Zhou M J, Huang J B, Shao L G, et al. 2020. Change and adjustment direction of China's rare earth policy [J]. *Resources Science*, 42(8): 1527–1539.]
- Atibu E K, Lacroix P, Sivalingam P, et al. 2018. High contamination in the areas surrounding abandoned mines and mining activities: an impact assessment of the Dilala,

- Luilu and Mpingiri Rivers, Democratic Republic of the Congo [J]. *Chemosphere*, 191: 1008–1020.
- Azam A, Ahmed A, Kamran M S, et al. 2021. Knowledge structuring for enhancing mechanical energy harvesting (MEH): an in-depth review from 2000 to 2020 using CiteSpace [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150: 111460. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111460.
- Bai Y, Long C M, Hu G P, et al. 2019. Association of blood chromium and rare earth elements with the risk of DNA damage in chromate exposed population [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 72: 103237. DOI: 10.1016/j.etap.2019.103237.
- Bailey G, Joyce P J, Schrijvers D, et al. 2020. Review and new life cycle assessment for rare earth production from bastnäsite, ion adsorption clays and lateritic monazite [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 155: 104675. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104675.
- Balaram V. 2019. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact [J]. *Geoscience Frontiers*, 10(4): 1285–1303.
- Chen C M. 2006. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3): 359–377.
- Chen H B, Chen Z B, Chen Z Q, et al. 2020. Calculation of toxicity coefficient of potential ecological risk assessment of rare earth elements [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104(5): 582–587.
- European Commission. 2020. Study on the EU's list of critical raw materials (2020) [R]. Brussels: European Commission.
- Findeiß M, Schäffer A. 2017. Fate and environmental impact of thorium residues during rare earth processing [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1): 179–189.
- Gong B, He E K, Qiu H, et al. 2019. Phytotoxicity of individual and binary mixtures of rare earth elements (Y, La, and Ce) in relation to bioavailability [J]. *Environmental Pollution*, 246: 114–121.
- He D, Xia B X, Zhou Q, et al. 2019. Rare earth elements regulate the endocytosis and DNA methylation in root cells of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Chemosphere*, 227: 522–532.
- He X Y, Zheng C L, Sui X, et al. 2018. Biological damage to Sprague-Dawley rats by excessive anions contaminated groundwater from rare earth metals tailings pond seepage [J]. *Journal of Cleaner Production*, 185: 523–532.
- Law Y H. 2019. Politics could upend global trade in rare earth elements [J]. *Science*, 364(6436): 114–115.
- Lee J C K, Wen Z G. 2018. Pathways for greening the supply of rare earth elements in China [J]. *Nature Sustainability*, 1(10): 598–605.
- Li J X, Hong M, Yin X Q, et al. 2010. Effects of the accumulation of the rare earth elements on soil macrofauna community [J]. *Journal of Rare Earths*, 28(6): 957–964.
- Liu Z W, Lu C B, Yang S, et al. 2020. Release characteristics of manganese in soil under ion-absorbed rare earth mining conditions [J]. *Soil and Sediment Contamination: an International Journal*, 29(7): 703–720.
- Liu Z, Zhang J, Lu C, et al. 2018. Effect of rare earth ions on regular of nitride migration in soil [J]. *Ekoloji*, 27: 525–534.
- Malhotra N, Hsu H S, Liang S T, et al. 2020. An updated review of toxicity effect of the rare earth elements (REEs) on aquatic organisms [J]. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 10(9): 1663. DOI: 10.3390/ani10091663.
- Martino C, Bonaventura R, Byrne M, et al. 2017. Effects of exposure to gadolinium on the development of geographically and phylogenetically distant sea urchins species [J]. *Marine Environmental Research*, 128: 98–106.
- McLellan B C, Corder G D, Golev A, et al. 2014. Sustainability of the rare earths industry [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 20: 280–287.
- Moreira A, Henriques B, Leite C, et al. 2020. Potential impacts of lanthanum and yttrium through embryotoxicity assays with *Crassostrea gigas* [J]. *Ecological Indicators*, 108: 105687. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105687.
- Naccarato A, Tassone A, Cavaliere F, et al. 2020. Agrochemical treatments as a source of heavy metals and rare earth elements in agricultural soils and bioaccumulation in ground beetles [J]. *The Science of the Total Environment*, 749: 141438. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141438.
- Pell R, Wall F, Yan X Y, et al. 2019. Mineral processing simulation based-environmental life cycle assessment for

- rare earth project development: a case study on the Songwe Hill Project [J]. *Journal of Environmental Management*, 249: 109353. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109353.
- Schreiber A, Marx J, Zapp P. 2021. Life Cycle Assessment studies of rare earths production—findings from a systematic review [J]. *The Science of the Total Environment*, 791: 148257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148257.
- Schulze R, Abbasalizadeh A, Bulach W, et al. 2018. An ex-ante LCA study of rare earth extraction from NdFeB magnet scrap using molten salt electrolysis [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(4): 493–505.
- Tennesen M. 2014. Rare earth [J]. *Science*, 346(6210): 692–695.
- Tian S H, Li K X, Møller P, et al. 2020. Assessment of reactive oxygen species production and genotoxicity of rare earth mining dust: implications for public health and mining management [J]. *The Science of the Total Environment*, 740: 139759. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139759.
- Tian S H, Liang T, Li K X, et al. 2018. Source and path identification of metals pollution in a mining area by PMF and rare earth element patterns in road dust [J]. *Science of the Total Environment*, 633: 958–966.
- USGS. 2021. Mineral commodity summaries 2011 [R]. Reston: National Minerals Information Center.
- Wang L, Wang P, Chen W Q, et al. 2020a. Environmental impacts of scandium oxide production from rare earths tailings of Bayan Obo Mine [J]. *Journal of Cleaner Production*, 270: 122464. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122464.
- Wang X B, Yao M T, Li J S, et al. 2017. China's rare earths production forecasting and sustainable development policy implications [J]. *Sustainability*, 9(6): 1003. DOI: 10.3390/su9061003.
- Wang Y J, Wan Q, Liu B B, et al. 2020b. Co-transport and competitive retention of different ionic rare earth elements (REEs) in quartz sand: effect of kaolinite [J]. *Science of the Total Environment*, 722: 137779. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137779.
- Wei J, Wang C R, Yin S J, et al. 2020. Concentrations of rare earth elements in maternal serum during pregnancy and risk for fetal neural tube defects [J]. *Environment International*, 137: 105542. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105542.
- Weng Z H, Haque N, Mudd G M, et al. 2016. Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements [J]. *Journal of Cleaner Production*, 139: 1282–1297.
- Xu F, Li H K, Li Y S. 2021. Ecological environment quality evaluation and evolution analysis of a rare earth mining area under different disturbance conditions [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(6): 2243–2256.
- Yin X B, Martineau C, Demers I, et al. 2021. The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada [J]. *Environmental Reviews*, 29(3): 354–377.
- Yu J, Chen W, Liu J, et al. 2012. Study of the promoting mechanism of rare earth on water eutrophication in the upper reaches of the Yangtze River [J]. *Disaster Advances*, 5(4): 1669–1675.
- Yue Y, Qi L, Li Y, et al. 2020. Negative effects of rare earth oxide nanoparticles of La_2O_3 , Nd_2O_3 , and Gd_2O_3 on the ammonia-oxidizing microorganisms [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 20(8): 3114–3123.
- Zhang F, Hu H Q, Wang L H, et al. 2018. Effects of rare earth and acid rain pollution on plant chloroplast ATP synthase and element contents at different growth stages [J]. *Chemosphere*, 194: 441–449.
- Zhang J C, Wang P, Sun J, et al. 2009. Viewing safety of rare-earths-based drugs from effect of rare earth on bone metabolism [J]. *Progress in Chemistry*, 21(5): 919–928.
- Zicari M A, D'Aquino L, Paradiso A, et al. 2018. Effect of cerium on growth and antioxidant metabolism of *Lemna minor* L [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163: 536–543.