

离子吸附型稀土开采的环境问题及成本评估进展

徐 丰¹, 李恒凯¹, 王秀丽²

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 江西理工大学 经济管理学院, 江西 赣州 341000)

摘 要:离子吸附型稀土开采带来严重的生态环境问题,引起人们日益关注。较全面地综述了国内外学者对环境成本评估的研究方法及其进展。针对稀土矿区这个特定区域所出现的环境问题进行总结,对基于成本的环境治理成本法、基于损失的环境退化法以及 NPP 损失估算法三种评估方法进行对比分析,对其在稀土矿区的适用性展开讨论,最后,对稀土矿区环境成本遥感评估方法进行展望,并提出合理的建议。稀土矿区环境成本评估方法可以反映稀土资源在开发过程中对生态环境的影响程度,并为矿区生态环境治理提供基础数据和理论支撑,对稀土矿绿色开采和可持续发展有一定的借鉴意义。

关键词:稀土矿区;环境成本;治理成本;植被净第一性生产力

中图分类号:X830

文献标识码:A

文章编号:1004-0277(2020)04-0119-09

稀土元素有“工业维生素”之称,广泛应用于国民经济生产的各个领域,是极其重要的战略资源。其中,南方离子吸附型稀土以离子态吸附于土壤中,主要由中重稀土组成,已在包括航空航天、精确制导武器等诸多高精尖领域具有不可替代的作用^[1]。然而,由于南方离子型稀土矿点大多位于偏远山区,山高林密、矿区分散、矿点众多,导致监管成本高、难度大。无序粗放式的资源开发方式不仅导致资源浪费,而且带来了一系列生态环境问题,如大面积土地损毁,植被破坏、水土流失等^[2]。此外,由于稀土资源不同的特性,很长一段历史时期内离子吸附型稀土进行开采时采用池浸、堆浸开采

工艺,将稀土矿剥离表层土,开挖山体、搬运矿石,在冶炼分离过程中会释放出大量的氨氮废气和高盐度废水,对生态环境造成极大的破坏^[3,4]。稀土开采带来的环境问题,引起了国家有关部门的高度关注,开展了稀土生产秩序专项整治行动,对稀土矿产品实行了指令性计划管理,控制总量,限制配额,将稀土开采的环境影响纳入稀土开采计划控制中^[5,6]。

习近平总书记提出了“既要绿水青山,也要金山银山”的绿色发展理念,离子型稀土矿区的开采不能牺牲环境成本为代价,应尽快加强对稀土矿区环境成本的评估研究,加强稀土矿区生态环境监督

收稿日期:2019-07-04

基金项目:江西省自然科学基金项目(2018BAB206018);江西省高校人文社会科学研究一般项目(JC17111)

作者简介:徐 丰(1995-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事环境遥感方面的研究,E-mail: 1278564242@qq.com;通讯作者:李恒凯,副教授,E-mail: giskai@126.com

DOI:10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.20200024

与治理,促进稀土行业持续健康发展^[7]。当前,从国内外的研究成果来看,对矿区以外的环境成本研究较多,而对矿区的环境成本研究甚少,参考其他矿区产生的环境问题及其解决方法,对矿区的环境成本评估进行归纳总结。本文在总结离子吸附型稀土矿区开采过程环境问题的基础上,分析了矿区环境成本评估方法及在稀土矿区的适用性,并结合植被净第一性生产力(NPP)对环境的影响,构建更全面地评估环境成本。并对如何定量地评估矿区环境成本存在的问题提出了建议,从而为稀土开采环境成本评估提供决策支持。

1 离子吸附型稀土及其开采的环境问题

由于离子吸附型稀土矿中的稀土元素主要以离子态存在,因此无法采用磁选、重选或浮选等一般物理选矿方法,只能采用电解质离子交换化学选矿法,先后使用了池浸、堆浸和原地浸矿工艺,这类特殊的开采工艺加上稀土矿区的乱采滥挖、不合理开采、回收工艺落后以及环境保护不及时等问题,使得其主产区赣南地区的稀土矿区生态环境遭到了严重破坏,以土壤肥力退化、水土流失、表层植被难以生长为主要表现形式的生态环境问题尤为突出^[8]。

(1) 稀土开发过程中对生态破坏具有不可恢复性,且自然恢复困难。2007年之前,离子型稀土矿通常采用以“池浸”和“堆浸”为主的开采工艺,采取的是表土剥离的搬山运动式开采,严重破坏了矿区生态环境。后期采用的原地浸矿开采工艺在一定程度上减缓了对矿区土地的破坏,但大量注液孔的开挖和浸矿液体不可避免的泄露,仍会对矿区土壤造成一定的破坏^[9,10]。稀土矿区土地恢复过程表明,稀土开采技术包括池浸、地浸及原地浸矿,都会产生较多的尾砂,导致矿区土壤沙化,造成肥力、保水力衰落^[11]。此外,在稀土开采过程使用了大量酸性浸矿液体,改变了土壤酸碱性。稀土矿区受干扰地区占用大量的森林、果园以及耕地面积。对受干

扰地区的复垦措施,实施难度大,恢复周期长,难以回到原始状态,具有生态脆弱性^[12,13]。

(2) 稀土开采过程对碳排放的影响及冶炼过程中带来的环境污染。矿区诸多环境因子中,植被不仅本身含碳量高,具有较强的固碳作用^[14]。而稀土开采与利用不仅将埋藏于地下的碳元素释放到大气中,还破坏了矿区的植被,减少了对碳元素的吸收,进一步促进碳排放。碳排放的变化将直接或间接影响和改变土壤植被净初级生产力以及碳循环的时空分布格局。植被净第一性生产力(NPP)的变化从而引发生物圈一系列生物物理机制和过程变化,如碳、水、热量和养分等循环的改进和重新分配,这些变化对于局地、区域甚至全球气候具有反馈作用^[15,16]。大部分的稀土冶炼企业,环保治理设施并不完善,甚至有些小型稀土冶炼厂都没有环保治理设施,稀土冶炼会排放出大量的废气、废水和废渣,对周边的大气、水体和土壤造成严重的污染,给公众的生命健康以及当地生态环境带来巨大的损失^[17,18]。

(3) 稀土开采后导致地下水污染且难以治理。在稀土开采过程中,由于防护措施不完善等原因,部分母液在井道中会发生侧漏和泄露,会有大量浸矿液体进入矿区土壤、地表水和地下水中,在雨水的冲刷和淋滤作用下,这些含氮污染物会向深层土壤迁移和转化。由于离子型稀土资源的开采,定南、全南、龙南水体氨氮污染极为严重,部分水体已恶化至四类水质,氨氮等四类参数均超地表水环境质量标准Ⅴ类水标准限值数倍至一百倍以上^[19,20]。

(4) 稀土开采带来的土地沙化及荒漠化。由于南方高温多雨,稀土矿区裸露的土壤受到降雨的淋洗,易造成土壤侵蚀,使得养分和有机质流失,导致矿区大面积的土地退化直至荒漠化。池浸、堆浸等工艺开采阶段需剥离矿体和土壤,易破坏地表植被。此外,浸池下方分别堆积大量尾砂和废土,导致水土流失、土壤沙化和形成荒漠化地表。李恒凯^[21]对赣南岭北矿区进行土壤侵蚀评估检测以及不同开采模式下的时空演变分析发现,在1990-

2013年间随着矿点规模的持续扩大,矿区的土壤侵蚀呈加剧趋势,土壤侵蚀面积占整个矿区面积最高为22.04%,剧烈侵蚀面积在2013年达到4.99 km²。但原地浸矿工艺能够一定程度上解决矿区的剧烈侵蚀问题。

2 矿区环境成本评估进展

随着资源需求量的不断扩大,矿产资源的无节制开采、滥采、黑矿等现象的发生,导致矿区的生态环境遭受到了严重的破坏,近年来中国各地政府纷纷出台矿区环保政策,如《稀土等矿产开发秩序专项整治行动方案》、《关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》等,使得各地政府及企业不得不考虑在环境保护政策下矿产开采带来的环境成本。矿区环境成本由于行业、地域特点、矿产特征等因素的影响,计量方法与一般的成本评估有所差异。在2004年国家环保总局制定的《中国资源环境经济核算体系框架》中,计量方法主要分为两类,一是基于成本的方法,二是基于损害的方法。此外,NPP系数作为地表碳循环的重要组成部分,与矿区的自然环境以及人类活动的影响有着密切的联系,通过计算NPP系数来估算环境成本的方法也渐渐成熟。

2.1 基于成本的环境治理成本法

环境治理成本法,主要是从“防护”的角度,估算出治理所有污染物所需要的成本,假设对所有造成环境污染排放的污染物都进行治理,从而消除污染,使生态环境恢复至原始的状态,在其治理过程中需要的所有成本即作为环境成本的估算值,其模型如式(1)所示。

$$C = \sum_{i=1}^n \bar{c}_i \times p_i \quad (1)$$

式中: C 为总治理成本, \bar{c}_i 为每种污染物的单位治理成本, p_i 为污染物产生量, i 代表污染物的类别。

该模型最初由过孝民、张慧勤^[22]等提出,为解决环境费用效益分析问题,计算国民经济中的环境费用,为环境规划和预测提供数据支持。杨金田、王金南^[23]通过计算各污染物的治理成本系数,来分

摊各污染物的治理费用,从而估算出各种污染物的单位治理成本。於方^[24]等将环境治理成本法运用在稀土矿区,计算包头市的稀土开发成本。2000年,日本环境省提出了“环境保全成本”,指出是针对企业为环境保全而付出的投资和费用^[25]。Christine Jasch基于联合国可持续发展司制定的方法,以经济的角度定义了环境成本管理的方法,提供了评估企业环境成本的基本框架^[26]。Saleem Ali等从社会效益和环境效益的角度,围绕稀土矿区的环境结构和社会冲突,分析了稀土矿区采矿、处理、监测、回收等方面的环境成本^[27]。王爱云、李以科等以白云鄂博稀土矿区开发为例,采用的是环境成本治理法来计算环境破坏的虚拟治理成本,将冶炼过程中排放出的“三废”治理成本定量化、具体化,计算出在考虑稀土矿区虚拟环境治理成本之后,其市场价大幅度低于真实成本,将有助于推动稀土定价机制改革^[28]。

环境治理成本法简单易操作,在研究中经常被使用。但这种方法并不完整,存在理论缺陷,如果采用该研究方法,就等同于默认污染治理的成本与污染排放造成的危害是一致的^[29]。污染治理的效益就将无从体现,容易导致概念上的混淆。另外,使用此研究方法计算得到的结果仅仅是防止环境功能退化所需的治理成本,并不是实际造成的环境污染成本。

2.2 基于损害的环境退化损失法

环境退化损失法是在自然环境被污染后,由于生态功能的退化对人们的生活和经济活动造成一定程度损害的角度,来评价环境退化的成本价值。其核心是确定环境的价值,在当前的污染治理水平下,从实际生产过程中产生的残留污染物出发,估算其对周边环境、人体、作物等所造成的损失的价值量^[1,8],其模型如式(2)所示。

$$S = \sum_{i=1}^n P_i \Delta R_i \quad (2)$$

式中: S 为环境破坏或污染导致损失的总价值; P_i 为第*i*种产品的市场价格; R_i 为*i*种产品由于生态破坏或污染减少的产量。

该模型源于王金南、於方等^[30],主要对全国绿色国民经济核算和环境污染经济评估损失进行调查研究,为建立全国的绿色国民经济核算体系框架奠定基础。Romeo、Aline 等^[31]构建了基于生命价值估算的大气污染成本模型,该模型对公路运输过程中产生的总悬浮颗粒物(TSP)在空气中的浓度带来的环境成本进行估算。在此基础上,彭武珍^[32]基于统计学的角度,运用环境退化损失法计算了浙江省的环境价值,适用于各个环境下的成本评估。马国霞、朱文泉等^[8]基于环境成本综合计量模型,构建了稀土资源开采及冶炼过程中的生态破坏和环境污染损失计算框架,利用遥感数据、稀土矿统计数据、污染源普查数据等多种数据源,全方面、定量地评估了中国三大稀土矿区稀土资源开发及冶炼的生态环境成本,通过长时序的分析,对矿区环境变化有充分了解,这为环境成本的评估奠定基础^[33]。

在实际操作中,需要对污染损失进行专业调查,采用精确的评估技术来确定污染排放对当地环境所产生的物理损害,进而量化这些损害成本,确定污染所造成的环境退化成本^[34]。从理论上讲,采用污染损失法计算得到的污染损失才是真正意义上的环境退化成本。污染损失的估算也可作为评估污染治理的效益。因此在实际应用中,该方法需要大量的调查研究,才可能获取精确的环境退化损失。与治理成本法相比,环境退化损失法更具合理性,体现了污染的危害性。

2.3 NPP 损失评估方法

植被净第一性生产力是指在单位时间内,绿色植物在单位面积里积累的有机物数量,是在光合作用下产生的有机质总量中去除植被自养呼吸后的剩余部分。NPP 作为地表碳循环的重要组成部分,可以作为衡量矿区生态环境的一个重要参数,其参数能在一定程度上来反映生态环境被破坏的程度。可以通过高分辨率遥感影像拟合的 NDVI 曲线,依据稀土开采对矿区植被-土壤系统的碳汇变化来计算植被的 NPP,并研究稀土开采对生态环境的影响。CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型

是由 Potter 和 Field 提出的基于 Monyeith 将观测到的植被吸收光能利用效率(ϵ)和光合有效辐射(APAR)来计算植物生产力^[35,36]。它是由遥感数据、气象数据、植被类型以及土壤类型数据共同驱动的光能利用率模型,模型中 NPP 主要取决于 APAR 和光能利用率(E),如式(3)所示。

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times E(x,t) \quad (3)$$

式中: x 为空间位置; t 为时间。

Lieth 及其团队利用实测数据建立了全球第一个 NPP 回归模型(即 Miami 模型),指出 NPP 是年平均气温和年降水量的函数^[37,38]。1977 年,叶菲莫娃根据各种类型的植物的年增长量,计算出植被产量与辐射干燥指数和辐射平衡年总量的定量关系^[39,40]。此后,NPP 的研究主要朝着两个方向发展:一是利用遥感技术所获数据来实现对地表 NPP 的估算;二是通过所建立的植物生理过程模型来模拟地表 NPP。偶星^[41]尝试运用 CASA 模型模拟平朔矿区植被 NPP,这也是对矿区 NPP 评估的首次系统研究,认为小尺度 NPP 模型适用于矿区植被,仍需对模型进行优化。黄翌^[15]基于遥感图像研究煤炭开采活动对植被的影响模型基础上计算植被 NPP 损失量,基于大同矿区的植被特征对 CASA 模型进行改性,并认识到 NPP 损失量测算,需要表达精度更高的遥感数据及融合方法。周夏飞^[42]以江西省赣州市为例,利用遥感和模型方法,建立了适用于稀土矿区开采导致的 NPP 遥感评估方法。不仅对矿区直接破坏区进行了评估,还对间接受损区进行了评估,提高了 NPP 评估的精度。

植被 NPP 评估模型也有其缺点,即变化环境条件下由遥感反演地表信息存在不确定性,但随着高精度卫星的大范围、高频率应用,将极大地推进植被遥感监测和 NPP 研究的发展及评估精度的提高,增强其评估和预测能力。

3 离子吸附型稀土开采环境评估问题

针对离子吸附型稀土矿区的环境评估,尽管当

前有少量应用,仍然存在诸多问题。

(1)当前研究缺乏理论与实际的结合,未能解决实际的环境问题,理论研究及构建模型研究较多。就环境成本的评估模型而言,中国学者更多的是对于计量评估模型的理论基础、构建方法以及构建步骤等问题进行研究,仅限于模型的构建层面,中国矿区的环境污染问题并没有得到实际的解决方案和措施。稀土矿区的环境特征具有复杂性,需要根据自身特征对模型进行改进。因此,模型的确定,需要加强理论与实际的结合,才能提高环境成本评估的准确性。

(2)国内外对环境成本评估以及植被净第一性生产力的相关研究已取得了较大的进展,但中国国内的环境评估水平与国外相比有较大的差距。主要表现在:中国近几年发射了大量高精度、多光谱卫星,对最新的卫星数据使用较少,未形成特定于中国卫星的反演模型,而现在的研究大部分采用的是 Landsat、MODIS 等影像数据;对于研究区域、研究对象的不同,均采用相同的评估模型,未针对特定区域以及特定对象而对评估模型进行改进或创新。

(3)在稀土矿区结构、植被、气候等方面的遥感识别,监测精度不足。稀土开采有其特殊性,开采所使用的氨氮化合物对植被和气候有较多的影响,在环境成本评估以及 NPP 计算中,需要利用遥感技术对植被覆盖率、植被类型、碳排放量、土壤侵蚀量等数据进行精准的分析,表达精度受到遥感影像的分辨率及融合方法制约,因此,现有的方法和技术仍然不足以支撑相关研究。

(4)稀土矿区环境问题具有多因素、滞后性、复杂性、累积性、时空性等特点,因此其计算难度极大,而且当前矿区环境成本评估的技术以及模型过于单一,跨学科研究较多,大部分研究者仅仅只从自身研究方向出发,以单一学科角度来探讨矿区环境成本的评估,所以当前的研究中,能够综合性、跨学科、多角度探讨出较为有效可行的环境成本评估方法的并不多。

4 展望

1. 卫星遥感是唯一可以重复获取时间、空间、分辨率并适用于大范围及全球环境数据的工具,随着遥感技术的不断发展,高精度遥感卫星的不断应用,矿区环境精细化管理的要求不断提高,因此,高效地利用现有数据及其方法,动态的研究模型、耦合的遥感空间数据以及 GIS 技术,将成为未来一个重要的、创新的和挑战性极高的发展领域。

2. 植被净第一性生产力(NPP)是一个定量描述生态系统环境特征的重要参数。遥感技术的应用为获取大规模的 NPP 分布及其时空演变动态规律提供了更好的观测方法。在大部分的矿区环境成本模型研究中,并没有加入 NPP 这一因素,不能直观地对植被破坏、气候变化等方面进行探测。环境变化在加剧,环境压力在增大,如何减缓环境变化及如何适应这种变化后的新环境,必须具有创新的政策方法和科学的策略。在获得明显的进展和成果的基础上,NPP 模型的预测和评估研究,将展现出大步前进的美好前景。

3. 纵观全球稀土矿市场,中国以 36.7%的矿产储量,每年为世界提供了 83%的稀土需求量,然而中国的稀土定价机制却没有很好的体现出生态环境成本,其市场价格与其内在价值和真实成本不符。因此,希望诸多研究者以及政策制定者对矿区环境成本进行关注和了解,依照“既要绿水青山,也要金山银山”的绿色发展理念,尽快对中国矿区环境现状进行治理和改革,提出相关的政策和建议,要求人们在发展经济的同时,注重矿区环境保护,解决环境问题。

参考文献:

[1] 马国霞,王晓君,於方,吴琼,彭菲. 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, 2017, 30(6): 817-824.

Ma G X, Wang X J, Yu F, Wu Q, Pen F. Evaluation of environmental costs of rare earth exploitation and analysis

- of their spatial difference characteristics in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(6):817-824.
- [2] 欣雨. 保护资源发展低碳自主创新扩大应用——记 2010 国际稀土研讨会[J]. *四川稀土*, 2010, (4):13-15.
- Xin Y. Protecting resources, developing low carbon, independent innovation, expanding application—remember the 2010 International Rare Earth Symposium [J]. *Sichuan Rare Earth*, 2010, (4):13-15.
- [3] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- Compilation Committee of the First National Census of Pollution Sources Pollution Source Census. Handbook of Pollutant Discharge Coefficient for Pollution Sources Census [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [4] 李海东, 沈渭寿, 贾明, 张涛. 大型露天矿山生态破坏与环境污染损失的评估[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2015, 39 (6):112-118.
- Li H D, Shen W S, Jia M, Zhang T. Economic losses assessment for ecological destruction and environmental pollution in large-scale opencast mine [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39 (6):112-118.
- [5] 工信部: 关于规范稀土投资项目核准的指导意见[J]. *稀土信息*, 2017, (8):42-43.
- Ministry of Industry and Information Technology: Guidance on regulating the approval of rare earth investment projects [J]. *Rare Earth Information*, 2017, (8): 42-43.
- [6] 许明, 杨丹辉. 中国稀有矿产资源产业的国际竞争力分析[J]. *东南学术*, 2019, (1):111-122.
- Xu M, Yang D H. An analysis of international competitiveness of China's rare mineral resources industry [J]. *Southeast Academic Research*, 2019, (1):111-122.
- [7] 段锦, 康慕谊, 江源. 东江流域生态系统服务价值变化研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27 (1):91-103.
- Duan J, Kang M Y, Jiang Y. Dynamic valuation on ecosystem services of Dongjiang River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27 (1):91-103.
- [8] 马国霞, 朱文泉, 王晓君, 周夏飞, 於方. 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*, 2017, 32(7):1087-1099.
- Ma G X, Zhu W Q, Wang X J, Zhou X F, Yu F. Evaluation of ecological and environmental cost of rare earth resource exploitation in China from 2001 to 2013 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7):1087-1099.
- [9] McLellan B C, Corder G D, Ali S H. Sustainability of rare earths—an overview of the state of knowledge [J]. *Minerals*, 2013, 3(3): 304-311.
- [10] 於方, 王晓君, 马国霞, 王志强. 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*, 2017, 35(4):537-545.
- Yu F, Wang X J, Ma G X, Wang Z Q. 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*, 2017, 35(4):537-545.
- [11] 李恒凯, 雷军, 吴娇. 基于多源时序 NDVI 的稀土矿区土地毁损与恢复过程分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1):232-240.
- Li H K, Lei J, Wu J. Analysis of land damage and recovery process in rare earth mining area based on multi-source sequential NDVI [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (1):232-240.
- [12] 张杰林, 曹代勇. 高光谱遥感技术在煤矿区环境监测中的应用[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(4):158-162.
- Zhang J L, Cao D Y. Application of hyperspectral remote sensing technology to environment monitoring in coal mine area [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14 (4):158-162.
- [13] 陈敏, 张大超, 朱清江, 聂锦霞. 离子型稀土矿山废弃地生态修复研究进展[J]. *中国稀土学报*, 2017, 35 (4):461-468.
- Chen M, Zhang D C, Zhu Q J, Nie J X. Ionic rare earth mine of abandoned land of ecological restoration of research progress [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2017, 35(4):461-468.

- [14] 蒋洪强,徐玖平. 环境成本核算研究的进展[J]. 生态环境,2004,13(3):429-433.
Jiang H Q, Xu J P. Advances in the research on environmental cost accounting [J]. Ecology and Environment,2004,13(3):429-433.
- [15] 黄翌. 煤炭开采对植被—土壤物质量与碳汇的扰动与计量[D]. 北京:中国矿业大学,2014.
Huang Y. Disturbance and Measure of Matter Quantity and Carbon Sink of Soil and Vegetation Affected by Coal Mining—A Case of Datong Coal Mining Area [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.
- [16] 侯湖平,张绍良,丁忠义,公云龙,马昌忠. 基于植被净初级生产力的煤矿区生态损失测度研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):445-451.
Hou H P, Zhang S L, Ding Z Y, Gong Y L, Ma C Z. Study on the measurement of ecological loss based on the net primary productivity in coal mines [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(10):445-451.
- [17] 管小彬,沈焕锋,甘文霞,张良培. 基于 Landsat TM/ETM+影像的武汉市冬季 NPP 估算及其时空变化分析[J]. 遥感技术与应用,2015,30(5):884-890.
Guan X B, Shen H F, Gan W X, Zhang L P. Estimation and spatiotemporal analysis of winter NPP in Wuhan based on landsat TM/ETM+images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015,30(5):884-890.
- [18] Daniel M Franks, David V Boger, Claire M Cote, David R. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes [J]. Resources Policy,2011,36(2):114-122.
- [19] 邓兵. 区域生态服务价值关键参数遥感反演研究 [D]. 成都:成都理工大学,2016.
Deng B. Study on Remote Sensing Inversion of the Key Parameters on Regional Ecosystem Services Values [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [20] 周彩云,张钹,赵小敏,万广越,程晓迪,郭熙. 赣南某原地浸析稀土尾矿复垦前后土壤质量变化 [J]. 农业资源与环境学报,2019,36(1):89-95.
Zhou C Y, Zhang Q, Zhao X M, Wan G Y, Cheng X D, Guo X. Soil quality changes of rare earth tailings before and after reclamation in south Jiangxi Province, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1): 89-95.
- [21] 李恒凯. 南方稀土矿区开采与环境影响遥感监测与评估研究 [D]. 北京:中国矿业大学,2016.
Li H K. Study on Remote Sensing Monitoring the Rare Earth Mining and Its Environmental Impacts and Evaluation in South China [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.
- [22] 过孝民,张慧勤. 公元 2000 年中国环境预测与对策研究 [M]. 北京:清华大学出版社,1990.
Guo X M, Zhang H Q. Research on China's Environmental Prediction and Countermeasures in 2000 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [23] 王金南,杨金田,陆新元,汪冬青. 市场机制下的环境经济政策体系初探 [J]. 中国环境科学,1995,(3):183-186.
Wang J N, Yang J T, Lu X Y, Wang D Q. Preliminary study on the system of environmental economic policies under market mechanism [J]. China Environmental Science,1995,(3):183-186.
- [24] 於方,蒋洪强,曹东. 中国绿色国民经济核算技术体系与方法概论 [J]. 环境保护,2006,(9B):30-39.
Yu F, Jiang H Q, Cao D. Introduction to China's green national economic accounting technology system and method [J]. Environmental Protection, 2006,(9B): 30-39.
- [25] 卓桂珍. 基于 ExternE 模型的我国省级区域工业大气污染损失评估 [D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
Zhuo G Z. Assessment of Damage Costs from Airborne Pollution of Industry in Chinese Province Areas Based on ExternE Model [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [26] Christine Jasch. How to perform an environmental management cost assessment in one day [J]. Journal of Cleaner Production,2006,14(14):1194-1213.
- [27] Saleem Ali. Social and environmental impact of the rare earth industries [J]. Resources,2014,3:123-134.
- [28] 王爱云,李以科,李瑞萍,冯雪梅. 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,2017,38(1):94-100.
- Wang A Y, Li Y K, Li R P, Feng X M. Environmental cost analysis of the development and utilization of the Bayan Obo rare earth resources, Inner Mongolia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(1):94-100.
- [29] Tekedil Zeenat Humsa, R K Srivastava. Impact of rare earth mining and processing on soil and water environment at Chavara, Kollam, Kerala; A case study department of civil engineering [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 11:566-581.
- [30] 於方,王金南. 中国环境经济核算技术指南 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2009.
- Yu F, Wang J N. *Guideline for Chinese Environmental and Economic Accounting* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [31] Romeo Danielis, Aline Chiabai. Estimating the cost of air pollution from road transport in Italy [J]. *Transpn Res D*, 1998, 3(4):249-258.
- [32] 彭武珍. 环境价值核算方法及应用研究 [D]. 杭州:浙江工商大学, 2013.
- Peng W Z. *Research of Method and Application on Environmental Value Accounting* [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013.
- [33] 刘玉春,曾金凤,曾阳松. 稀土矿区小流域污染源调查与治理——以定南县劣 V 类水河段的污染治理为例 [J]. *人民珠江*, 2019, 40(2):75-80.
- Liu Y C, Zeng J F, Zeng Y S. Investigation and mitigation on pollution sources in small watersheds of rare earth mine—A case study on reach pollution control with worse than grade V water in Dingnan County [J]. *Pearl River*, 2019, 40(2):75-80.
- [34] 梁宏波. 考虑环境成本的矿业项目投资决策研究 [D]. 赣州:江西理工大学, 2017.
- Liang H B. *Research on Investment Decisions of Mining Projects in Consideration of Environmental Cost* [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [35] 秦格. 煤炭矿区生态环境补偿机制研究 [D]. 北京:中国矿业大学, 2009.
- Qin G. *Study on the Ecological Environment Compensation Mechanism in Coal Mining Regions* [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.
- [36] 万林葳. 生态矿区建设期环境成本与效益研究 [D]. 北京:中国矿业大学, 2012.
- Wan L Y. *A Research on Environmental Costs and Benefits in the Construction Period of Ecological Mining Area* [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.
- [37] Lieth H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere* [M]. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [38] Box E O. Estimating the seasonal carbon source-sink geography of a natural, steady-state terrestrial biosphere [J]. *J Appl Meteorol*, 1988, 27(10):1109-1124.
- [39] Rosenzweig M L. Net primary productivity of terrestrial communities: Prediction from climatological data [J]. *Am Natur*, 1968, 102(9):67-74.
- [40] 叶菲莫娃 H A. 植被产量的辐射因子 [M]. 王炳忠译. 北京:气象出版社, 1983. 84-86.
- Ye Feimowa H A. *Radiation Factors of Vegetation Yield* [M]. Wang B Z. Beijing: Meteorology Press, 1983. 84-86.
- [41] 偶星. 基于 CASA 模型的平朔矿区复垦土地 NPP 研究 [D]. 北京:中国地质大学, 2009.
- Ou X, *A Research on NPP of Land after Reclamation by CASA Model in Pingshuo Mine* [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [42] 周夏飞, 朱文泉, 马国霞, 张东海, 郑周涛. 稀土矿开采导致的植被净初级生产力损失遥感评估——以江西省赣州市为例 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2):307-315.
- Zhou X F, Zhu W Q, Ma G X, Zhang D H, Zheng Z T. Assessing the vegetation net primary productivity loss resulted from the mining of rare earth ore Based on remote sensing technology—A case study in Ganzhou, Jiangxi Province [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(2):307-315.

Progress in Environmental Problems and Cost Assessment of Ion-adsorption Rare Earth Mining

XU Feng¹, LI Heng-kai¹, WANG Xiu-li²

(1. *School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;*

2. *School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China*)

Abstract: Ion-adsorption rare earth mining has brought about serious ecological and environmental problems, which has attracted increasing attention. A comprehensive overview of the research methods and progress in environmental cost assessment by scholars at home and abroad was conducted in this paper. The environmental problems in this particular area of rare earth mining area were summarized, and the three evaluation methods including cost-based environmental governance cost method, loss-based environmental degradation method and NPP loss estimation method, and its applicability in rare earth mining area were compared. Discussions were held. Finally, the remote sensing assessment method for environmental costs in rare earth mining areas was prospected and reasonable suggestions were made. The environmental cost assessment method of rare earth mining area can reflect the impact degree of rare earth resources on the ecological environment during the development process, and provide basic data and theoretical support for the ecological environment management of the mining area. It has certain reference significance for the green mining and sustainable development of rare earth minerals.

Key words: rare earth ore; environment cost; governance cost; net primary productivity