

生态文明建设背景下江西省有色金属矿产开发生态影响能值分析^{*1}

贾舒娴¹ 黄健柏^{1, 2} 钟美瑞^{1, 2}

(1. 中南大学商学院, 湖南长沙 410083;

2. 中南大学金属资源战略研究院, 湖南长沙 410083)

【摘要】: 有色金属矿产开发在促进经济增长的同时, 也带来诸多环境问题, 在此现状下, 如何评估由此造成的生态损失及系统的状态已成为研究的焦点。借助能值分析可衡量和比较不同类别、不同等级能量的真实价值这一特点, 研究江西省有色金属矿产开发生态影响问题。对系统 2009~2013 年的能值总量、投入产出、生态损失进行核算, 分析能值效率、生态效率指标变动趋势, 并得出符合实际的生态补偿标准的制定依据。经过计算, 2009~2013 年江西省有色金属矿产开发能值自给率为 0.65 左右, 整体变化幅度较小; 能值投资率在 0.23~0.31 之间波动, 处于较低水平; 净能值产出率呈现先上升后下降的趋势; 环境承载率整体较高, 最低为 138.01; 可持续发展指数非常小, 全部在 0.02、0.03; 生态补偿指数在 62%~69% 之间小幅波动。说明江西省有色金属矿产开发对当地的不可更新资源的依赖程度较高, 虽然生产效率较高, 但当前的生产利用活动已超出环境可承受的范围, 系统不可持续发展。为改善环境 2009~2013 年各年应承担的生态补偿额分别为 1.45×10^9 元、 1.49×10^9 元、 2.06×10^9 元、 2.59×10^9 元、 1.82×10^9 元。

【关键词】: 有色金属; 能值; 生态补偿; 污染物

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)09-1378-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201709010

20 世纪以来, 全球工业革命进入快速发展轨道, 导致整个社会资源消费结构出现急剧变化, 其中矿产资源消费的迅速增长引发了社会的极大关注^[1]。为满足消费需求而进行的矿产资源开发在促进经济增长的同时, 也造成了生态系统服务功能的损失, 导致一些国家或区域不同程度地出现了资源耗竭、环境污染、生态破坏与区域发展衰退等问题, 而由此陷入“资源诅咒”的陷

¹ 收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(71633006, 71573282) [National Natural Science Foundation of China(71633006, 71573282)]; 国家社会科学基金重大项目(13&ZD169) [National Social Science Foundation of China(13&ZD169)]; 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2182) [Natural Science Foundation of Hunan Province of China(2015JJ2182)]; 湖南省教育厅开放基金项目(15K133) [Educational Commission of Hunan Province of China(15K133)]; 湖南省智库专项课题(16ZWA14) [Special Topics of Hunan Think Tank(16ZWA14)]; 2017 年度中南大学创新驱动计划项目(2017CX014) [2017 Central South University Innovation Drive Program(2017CX014)]

作者简介: 贾舒娴(1992~), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态补偿与资源安全. E-mail: 460052987@qq.com

阱^[2]。在此现状下,如何评估有色金属矿产开发下生态系统的状态及由此造成的生态损失,提出相应的对策已成为研究的焦点。在大力推进生态文明建设的背景下,生态补偿作为生态环境内外部价值的有效经济调节手段,成为解决生态环境问题与区域经济、社会发展的重要途径。

20 世纪 90 年代以来,生态补偿的理论研究与实践探索在各个领域逐步增多,学者们从生态补偿的驱动机制、生态环境损益评价、调节机理等方面进行了理论探讨^[3]。中国积极开展了生态补偿的探索和实践,在国家、区域、流域等尺度上取得了丰硕成果^[4, 5],但在有色金属矿产开发方面,由于涉及生态安全的要素多、生态补偿载体多样、有色金属矿产开发利用的环境外部性难以量化、生态补偿范围确定难度大等实际问题,使得只能以个案分析的方式对有色金属矿产开发生态补偿的问题进行研究^[6]。有色金属矿产开发的生态补偿是指对矿产资源开发造成的开发地自然资源破坏、生态环境污染等生态损失而进行的治理、恢复、校正等,其中的关键性问题,以生态损失为基础的补偿标准量化将成为国家近期内亟待解决的重大理论和现实问题。

能值分析以能值作为衡量生态服务功能度量的统一标准,克服了以往环境经济学方法主观性较大的弊端,解决了物质流、能量流与经济流对接困难的问题,可得出统一的用能值表达的生态损失,进而得出能值货币价值表达的生态损失,以此便于进一步分析生态补偿相关问题的内在客观规律^[7]。美国著名生态学家 H. T. Odum 在 20 世纪 50 年代提出了能值的概念,20 世纪 90 年代,蓝盛芳将能值方法引入中国并应用于生态经济系统开展了大量研究^[8]。目前能值理论多应用于海域^[9, 10]、山地^[11]、湿地^[12, 13]、农业^[14, 15]、城市绿色 GDP^[16, 17] 系统中,将能值理论应用于有色金属矿产开发生态影响的较少,刘文婧等人对其进行了部分研究^[18]。但未考虑污染物排放对人体健康的影响及植被破坏对生态服务功能的影响这两个间接损失,然而有色金属开发中不可避免会产生植被破坏、水体污染、大气污染等生态问题,其积累最终会危及人类的生存与发展,因此,将这两方面的影响加入评估系统中是十分有必要的。且只对有色金属开发过程中的开采环节进行讨论是不完善的,有色金属冶炼及压延加工过程中产生的废水废气,总量更大、污染更重,也应当对其进行深入研究。

基于此现状,本文利用能值分析法对江西省有色金属矿产开发过程中的投入产出进行分析,将开采与冶炼、压延加工过程中对环境的直接和间接损失纳入能值分析体系中,定量核算其生态价值,评价系统的经济发展水平、对环境的压力、对自有资源的利用情况、自我支持能力、可持续发展能力等,并以江西省 2009~2013 年数据为例具体分析系统能值效率与生态效率变化趋势,确定相应的生态补偿费用。同时由于行业而非区域这一特殊性,除了相关数据采用行业数据外,本文在可更新资源等的核算中使用有色金属开发占用面积作为基准计算。

1 研究架构

1.1 研究思路

有色金属矿产开发在促进经济增长的同时,也带来诸多环境问题,作为有色金属大省,江西省的发展问题一直处于重要地位,评估有色金属矿产开发造成的生态损失,研究系统的运行状态和效率,并对其进行合理的生态补偿均具有重要意义。能值分析法可提供统一的度量工具,解决核算过程中物质流、能量流与经济流对接困难的问题,因此,本文利用能值分析法研究江西省有色金属矿产开发生态影响问题。通过绘制能值流量图、计算系统的投入产出、构建能值评价指标,评价江西省有色金属矿产开发中系统的经济发展水平、环境压力、自有资源的利用情况、自我支持能力、可持续发展能力,并以生态间接损失为基础核算所需投入的生态补偿额。其中生态间接损失主要考虑有色金属矿产开发中污染物排放对生态环境、人体健康的影响,以及植被破坏的影响。

1.2 核算框架

本文采用的研究方法为 Odum 等提出的能值分析方法,由于各种资源、劳务和产品等的能量直接或间接起源于太阳能,能值分析以太阳能值来衡量每一种能量的能值大小,可利用各种要素的能值转换率结合系统实际投入产出项目计算能值。本文主要

依据 Odum、蓝盛芳等得出的能值计算公式计算各项的能值，由于篇幅限制及计算公式较为普及，本文不做多余赘述。而能值作为生态间接损失核算与生态补偿标准核算一直是个难题，相关学者对其进行了多方研究，得出了合理、被普遍应用的研究结果，本文采用这些研究成果进行生态间接损失核算，并在下文作进一步的详细阐述。

1.2.1 生态间接损失能值核算

(1) 污染物排放对生态环境间接影响的能值核算

局部系统中包含了环境系统及有色金属产业生产过程中副产品储存的化学废气和废水，当排放废气废水中的污染物超过其环境质量标准时，主要依靠环境子系统和资源子系统提供的新鲜空气和洁净水的稀释作用使其浓度降低，起到减小环境危害的作用。因此，可通过测算稀释大气污染、水体污染所需新鲜空气和洁净水的能值来评估废气废水对生态环境的间接影响。Ulgati 等^[19]计算了不考虑大气扩散和化学服务的情况下用来稀释污染物排放的能值投入量，其中稀释大气污染物所需的新鲜空气量为：

$$M = d \times \frac{W}{c} \quad (1)$$

式中： M 为稀释大气污染所需的空气质量； d 为空气的密度； W 为污染物的年排放量； c 为法规可接受的污染物浓度。

稀释水污染所需的水的质量同理。

大气污染物是在一定风速的影响下被稀释的，稀释废气所需风的能值，即所需的环境系统服务能值公式为：

$$E_a = \frac{1}{2} \times M_a \times V^2 \quad (2)$$

$$Em_a = E_a \times UEV_a \quad (3)$$

式中： V 为年平均风速； E_a 为稀释废气所需空气的动能； UEV_a 为风的能值转换率。

稀释废水所需水的能值，即所需的环境系统服务能值公式为：

$$E_w = M_w \times G \quad (4)$$

$$Em_w = E_w \times UEV_w \quad (5)$$

式中： E_w 为水的化学能； G 为水的吉布斯自由能； UEV_w 为水的能值转换率。

有色金属开采、冶炼和压延加工过程中产生的固体废弃物为排岩土、锅炉灰渣、煤矸石、建筑废料等，固体废弃物排放所引起的环境损失可以用其占用的土地所具有的能值量来表示^[18]：

$$EL = M \times L_{oc} \times E_L \quad (6)$$

式中:EL 为固体废弃物排放带来的环境损失能值; M 代表固体废弃物的排放量; L_{oc} 代表固体废弃物的影响, 即每吨固体废弃物占据的土地面积; E_L 代表土地侵蚀的能值转换率。

(2) 污染物排放对人体健康影响的能值核算

有色金属开发中会产生多种大气污染物, 其中 SO_2 、 NO_x 、粉尘等增加了人体对病毒感染的敏感性而易于患上肺炎、支气管炎, 同时还加重了心血管疾病, 如哮喘、慢性阻塞性肺疾病等的发生, 是影响人体健康的主要污染物。本文采用 Hau 等^[20]研究的伤残调整寿命年和生态累计烟消耗来评估大气污染物对人体健康的危害, 并以 SO_2 、 NO_x 、粉尘作为衡量的主要因素。这种方法是由美国的 Murray 教授首先提出, 由于能用污染物的实际排放值来量化实际的人力资本的损害值, 在 1993 年世界银行发布的世界发展报告中由世界银行、世界卫生组织提出采用。各污染物对其的影响不能简单相加, 因此以各个污染物影响的最大值作为污染物排放对人体健康影响的评估值。

$$Em_h = M_h \times DALY \times UEV_h \quad (7)$$

式中: Em_h 为某种污染物排放对人体健康影响的能值; M_h 为某种大气污染物的排放量; DALY 为伤残调整寿命年; UEV_h 为成年人的平均能值转换率。

(3) 植被破坏的生态服务功能影响能值核算

露天采矿、地面塌陷、采选矿废弃物等的堆放对土地和植被在一定程度上造成不可避免的破坏, 研究区植被的破坏主要为草地, 草地生态系统主要有生产有机质、气候调节及水土保持功能。王广成等^[21]的研究成果较全面, 且符合本文的核算需要, 因此本文根据其研究成果, 对草地生产有机质功能、气候调节功能及水土保持功能的损失进行核算, 来评价有色金属矿产资源开发过程对植被的影响。

$$Em_0 = NPP \times S \times E_0 \times 4186 \text{ J/Kcal} \times UEV_0 \quad (8)$$

$$Em_c = 1.63 \times M_c \times S \times UEV_{CO_2} + 1.20 \times M_c \times S \times UEV_{O_2} \quad (9)$$

$$Em_s = (\Delta H \times S \times \Delta J \times S) \times UEV_s \quad (10)$$

式中: Em_0 、 Em_c 、 Em_s 分别为草地生产有机质、草地气候调节、水土保持功能损失的能值; NPP 为研究区草地净初级生产力; S 为草地破坏面积; E_0 为有机质的能量折算标准; 4186J/Kcal 为热能折算标准; M_c 为研究区单位面积干物质损失量; UEV_0 、 UEV_{CO_2} 、 UEV_{O_2} 、 UEV_s 分别为有机质、 CO_2 、 O_2 、土壤的能值转换率; ΔH 为草地和荒地的自然含水量之差, 由草地的凋落物量乘以其自然含水量与荒地的凋落物量乘以其自然含水量之差得到; ΔJ 为草地和荒地的有效截流量之差。

公式中部分参数的取值及说明见表 1。

表 1 公式中部分参数的取值及说明

参数	含义	数据来源	取值
c	法规可接受的污染物浓度	《中华人民共和国国家标准地表水环境质量标准》(GB3838-2002)、《中华人民共和国国家标准环境空气 k 质量标准》(GB 3095-2012)	不同污染物的取值不同，具体见表 3
W	污染物的年排放量	《江西省统计年鉴》	不同污染物的取值不同
L_{oc}	每吨固体废弃物占据的土地面积	环境实物量测算得出 ^[21]	$3.51 \times 10^{-5} \text{ hm}^2/\text{t}$
EL	土地侵蚀的能值转换率	根据公式能值转换率=利用的太阳能值/I 焦耳该种能 量测算得出 ^[22]	$1.05 \times 10^{15} \text{ sej/hm}^2$
UEV_h	成年人的平均能值转换率	根据公式能值转换率=利用的太阳能值/I 焦耳该种能 量测算得出 ^[26]	$7.53 \times 10^{16} \text{ sej/a}$
S	草地破坏面积	国土资源年鉴	根据年份不同而不同
M	研究区单位面积干物质损失量	运用草地生产力模型和遥感数据计算得出 ^[23]	$127.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$
AH	草地和荒地的自然含水量之差	实验测算得出 ^[21]	$0.237 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$
AJ	草地和荒地的有效截流量之差	实验测算得出	$1.694 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$

1.2.2 基于能值分析的生态补偿标准计算方法

生态环境损失的评估是生态补偿研究的重点和生态补偿标准制定的基础，即针对开采行为所产生的负外部性而采取的一种核算标准，也是当前比较常用的一种方法。有色金属开发会带来大气污染、水体污染、土地破坏、植被破坏、人体健康损伤等生态环境损失，这些损失是有色金属开发生态补偿核算的基础。将开发活动造成的生态环境损失折算为统一的能值单位，进而通过能值—货币比率折算成统一的能值货币价值，从而得到能值损失测算的生态补偿费。

$$Em \$ = \frac{C}{Emr} \tag{11}$$

式中:Em\$为能值货币价值表示的生态补偿费；C 为生态间接损失影响的能值；Emr 为能值—货币比率。

2 江西省有色金属矿产开发的能值分析

2.1 研究边界

有色金属矿产开发涉及到的有色金属矿采选业和有色金属冶炼及压延加工业是典型的高能耗行业，产污和排污系数都较高，对环境造成了严重污染。尤其是有色金属冶炼及压延加工过程中产生的废水废气，总量更大、污染更重，足够引起巨大的关注。而江西省作为有色金属大省，矿产资源丰富，是中国主要的有色矿产基地之一，在探明的 89 种矿产储量中，居全国前 5 位的有 33 种。有色金属矿产的开发活动在带动江西省经济高速发展的同时，也对当地环境造成了巨大破坏，环境形势十分严峻。因此，本文的研究边界范围界定为《国民经济行业分类》(GB/T4754-2002)中的有色金属矿采选业和有色金属冶炼及压延加工业，并以江西省这一有色金属大省为例进行分析。绘制出的有色金属矿产开发过程形态图，如图 1 所示。

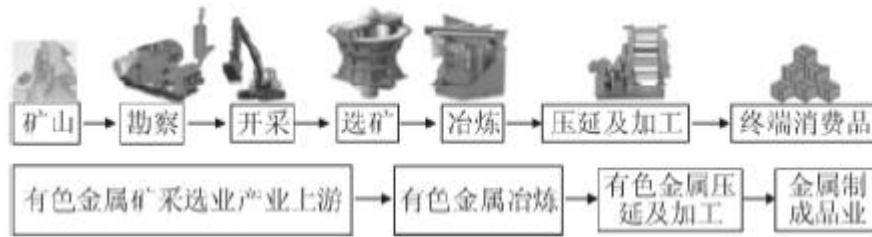


图 1 江西省有色金属矿产开发过程形态图

Fig. 1 Morphology of Development Process of Non-ferrous Metal Resources in Jiangxi Province

2.2 数据来源

由于本文的研究需要和数据的可获得性，取江西省 2009~2013 年相关数据进行研究，数据来自《江西省统计年鉴》、《有色金属工业年鉴》、《国土资源年鉴》、《中国环境统计年鉴》和中华人民共和国国家统计局。

2.3 能值核算

以 Odum 的“能量系统语言图例”，绘制出包括系统主要组分和相互关系及能物流、货币流等流向的系统能量图解，如图 2 所示。列出研究系统的主要能值输入为可更新资源投入、不可更新资源投入、能源资源类物质投入、劳动力投入、污染处理投入、生态间接损失影响投入，能值输出为工业总产值，计算各类别资源能量流，将其转换为共同的能值单位，得出 2013 年江西省有色金属矿产开发能值流量表，如表 2 所示。运用能值分析方法及所获得的数据可得 2013 年江西省有色金属矿产开发环境系统服务能值表，如表 3 所示；2013 年江西省有色金属矿产开发中主要大气污染物对人体健康影响能值表，如表 4 所示；2013 年江西省有色金属矿产开发植被破坏的生态服务功能损失能值评估，如表 5 所示。由于有色金属冶炼及压延加工业是对产出的有色金属进行加工处理，同时考虑到江西省有色金属的实际产出种类为铜、铅、锌、镍、锡、锑，因此将铜、铅、锌、镍、锡、锑 6 种金属的能值作为投入有色金属冶炼及压延加工业中的不可更新资源能值。以上述同样方法可得 2009~2012 年江西省有色金属矿产开发能值。能值分析采用 $15.2 \times 10^{24} \text{sej/a}$ 的全球能值基准值，研究中能值转换率借鉴 Odum、蓝盛芳^[8]、LouB^[24] 的研究结果。由于不同参考文献采用的能值基准值不同，会导致能值转换率存在差异，因此本文对基准值为 $15.83 \times 10^{24} \text{sej/a}$ 和 $9.44 \times 10^{24} \text{sej/a}$ 的文献中涉及的能值转换率分别乘以 0.96 ($15.2/15.83$) 和 1.61 ($15.2/9.44$) 得到本文采用的能值转换率。

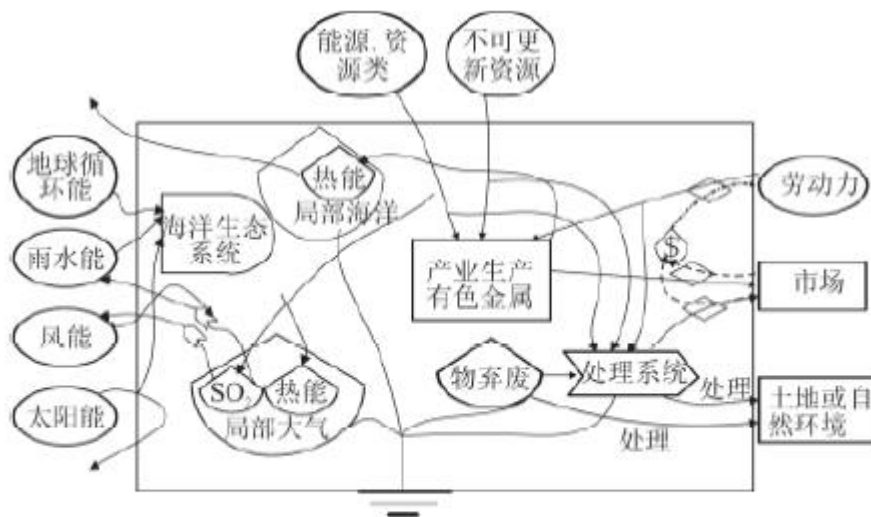


图2 江西省有色金属矿产开发能值流量图

Fig.2 Emergy Flows Diagram of Non-ferrous Metal Resources in Jiangxi Province

表2 江西省有色金属矿产开发能值流量表

项目	能值转换率 (sej/单位)	参考文献	有色金属 矿采选业 原始数据	单位	有色金属冶炼及 压延加工业 原始数据	单位	开发总值
可更新资源投入 太阳能	1	[22]	2.28×10^{21}	J			2.28×10^{21}
雨水势能	4.51×10^4	[22]	6.74×10^{13}	J			3.04×10^{18}
雨水化学能	2.93×10^4	[22]	7.01×10^{14}	J			2.05×10^{19}
风能	2.35×10^5	[22]	4.42×10^{15}	J			1.04×10^{19}
地球循环能 不可更新资源投入	5.57×10^4	[22]	1.43×10^{14}	J			7.97×10^{18}
铜	9.80×10^{10}	[24]			1.26×10^{12}	g	1.23×10^{23}
铅	4.80×10^{11}	[24]			2.05×10^{11}	g	9.84×10^{22}
锌	4.80×10^{11}	[24]			9.04×10^{10}	g	4.34×10^{22}
镍	2.00×10^{11}	[24]			3.62×10^{10}	g	7.24×10^{21}
锡	1.70×10^{12}	[24]			1.73×10^{10}	g	2.94×10^{22}
锑	4.20×10^{12}	[24]			1.24×10^{10}	g	5.21×10^{22}
能源、资源类物质投入 煤炭	6.45×10^4	[22]	1.95×10^{10}	g	4.57×10^{11}	g	3.17×10^{16}
焦炭	6.44×10^4	[8]	6.10×10^7	g	1.39×10^{11}	g	8.95×10^{15}
电力	2.54×10^5	[8]	4.13×10^{16}	J	2.91×10^{17}	J	8.44×10^{22}
汽油	1.06×10^5	[8]	7.10×10^5	g	2.05×10^9	g	2.92×10^{14}

煤油	1.06×10^8	[8]	4.20×10^7	g	1.86×10^7	g	6.42×10^{12}
柴油	1.06×10^8	[8]	8.65×10^9	g	5.27×10^{10}	g	6.51×10^{15}
水	2.10×10^4	[8]	4.89×10^{14}	g	5.89×10^{14}	g	2.27×10^{19}
劳动力投入							
劳动力	8.61×10^{11}	[24]	9.63×10^5	CNY	4.25×10^9	CNY	4.49×10^{21}
污染处理投入							
废水	8.61×10^{11}	[24]	6.99×10^7	CNY	6.41×10^7	CNY	6.12×10^{19}
输出能值 工业总产值	8.61×10^{11}	[24]	3.75×10^{10}	CNY	4.34×10^{11}	CNY	4.06×10^{23}

表 3 江西省有色金属矿产开发环境系统服务能值表

项目	可接受浓度	有色金属矿采选业 排放量 (t)	有色金属冶炼及压延加工业 排放量 (t)	开发总值 能值 (sej)
水污染	kg/L			
化学需氧量	1.5×10^{-5}	5 950	3 386	6.47×10^{19}
氨氮	5.0×10^{-7}	466	2 239	5.61×10^{20}
$Em_w = \text{最大值 } Em_w = \text{Max}$				5.61×10^{20}
大气污染	kg/m ³			
二氧化硫	6.0×10^{-8}	485	2 7207	3.84×10^{18}
氮氧化物排放量	5.0×10^{-8}	37	1 597	2.72×10^{17}
烟 (粉) 尘	7.0×10^{-8}	67	6 977	8.40×10^{17}
$Em_a = \text{最大值 } Em_a = \text{Max}$				3.84×10^{18}
固体废弃物				
尾矿、废渣等		6 142.37	268.64	2.36×10^{18}

注：1. 排放标准主要参考《中华人民共和国国家标准地表水环境质量标准》(GB3838-2002)、《中华人民共和国国家标准环境空气质量标准》(GB 3095-2012);2. 在原文公式中排放物为具代表性的一种排放物，因此取大气和水各自能值最大的污染成分作为代表来计算环境服务支持能值。

表 4 江西省有色金属矿产开发中主要大气污染物对人体健康影响能值表

项目	伤残调整寿命年 (a·kg ⁻¹)	有色金属矿采选业 排放量 (t)	有色金属冶炼及压延加工业 排放量 (t)	开发总值 能值 (sej)
人体健康影响				
二氧化硫	5.46X10 ⁻⁵	485	27 207	1.14X10 ²⁰
氮氧化物排放量	8.87X10 ⁻⁵	37	1 597	1.10x10 ¹⁹
烟 (粉) 尘	3.75X10 ⁻⁴	67	6 977	1.99X10 ²⁰
Em _h =最大值 Em _h = Max				1.99X10 ²⁰

表 5 江西省有色金属矿产开发植被破坏的生态服务功能损失能值评估

项目	能值转换率 (sej/单位)	参考文献	原始数据	单位	能值
有机质影响	7.66X10 ³	[21]	9.93X10 ¹³	J	7.61X10 ¹⁷
气候调节固碳	3.78X10 ⁷	[21]	1.75X10 ⁹	J	6.62X10 ¹⁶
气候调节释氧	5.11X10 ⁷	[21]	1.29X10 ⁹	J	6.59X10 ¹⁶
涵养水量	2.10X10 ⁴	[21]	1.99x10 ⁵	J	4.18X10 ¹²

2.4 能值指标分析

本文根据系统自身具有的能量流、系统购买和输出的资源与服务的能值流以及生态损失能值的计算结果,构建江西省有色金属矿产开发能值流量指标体系,并从能值效率和生态效率的角度,构建江西省有色金属矿产开发能值分析指标体系,分别如表 6、表 7 所示,经过计算可得江西省有色金属矿产开发能值指标结果,如表 8 所示。

表 6 江西省有色金属矿产开发能值流量指标体系

项目	指代含义	能值 Energy (sej)				
		2009	2010	2011	2012	2013
R	可更新资源	1.20X10 ²¹	1.33x10 ²¹	2.12X10 ²¹	2.00x10 ²¹	2.32X10 ²¹
N	不可更新资源	1.66x10 ²³	2.09X10 ²³	2.24X10 ²³	2.98X10 ²³	3.54X10 ²³
I	输入资源	5.08x10 ²²	5.02x10 ²²	6.45X10 ²²	6.58X10 ²²	8.44X10 ²²
L	劳动力	1.51X10 ²¹	1.94X10 ²¹	2.33X10 ²¹	2.78X10 ²¹	4.49X10 ²¹
F	购人能值	5.23X10 ²²	5.21X10 ²²	6.68X10 ²²	6.86X10 ²²	8.89X10 ²²
W	生态直接损失能值	5.08X10 ²⁰	4.62x10 ²⁰	6.35x10 ²⁰	1.19X10 ²¹	8.07X10 ²⁰
Em _i	环境系统服务能值	5.19X10 ²⁰	6.18x10 ²⁰	8.58X10 ²⁰	7.87X10 ²⁰	5.64x10 ²⁰
EL	固体废弃引起的生态损失能值	2.10x10 ¹⁸	2.11X10 ¹⁸	2.26x10 ¹⁸	2.31X10 ¹⁸	2.36x10 ¹⁸

Em _h	对人体健康影响能值	2.17X10 ²⁰	1.97X10 ²⁰	2.80X10 ²⁰	2.51X10 ²⁰	1.99X10 ²⁰
Em _e	植被破坏生态服务功能影响能值	5.26x10 ¹⁸	6.12X10 ¹⁷	3.00X10 ¹⁸	5.59X10 ¹⁷	8.93X10 ¹⁷
C	生态间接损失能值	7.43X10 ²⁰	8.18X10 ²⁰	1.14x10 ²¹	1.04X10 ²¹	7.66x10 ²⁰
u	总输入能值	2.73X10 ²³	3.16x10 ²³	3.62x10 ²³	4.39X10 ²³	5.36X10 ²³
0	总输出能值	1.53x10 ²³	2.30X10 ²³	3.23X10 ²³	3.63X10 ²³	4.06X10 ²³

表 7 江西省有色金属矿产开发能值分析指标体系

指标名称	计算表达式	指标含义
能值效率评价指标 能值自给率 (ESR)	$(R+N)/U$	评价系统对自有资源的利用情况及系统的自我支持能力
能值投资率 (EIR)	$F/(R+N)$	评价经济发展程度和环境负载程度的指标, 值越大表明系统经济发展程度越高
净能值产出率 (EYR)	O/F	评价了系统为利用当地可再生能值而需要从系统外购买能值的比例 ^[25] , 是衡量系统运行效率的指标, EYR 越大, 系统产出能值越大, 运行效率就越高
环境承载率 (ELR)	$N+F+W+C/R$	表示对经济系统起到的警示作用, 其值越小, 说明经济系统中能值利用强度越低, 对系统环境产生的压力也越小. 当 $3<ELR$ 时, 表明环境承受压力处于较低水平; 当 $3<ELR<10$ 时, 表明环境承受压力处于中等水平; 当 $ELR>10$ 时, 表明环境承受的压力处于较高水平 ^[26]
生态效率评价指标		
可持续发展指数 (ESI)	EYR/ELR	表示单位环境负荷的系统生产效率。当 $ESI<1$ 时, 系统不可持续; 当 $1<ESI<5$ 时, 系统在一段时间内具有可持续性; 当 $ESI>5$ 时, 系统长期具有可持续性 ^[27]
生态补偿指数 (ECI)	$(R+N+W+C)/U$	参考刘文婧等人构建的反映系统可持续发展能力的指标体系 ^[19] , 表明系统需要环保投入的程度

表 8 江西省有色金属矿产开发能值指标结果表

指标名称	数值				
	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
能值效率评价指标					
能值自给率 (ESR)	0.61	0.67	0.62	0.68	0.66
能值投资率 (EIR)	0.31	0.25	0.30	0.23	0.25
净能值产出率 (EYR)	2.93	4.41	4.84	5.29	4.57
环境承载率 (ELR)	182.96	197.28	138.01	184.42	191.58
生态效率评价指标					
可持续发展指数 (ESI)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
生态补偿指数 (ECI)	0.62	0.67	0.63	0.69	0.67

依据表 6、表 8 绘制江西省有色金属矿产开发能值效率变化趋势图和生态效率指数变化趋势图，分别如图 3、图 4 所示。

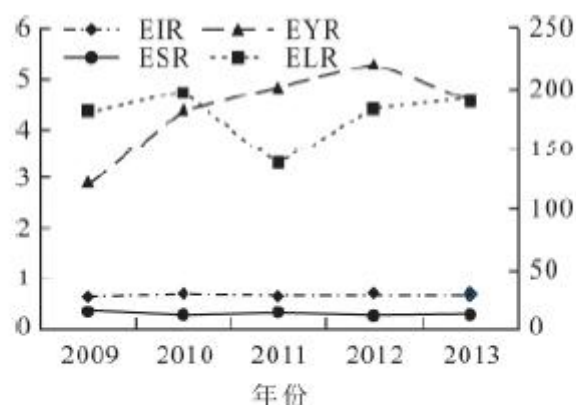


图 3 江西省有色金属开发能值效率变化趋势图

Fig. 3 Variation Tendency of Emergy Efficiency of the Development of Nonferrous Metals in Jiangxi Province

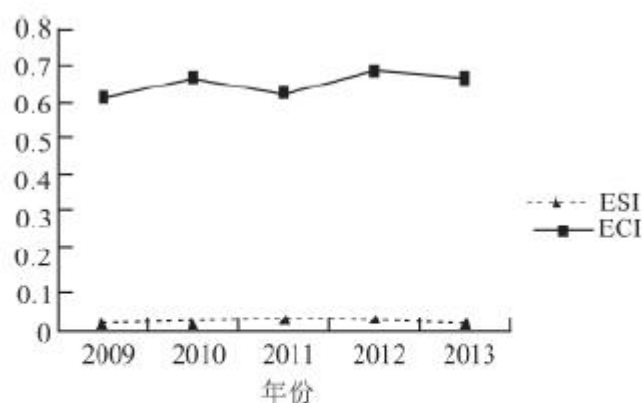


图 4 江西省有色金属开发生态效率指数变化趋势图

Fig. 4 Variation Tendency of Ecological Efficiency of the Development of Nonferrous Metals in Jiangxi Province

结合图 3、图 4，表 7 中的能值指标含义与表 8 中的能值指标计算结果，可对江西省有色金属开发的能值投入产出进行分析。2009~2013 年江西省有色金属矿产开发的 ESR 为 0.65 左右，整体变化幅度较小，说明其对系统内部资源开发和利用程度一直维持在较高水平，系统的自足能力和自我支持能力较强。其 EIR 在 0.23~0.31 之间波动，处于较低水平，近年来有降低趋势，说明江西省有色金属在开发的过程中对当地资源的依赖程度依旧较高，社会经济系统的投入较少。其 EYR 呈现先上升后下降的趋势，最大值为 5.29，说明江西省有色金属矿产开发系统整体功能比较强，生产效率较高，这与江西省有色金属资源自身价值高、易开采、品味高有关。但近年来显示出的经济活动竞争力稍有下降，说明长时间的开发利用活动对系统造成了一定破坏，因生产活动而形成的增值开始减少。其 ELR 处于高值水平，最低为 138.01，表明环境承受的压力非常大，当前的生产利用活动已经超过环境可以承受的范围，且这种情况一直未得到改善，环境承受的压力越来越重，长此以往，系统平衡很容易遭到破坏。其

ESI 的值均在 0.02、0.03 这两个非常小的位置,说明系统不具有可持续发展能力,单独依靠生态环境的循环是无法持续进行的,需要政府和企业、居民共同承担对系统的生态补偿投入。而 ESI 的值呈现小幅先上升后下降的趋势,说明系统前期具有一定的自我修复能力,随着开发活动的加大与生产的低效,系统的可持续性降低。其 ECI 在 62%~69%之间小幅波动,系统需要的环保投入比例较高。虽然随着发展生态环境输入能值与系统总输入能值总量都有所增加,但同等幅度的变化导致比例基本未变,说明江西省有色金属的开发活动长期依赖于对生态环境索取的现状并未得到改善。

由表 6、表 8 知 2013 年江西省有色金属矿产开发总输入能值为 5.36×10^{23} sej,生态补偿指数为 0.67,生态补偿能值总计为 3.59×10^{23} sej,其中进行污染处理而带来的环境直接损失能值为 8.07×10^{20} sej,为稀释废水而需要的生态服务支持能值为 5.61×10^{20} sej,为稀释废气而需要的生态服务支持能值为 2.91×10^{18} sej,固体废弃物引起的生态损失能值为 2.36×10^{14} sej,对人体健康影响能值为 1.99×10^{20} sej,植被破坏的生态服务功能影响能值为 8.93×10^{17} sej,生态间接损失影响能值为 7.66×10^{20} sej,则根据公式 (11) 计算得出 2013 年江西省有色金属矿产开发过程中所需要的生态补偿费用为 1.82×109 元。同样得出 2009~2012 年江西省有色金属矿产开发所需要的生态补偿费用分别为 1.45×109 元、1.49×109 元、2.06×109 元、2.59×109 元。

3 结论

针对有色金属矿产开发健康可持续发展对经济增长的重要性,在大量搜集数据、整理和分析的基础上,本文对江西省有色金属矿产开发生态影响能值进行分析,利用能值分析法对有色金属矿产开发过程中的投入产出进行分析,定量核算在此过程中对生态环境造成的损失价值,得出体现生态价值的各年应分摊的生态补偿额。通过分析,得出如下结论:

(1) 2009~2013 年江西省有色金属矿产开发能值自给率为 0.65 左右,整体变化幅度较小;能值投资率在 0.23~0.31 之间波动,处于较低水平;净能值产出率呈现先上升后下降的趋势,最大值为 5.29;环境承载率整体较高,最低为 138.01;可持续发展指数非常小,全部在 0.02、0.03;生态补偿指数在 62%~69%之间小幅波动。

(2) 江西省有色金属矿产开发对当地的不可更新资源的依赖程度较高,可更新资源的投入较低,产业的发展已超出系统环境的承载能力,系统不可持续发展。虽然江西省有色金属矿产开发系统的生产效率较高,但长期对环境的破坏已对其继续发展造成了部分阻力,急需根据实际情况加大外部投入进行生态治理和恢复。

(3) 2009~2013 年江西省有色金属矿产开发所需要的生态补偿费用分别为 1.45×109 元、1.49×109 元、2.06×109 元、2.59×109 元、1.82×109 元。其生态补偿费用核算基础中,环境系统服务损失、人体健康损失值所占比重较大,说明江西省有色金属矿产开发主要造成了大气污染、水体污染,并严重危害了人体健康,日后江西省应将对大气、水域、居民的生态补偿作为工作的重点。

参考文献:

[1] 任忠宝,王世虎,唐宇,等. 矿产资源需求拐点理论与峰值预测 [J]. 自然资源学报, 2012, 27 (09) : 1480 — 1489.

【REN Z B, WANG S H, TANG Y, et al. The inflection point theory of mineral resources demand and Peak Forecast [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(9) : 1480—1489. 】

[2] 陈军,成金华. 中国矿产资源开发利用的环境影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(03) : 111—119.

【CHEN J, CHENG J H. Environmental impacts caused by the development and utilization of mineral resources in China [J]. Population, Resources and Environment, 2015, 25 (3) :111—119. 】

[3] 文琦. 中国矿产资源开发区生态补偿研究进展 [J]. 生态学报, 2014, 34(21) : 6058—6066.

【WEN Q. Review of ecological compensation in China's mining exploitation regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21) : 6058—6066. 】

[4] YANG W, LIU W, VINA A, et al. Performance and prospects of payments for ecosystem services programs: evidence from China [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 127: 86—95.

[5] CHEN X D, LUPI F, An L, et al. Agent based modeling of the effects of social norms on enrollment in payments for ecosystem services [J]. Ecological Modelling, 2012, 229: 16—24.

[6] 欧阳志云, 郑华, 岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施 [J]. 生态学报, 2013, 33(3) : 686—692.

【OU YANG Z Y, ZHENG H, YUE P. Establishment of ecological compensation mechanisms in China: perspectives and strategies [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3) : 0686—0692. 】

[7] 毛德华, 胡光伟, 刘慧杰, 等. 基于能值分析的洞庭湖区退田还湖生态补偿标准 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(2) : 525—532.

【MAO D H, HU G W, LIU H J, et al. Ecological compensation standard in Dongting Lake region of returning cropland to lake based on emergy analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2) : 525—532. 】

[8] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[9] 赵晟, 李梦娜, 吴常文. 舟山海域生态系统服务能值价值评估 [J]. 生态学报, 2015, 35(3) : 1—11.

【ZHAO S, LI M N, WU C W. Emergy valuation of ecosystem services in the Zhoushan marine area. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3) : 678—685. 】

[10] 管新建, 齐雪艳, 吴泽宁, 等. 东居延海生态系统服务功能价值的能值分析 [J]. 水土保持研究, 2012, 19 (5) :253—261.

【GUAN X J, QI X Y, WU Z N, et al. Analysis on energy value of service function of east juyan lake wetland ecosystem [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5) : 253—261. 】

[11] 汤萃文, 杨莎莎, 刘丽娟, 等. 基于能值理论的东祁连山森林生态系统服务功能价值评价 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(2) : 433—439.

【TANG S W, YANG S S, LIU L J, et al. Ecological services value of forest ecosystem in eastern Qilian mountains based on emergy theory [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2) : 433—439. 】

[12] 李凯, 崔丽娟, 李伟, 等. 基于能值代数的湿地生态系统服务评价去重复性计算 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(4) : 1108—1116.

【LI K, CUI L J, LI W, et al. Removing double counting in wetland ecosystem services valuation based on emergy algebra [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35 (4) : 1108 —1116. 】

[13] 李丽锋, 惠淑荣, 宋红丽, 等. 盘锦双台河口湿地生态系统服务功能能值价值评价 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(8) : 1454—1458.

【LI L F, HUI S R, SONG H L, et al. Evaluation of the services provided by the Shuangtai estuary wetland in Panjin based on emergy theory [J]. China Environmental Science, 2013, 33(8) : 1454—1458. 】

[14] 朱玉林, 李明杰. 湖南省农业生态系统能值演变与趋势 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(2) : 499—505.

【ZHU Y L, LI M J. Emergy of agro-ecosystem in Hunan Province: Evolution and trend [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2) : 499—505. 】

[15] 聂艳, 乌云嘎, 于婧, 等. 基于能值分析的武穴市耕地利用效益时空特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6) : 988—993.

【NIE Y, WU Y G, YU J, et al. Spatio-temporal variation characteristic of utilization efficiency of cultivated land in

WUXUE based on an energy analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(6) : 988—993. 】

[16] 郭丽英, 雷敏, 刘晓琼. 基于能值分析法的绿色 GDP 核算研究——以陕西省商洛市为例 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(9) : 1523—1533.

【GUO L Y, LEI M, LIU X Q. Green GDP accounting research based on emergy analysis mthod: a case study of Shangluo city in Shaanxi province [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9) : 1523—1533. 】

[17] 康文星, 王东, 邹金伶, 等. 基于能值分析法核算的怀化市绿色 GDP [J]. 生态学报, 2010, 30 (8) : 2151—2158.

【KANG W X, WANG D, ZOU J L, et al. Accounting green GDP in Huaihua based on energy analytic approach [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8) : 2151—2158. 】

[18] 刘文婧, 耿涌, 孙露, 等. 基于能值理论的有色金属矿产资源开采生态补偿机制 [J]. 生态学报, 2016, 36(24) : 1—10.

【LIU W J, GENG Y, SUN L, et al. An emergy-based analysis and ecological compensation mechanism in China's nonferrous metal mining sector [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24) : 1—10. 】

-
- [19] ULGIATI S, BROWMM T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: The case of electricity production [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4) : 335—348.
- [20] HAU J L, BAKSHI B R. Expanding exergy analysis to account for ecosystem products and services [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(13) : 3768—3777.
- [21] 王广成, 李鹏飞, 王菡. 煤炭矿区复合生态系统污染物排放影响的能值评估 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(10) : 1068—1074.
- 【WANG G C, LI P F, WANG H. Emergy evaluation on pollutant discharge in integrated ecosystem in mining area [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science) , 2016, 35(10) : 1068—1074. 】
- [22] ODUM H T, BROWN M T, WILLIAMS S B. Handbook of Emergy Evaluation [M]. Florida: University of florida, 2000.
- [23] 陈世荣, 王世新, 周艺. 基于遥感的中国草地生产力初步计算 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(1) : 208—212.
- 【CHENG SH R, WANG SH X, ZHOU Y. Estimation of Chinese grassland productivity using remote sensing [J]. Transactionsof the CSAE, 2008, 24(1) : 208—212. 】
- [24] LOU B, ULGIATI S. Identifying the environmental support and constraints to the Chinese economic growth — An application of the Emergy Accounting method [J]. Energy Policy, 2013, 55: 217—233.
- [25] BROWN M T, PROTANO G, ULGIATI S. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas [J]. Ecological Modelling, 2011, 222: 879—887.
- [26] 孙玉峰, 郭全营. 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 [J]. 生态学报, 2014, 34(3) : 710—717.
- 【SUN Y F, GUO Q Y. Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3) :710—717. 】
- [27] GIANNETTI B F, OGURA Y, BONILLA S H, et al. Emergy assessment of a coffee farm in Brazilian Cerrado considering in a broad form the environmental services, negative externalities and fair price [J]. Agricultural Systems, 2011, 104 (9) :679—688.