

DOI: 10.5846/stxb201407041374

王广成, 李鹏飞, 王菡, 李恭建. 基于能值分析的煤炭矿区复合生态系统评价. 生态学报 2015, 35(13): 4367-4376.

Wang G C, Li P F, Wang H, Li G J. Assessments of integrated ecosystems in mining areas based on emergy analysis. Acta Ecologica Sinica 2015, 35(13): 4367-4376.

## 基于能值分析的煤炭矿区复合生态系统评价

王广成<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>2,3</sup>, 王 菡<sup>4</sup>, 李恭建<sup>5</sup>

1 山东工商学院研究生处, 山东能源经济协同创新中心, 烟台 264005

2 山东师范大学管理科学与工程学院, 济南 250014

3 山东工商学院管理科学与工程学院, 烟台 264005

4 山东工商学院人事处, 烟台 264005

5 山东龙口矿业集团北皂煤矿, 龙口 265700

**摘要:** 煤炭矿区复合生态系统评价是对其进行有效管理及调控的手段之一。研究了煤炭矿区复合生态系统内涵, 剖析了煤炭矿区复合生态系统的典型特征, 论述了运用能值分析方法评价复合生态系统的特殊性; 进而, 构建了煤炭矿区复合生态系统及其子系统的能值评价指标。选择山东省龙口矿区北皂煤矿为研究对象, 进行了实证研究。应用实际数据, 测算了 2006—2012 年复合生态系统及子系统各个能值评价指标。研究结果表明, 能值理论与能值分析是评价煤炭矿区复合生态系统的有效方法, 各项指标变化反映了复合生态系统的演进趋势; 不可再生煤炭资源的过度消耗、可再生资源利用率低是这一系统的典型特征; 能值评价指标的测算结果表征环境子系统负荷较小。研究结果可为实施有效的煤炭矿区复合生态系统管理提供智力支持和决策参考依据。

**关键词:** 煤炭矿区; 复合生态系统; 能值分析; 评价指标

## Assessments of integrated ecosystems in mining areas based on emergy analysis

WANG Guangcheng<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>2,3</sup>, WANG Han<sup>4</sup>, LI Gongjian<sup>5</sup>

1 Postgraduate department, Shandong Coordination Innovation Center of Energy Economy, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China

2 College of Management Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

3 College of Management Science and Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China

4 Personnel division, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China

5 Beizao coal mine, Longkou Mining Industry Conglomerate, Longkou 265700, China

**Abstract:** Assessment of the integrated ecosystem in a mining area is one of the means of managing and regulating it. This paper studies the implications of the integrated ecosystem in mining areas, analyzes its characteristics and explains the emergy methods used to assess the ecosystem. The emergy evaluation indicator system for the ecosystem and its subsystem is discussed in further detail. Beizao coal mine in the Longkou mining area in Shandong province is taken as the research subject for an empirical study. Original data is employed to measure and calculate the separate emergy evaluation indicators for the years from 2006 to 2012. The results show that emergy theory and emergy analysis are effective methods to evaluate integrated ecosystems in mining areas and the change trends in the system reflected by each indicator. Excessive depreciation of nonrenewable coal resources, and low utilization ratio of renewable resources are typical characteristics for the integrated ecosystem in mining areas. The results show that the environmental burden is light. The research findings will offer researched support and the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71273158)

收稿日期: 2014-07-04; 修订日期: 2015-03-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gwang658@sina.cn

<http://www.ecologica.cn>

basis for making strategic decisions related to integrated ecosystem management in mining areas.

**Key Words:** coal mining area; integrated ecosystem; emergy analysis; assessment indicator

煤炭矿区复合生态系统是以煤炭资源开发利用为主导,以物质循环、能量流动、价值转移和增值、信息传递为特征,实现生产、消费、调控等功能的资源-经济-社会-环境复合生态系统。由于受到矿业生产对生态环境扰动的影响,矿区复合生态系统会受到不同程度的破坏,如何通过能值核算辨识对生态系统破坏与扰动最大的管理指标,对复合生态系统实施有效的管理,充分开发利用矿产资源、恢复和保护生态环境具有重要的理论意义和应用价值。

能值理论与能值分析是定量评价生态经济系统的经济效益、生态效益以及可持续性的强有力工具,将不同类别、不同等级的能量转化为同一能值标准,把生态环境系统与人类社会经济系统有机地统一起来<sup>[1-3]</sup>,从而实现了不同质能量的区别对待和统一评价,并且建立了基本能值评价指标<sup>[4-6]</sup>。在国内应用能值理论研究生态经济系统,取得了众多研究成果<sup>[7-9]</sup>,对此项研究具有参考价值;Caner Kazanci<sup>[10]</sup>等综合了3种计算能值转换率和评估系统能量流的方法,改进了传统能值核算效率。Murray G. Patterson<sup>[11]</sup>从能值角度尝试了一种新的关于生态系统和经济系统的矩阵分析方法,取得较好的效果。

应用能值分析与方法,国内学者对矿区生态经济系统进行了大量研究。顾康康等<sup>[12]</sup>以辽中地区矿业城市(鞍山、抚顺、本溪)为例,基于能值理论并加入社会经济系统发展指数对生态足迹模型进行修正研究,并对矿区发展的可持续性进行了评价。金丹<sup>[13]</sup>以社会-经济代谢为理论基础、MEFA(Material and Energy Flow Accounting)模型为物能流核算框架、能值理论与方法为核算工具,以进入矿山生态-经济-社会复合系统的各子系统物能流历史数据为基础,研究矿山生态系统能学过程,考察矿山特定生命周期阶段主要年份的代谢机制;选择我国东部矿区中煤集团大屯公司姚桥煤矿和兖州煤业股份有限公司济宁三号煤矿开展矿山生态系统实证研究。王立革等<sup>[14]</sup>采用能值理论分析方法,比较采煤沉陷区复垦前后农业生态系统能值投入和输出,进而分析复垦后的农业生态系统相对复垦前循环利用率和持续发展程度。以能值分析法为基础构建了矿区循环经济系统生态效率评价指标体系与方法,选择了山东某矿进行了实证研究<sup>[15]</sup>。这些成果为此项研究奠定了基础。

本文立足于煤炭矿区复合生态系统的独有特征,研究了能值分析方法应用于煤炭矿区复合生态系统的适用性问题,构建了能值评价指标体系;选择山东龙口矿区北皂煤矿作为研究对象,开展能值分析与指标评价,进而为煤炭矿区复合生态系统的评价与管理提供决策参考。

## 1 煤炭矿区复合生态系统的能值分析方法

煤炭矿区复合生态系统是由资源子系统、经济子系统、社会子系统、环境子系统相互相耦合而成的生态经济系统,很难用生态、经济、环境等指标对系统进行整体性评价。矿区由于受到矿业生产特殊规律(生态环境扰动、资源耗竭和效率递减规律等)的影响,煤炭矿区复合生态系统,既不同于草原生态系统、陆地生态系统、流域生态系统、海洋生态系统,又不同于城市生态系统,它在生态环境、经济、社会发展方面独具特色。依据矿区生态系统的典型特征,运用能值理论与能值分析方法建立其能值评价模型,进而构建能值评价指标体系,可望取得更佳的评价效果。

首先要界定系统范围,因为煤炭矿区复合生态系统以煤炭储量的消耗为发展基础,以经济增长为目标,煤炭资源的开采对自然生态系统与环境系统会产生不同程度的破坏和扰动,对矿区居民健康会产生不利的影响;生态环境保护与恢复同样需要矿区居民的支持与参与。所以,自然生态系统、经济系统、社会系统、环境系统均纳入评价体系。其次,要明确系统的基本结构、系统内外主要生态流的流动方向。根据煤炭矿区复合生态系统的主要特点,各子系统的生态流如表1所示。

表 1 煤炭矿区各子系统生态流  
Table 1 Ecological flows of all sub-systems in mining area

子系统名称 Name of sub-system	组成 Composition	功能 Function	物质流 Material flow	能量流 Energy flow	货币流 Currency flow	信息流 Information flow
资源子系统 Resource sub-system	矿产资源、 太阳、风、水等	经济收益来源 的物质载体	煤矿、伴矿物质 供给	吸收太阳能、 生物能	无	资源可持续性 反馈
经济子系统 Economy sub-system	生产者、消费 者、流通者、还 原者、调控者	生产、流通、消 费、还原、调控	煤炭资源的开 采加工以及废 弃物的排放	水电能源的 消耗	货币增值过程	生产调控
社会子系统 Society sub-system	人口、科技、 体制、文化	支持、管理、 调控	煤矿及伴矿物 质产成品的消 耗、废弃物 的排放	煤炭能源的 消耗	货币的消耗	社会宏观调控
环境子系统 Environment sub-system	大气、水体、 土壤、岩石等	消纳废弃物 提 供公共生态 服务	废弃物的消纳	生物能积累、 传递	环境治理消耗 货币	环境健康可持续 性发展反馈

根据上表,从能值分析角度出发,用能量符号语言绘出煤炭矿区复合生态系统物能流简图(图1)。

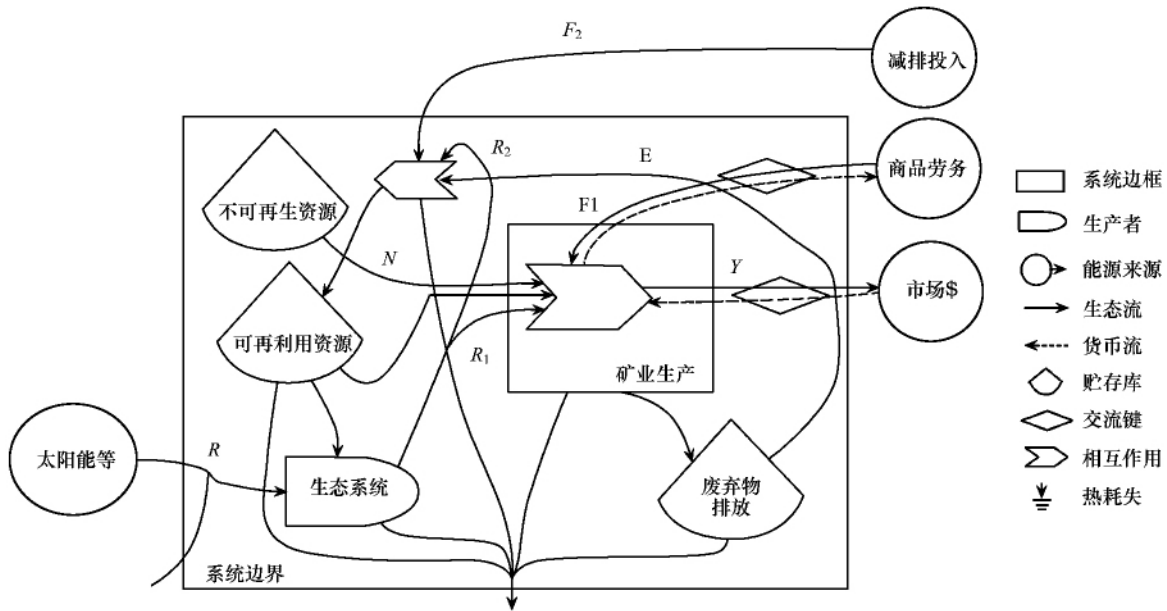


图 1 典型煤炭矿区物能流简图

Fig. 1 Material and energy flow sketch for typical mining area

通过这样的物能流简图可以揭示与矿区生产紧密相关的各物能流流动情况,其中可再生资源能值( $R$ )主要由太阳能、地表风能、潮汐能、雨水化学能、雨水势能、地球旋转能等构成,系统内部反复循环利用的物质和能量也可以看作是系统的可再生资源能值。不可再生资源能值( $N$ )包括矿产资源、天然气、岩土有机质等不可再生资源具有的能值。经济系统反馈投入( $F$ )指从外界输入到矿区系统中的能值,包括各种资源、产品、劳务、信息等,其中 $F_1$ 为外界反馈的燃料、商品、劳务投入; $F_2$ 为用于废弃物处理和循环的减排投入。输出能值( $Y$ )是指由矿区系统向外界输出的能值,主要包括煤炭产品、伴生矿产等。污染物( $W$ )为矿区生产不可避免产生的废弃物,其中部分污染物可以归入可再利用资源。

## 2 煤炭矿区复合生态系统能值评价指标体系

根据煤炭矿区复合生态系统特点,构建复合生态系统、资源子系统、经济子系统、社会子系统、环境子系统能值评价指标体系,用于评价生态环境系统的健康状态、经济社会系统的发展状况。

### 2.1 复合生态系统评价指标

构建煤矿系统能值转换率、系统能值自给率作为复合生态系统主要评价指标,用来描述整个煤炭矿区复合生态系统经济效益及系统耦合度,界定系统发展类型。

煤矿系统能值转换率(ETC)为一段时间内投入煤矿系统的消耗能值流之和与核算期原煤产量的能量的比值( $sej/J$ )。该指标可以表征煤矿系统能值利用效率,数值越低说明能值消耗越低,生态经济效益越好。

$$ETC = \frac{U}{Y_{\text{energy}}} = \frac{\sum_{i=1}^n EmI_i}{\sum_{j=1}^m EnY_j} \quad (1)$$

式中,ETC为一定时间内煤矿系统能值转换率( $sej/J$ ); $EmI_i$ 为一定时间内煤矿系统第*i*项投入的能值( $sej$ ),投入项包括环境资源投入和经济反馈两大类; $Y_{\text{energy}}$ 为核算期内原煤产量的能量( $J$ ); $EnY_j$ 为核算期煤矿系统第*j*项产出的能量( $J$ )。

煤矿系统能值结构分析,主要是通过环境资源投入和经济反馈的能值结构来分析系统内各环节的相互协调,资源利用效率,考察系统能值自给率(ESR)等来评价资源系统的支持能力,驱动经济发展资源中本地资源占年度总使用量的比例。

$$ESR = \frac{N + R}{U} \quad (2)$$

式中,ESR为能值自给率,无量纲; $N$ 为本地不可再生资源能值( $sej$ ); $R$ 为煤炭矿区复合生态系统内可再生资源能值( $sej$ ); $U$ 为一定时间内煤炭矿区复合生态系统的所消耗能值流量总和( $sej$ )。

### 2.2 资源子系统评价指标

采用资源消耗率、煤炭资源产出率、可再生资源负荷率等指标来评价资源子系统。

资源消耗率(RCR),是指单位产出能值所消耗的资源,数值上等于一定时间内研究区域内的所消耗能值总量比上能值产出量,用于评价经济活动使用自然资源和社会反馈资源的效率,其值越大表明资源的利用效率越低。

$$RCR = \frac{U}{Y} \quad (3)$$

式中,RCR为资源消耗率,无量纲; $U$ 为一定时间内煤炭矿区复合生态系统的所消耗能值流量总和,即系统投入的总能值( $sej$ ); $Y$ 为系统产出能值,包括煤炭、油页岩产出( $sej$ )。

煤炭资源产出率(CRYR),是指一定时间内研究区域内产出煤炭资源能值( $CO$ )与系统总能值用量的比率。该指标反映煤炭资源在系统中的作用大小,其值越大表示系统对于煤炭资源的依赖程度越高,煤炭资源对系统发展的贡献越大,同时也表明系统需要科技和设备的投入,或者开发新的产业链。

$$CRYR = \frac{CO}{U} \quad (4)$$

式中,CRYR为煤炭资源产出率,无量纲; $CO$ 为一定时间内煤炭矿区产出的煤炭资源能值量( $sej$ )。

可再生资源负荷率(RRLR),是总能值投入量与系统内可再生资源能值的比例。该指标反映了系统可再生资源的承载力,其值越大,表明系统的可再生资源压力越大,要适当调整资源结构。

$$RRLR = \frac{U}{R} = \frac{U}{\sum_{i=1}^n EmR_i} \quad (5)$$

式中,  $R_{LLR}$  为内部可再生资源负荷率,无量纲; $R$  为煤炭矿区复合生态系统内可再生资源能值( $sej$ );  $EmR_i$  为第  $i$  项本地可再生资源投入项( $sej$ )。

### 2.3 经济子系统评价指标

主要能值评价指标有能值投资率、有效能值产出率、能值货币比等。

能值投资率( $EIR$ )<sup>[3]</sup> 数值上等于经济系统的反馈能值之和( $F$ )与自然资源系统无偿能值( $R+N$ )之比,也称为“经济系统能值/资源系统能值比率”。常用来衡量经济系统的经济发展程度和系统自然资源的压力,其值越大,表明经济系统发展程度高,对本地自然资源依赖弱。对于矿区来说一般对本地资源依赖程度高,外部经济反馈能值通常用来控制本地资源的流动和转化。

$$EIR = \frac{F}{R + N} \quad (6)$$

式中, $EIR$  为经济系统反馈能值投资率,无量纲; $F$  为经济系统反馈投入能值( $sej$ ); $R$  为本地可再生资源能值( $sej$ ); $N$  为本地不可再生资源能值( $sej$ )。

有效能值产出率( $EEYR$ ) 在数值上等于系统净产出能值与系统废弃物综合影响能值之差比上经济系统反馈投入能值,用于衡量经济子系统的运行效率。 $EEYR$  数值高,表明系统在一定量的能值投入下,其产出能值高,经济系统生产运行效率高。

$$EEYR = \frac{Y - WI - F}{F} = \frac{Y - WI - \sum_{i=1}^n EmF_i}{\sum_{i=1}^n EmF_i} \quad (7)$$

式中, $EEYR$  为有效能值产出率,无量纲; $F$  为经济系统反馈投入能值( $sej$ ); $WI$  为系统排放的废弃物对环境的综合影响能值,包括废弃物自身能值及对生态系统造成的影响( $sej$ ); $EmF_i$  为经济系统第  $i$  项反馈投入能值( $sej$ )。

能值货币比( $EMR$ )<sup>[3]</sup> 实际上是单位货币的能值购买量,等于系统总能值用量与当年货币流通量的比值。该指标越高说明系统内的经济活动使用了较多的自然资源产品,或者是系统内存在大量成本低廉的产品;若该指标数值较小,意味着自然资源产品对系统发展贡献较小。

$$EMR = \frac{U}{GDP} \quad (8)$$

式中, $EMR$  为能值货币比( $sej/\text{¥}$ ); $GDP$  为一定时间内,煤炭矿区复合生态系统生产的价值总和( $\text{¥}$ )。

### 2.4 社会子系统评价指标

由人均能值量、能值功率密度两个指标来进行评价。

人均能值量( $EP$ ) 为矿区系统内拥有的能值总量( $U$ )与系统内人口的比值。人均能值量越高,该地区的生活水平也越高。此指标还可以评价矿区能值总量的使用效率以及研究区域内的经济发达程度。

$$EP = \frac{U}{P} \quad (9)$$

式中, $EP$  为人均能值量( $sej/\text{人}$ ); $P$  煤炭矿区复合生态系统内人口数量。

能值功率密度又叫能值使用强度( $EPD$ ) 描述了一定时间内研究区域内单位面积的能值流动情况,在时间-空间二维系统中度量能值流动浓度。该指标在数值上反映为能值总量与研究区域内土地面积( $A$ )之比。用于反映系统内经济开发程度和能值收益情况,该数值越大,则区域内经济活动越频繁,系统能值使用效率越高,相应的能值创造率也越高,一般情况下,人均能值收入和社会生活水平也可能越高。但是较高的能值功率密度在一定程度上反应了土地将会成为未来发展的限制性因子,在一定程度上表现了社会经济发展受到土地资源的制约。

$$EPD = \frac{U}{A} \quad (10)$$

式中  $EPD$  为能值功率密度 ( $\text{sej}/\text{m}^2$ );  $A$  为矿区复合生态系统的土地面积 ( $\text{m}^2$ )。

## 2.5 环境子系统评价指标

主要能值评价指标有废弃物与可再生资源能值比、废弃物处理与有效能值产出比、能值环境影响率等。

废弃物与可再生资源能值比 (WER) 在数值上是系统废弃物的能值和系统可再生资源的能值比, 该指标可以衡量系统排放的废弃物对系统环境的压力, 数值越大, 系统运行越缺乏效率, 环境系统面临压力越大。

$$\text{WER} = \frac{W}{R} \quad (11)$$

式中, WER 为系统废弃物与可再生能值比, 无量纲;  $W$  为系统排放废弃物的能值, 包括矿井水、废气、煤矸石的能值 ( $\text{sej}$ )。

废弃物处理与有效能值产出比 (WDR) 废弃物的处理能值是指将废水、废气、固体废弃物处理所消耗的人力、物力、环境资源等转化为能值, 该指标数值上等于废弃物的对生态环境造成的影响与系统总产出能值的比例, 反映了单位能值产出给系统内外带来处理废弃物的多少, 该数值越大, 则环境子系统压力越大。

$$\text{WDR} = \frac{WI - W}{Y - WI} \quad (12)$$

式中, WDR 为废弃物处理与产出能值比, 无量纲。

能值环境影响率 (EEIR) 为系统不可再生能源投入能值总量与可再生能值投入能值总量之比。本文将环境所需要承受的能值定义为可再生能值、不可再生能源投入能值、社会反馈投入能值和废弃物能值之和, 用系统有效输出能值来代替可再生资源能值。EEIR 数值越小, 表明环境子系统的负荷越小, 物质的利用率越高。

$$\text{EEIR} = \frac{N + R + F + W}{Y - WI} \quad (13)$$

式中, EEIR 为能值环境影响率, 无量纲。

综上, 煤炭矿区复合生态系统各项能值指标及其含义见表 2。

表 2 基于能值分析的煤炭矿区复合生态系统评价指标体系

Table 2 Assessment indicators for integrated ecosystem in mining area based energy analysis

能值指标 Emergy indicators	计算表达式 Mathematical formula	代表意义 Implication
能值流量 Emergy flow		
可再生资源能值 (Renewable resources $R$ )		本地可再生环境资源
不可再生资源能值 (Non-renewable resources $N$ )		本地不可再生资源
输入能值 (Input emergy $F$ )		外界输入的能值
输出能值 (Output emergy $Y$ )		系统向外界输出的能值
能值总量 (Total emergy $U$ )	$R + N + F$	系统拥有的总能值财富
煤矿系统评价指标 Assessment indicators of mine system		
煤矿系统能值转换率 (ETC)	$U/Y_{\text{energy}}$	系统能值利用效率
能值自给率 (ESR)	$(N + R)/U$	自然资源系统的支撑能力
资源子系统能值评价指标 Assessment indicators of resource sub-system		
资源消耗率 (RCR)	$U/Y$	资源的使用效率
煤炭资源产出率 (CRYR)	$CO/U$	系统对煤炭资源的依赖程度
可再生资源负荷率 (RRLR)	$U/R$	系统内可再生资源的承载压力
经济子系统能值评价指标 Assessment indicators of economy sub-system		
能值投资率 (EIR)	$F/(R + N)$	经济系统的发展程度
有效能值产出率 (EEYR)	$(Y - WI - F)/F$	经济系统的运行效率
能值货币比 (EMR)	$U/\text{GDP}$	自然资源对经济系统的贡献
社会子系统能值评价指标 Assessment indicators of society sub-system		
人均能值量 (EP)	$U/P$	员工生活水平和生活质量

能值指标 Emergy indicators	计算表达式 Mathematical formula	代表意义 Implication
能值功率密度 (EPD)	$U/A$	系统能值开发程度
环境子系统能值评价标准 Assessment indicators of environment sub-system		
废弃物与可再生资源能值比 (WER)	$W/R$	废弃物排放对环境系统造成的压力
废弃物处理能值与产出能值比 (WDR)	$(WI - W) / (Y - WI)$	系统外处理废弃物的压力
能值环境影响率 (EEIR)	$(N + R + F + W) / (Y - WI)$	矿区作业对环境产生的压力

### 3 实证研究

选择山东省龙口矿区北皂煤矿作为研究对象,对复合生态系统能值指标进行全面分析。北皂煤矿始建于1976年10月,1983年12月16日正式投产,核定年生产能力225万t,现有职工3077人,矿井属极典型软岩矿井,立井多水平开采,采掘机械化程度达到100%。2005年6月海下首采面联合试运转圆满成功,填补我国海下采煤的空白。北皂煤矿以煤炭生产、油页岩综合利用为主业。

#### 3.1 北皂煤矿复合生态系统能值指标

通过到矿区实地调研、查阅《烟台统计年鉴》、《龙口市志》等文献,获得复合生态系统、资源、经济、社会和环境等方面原始数据。本文能值转换率采用2000年确定的全球能值基准 $15.83 \times 10^{24}$  sej/a<sup>[16]</sup>。因此需要对以往能值研究中采用的能值转换率进行基准变换<sup>[3,7-8,17-19]</sup>,得到新的能值评估参数。通过能值转换率,计算2006—2012年能值流量。北皂煤矿复合生态系统能值分析框架及赋值见表3。

表3 北皂煤矿复合生态系统能值分析框架及赋值

Table 3 Integrated ecological system energy analysis framework and its data for Beizao mine

项目 Items	能值转化率 Emergy transformity (sej/J 或 sej/g)	太阳能值 Solar energy/(sej/a)						
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
可再生环境资源 Renewable resources								
太阳辐射能 Sun radiation energy	1.00	$1.08 \times 10^{18}$	$1.07 \times 10^{18}$	$1.03 \times 10^{18}$	$1.00 \times 10^{18}$	$1.01 \times 10^{18}$	$1.00 \times 10^{18}$	$1.03 \times 10^{18}$
地表风能 Surface wind energy	$2.45 \times 10^3$	$8.31 \times 10^{11}$	$8.95 \times 10^{11}$	$8.31 \times 10^{11}$	$7.13 \times 10^{11}$	$9.62 \times 10^{11}$	$1.30 \times 10^{10}$	$8.95 \times 10^{11}$
雨水势能 Rainwater potential energy	$1.76 \times 10^4$	$3.66 \times 10^{11}$	$3.73 \times 10^{11}$	$3.21 \times 10^{11}$	$3.05 \times 10^{11}$	$3.21 \times 10^{11}$	$3.21 \times 10^{11}$	$3.21 \times 10^{11}$
雨水化学能 Rainwater chemical energy	$3.05 \times 10^4$	$2.27 \times 10^{15}$	$2.57 \times 10^{15}$	$1.93 \times 10^{15}$	$2.01 \times 10^{15}$	$2.31 \times 10^{15}$	$1.95 \times 10^{15}$	$1.99 \times 10^{15}$
地球旋转能 Earth revolve energy	$5.76 \times 10^4$	$2.47 \times 10^{12}$	$2.47 \times 10^{12}$	$2.47 \times 10^{12}$	$2.47 \times 10^{12}$	$2.47 \times 10^{12}$	$2.47 \times 10^{12}$	$2.47 \times 10^{12}$
潮汐能 Tide energy	$3.06 \times 10^4$	$1.11 \times 10^{10}$	$1.10 \times 10^{10}$	$1.09 \times 10^{10}$	$1.06 \times 10^{10}$	$1.07 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^{10}$	$1.12 \times 10^{10}$
系统循环利用能 System circulate energy		$8.96 \times 10^{16}$	$8.30 \times 10^{16}$	$8.22 \times 10^{16}$	$1.52 \times 10^{17}$	$1.59 \times 10^{17}$	$1.56 \times 10^{17}$	$1.43 \times 10^{17}$
小计 Total		$1.17 \times 10^{18}$	$1.16 \times 10^{18}$	$1.11 \times 10^{18}$	$1.15 \times 10^{18}$	$1.16 \times 10^{18}$	$1.16 \times 10^{18}$	$1.17 \times 10^{18}$
不可再生资源 Non-renewable resources								
水资源 Water resources	$6.89 \times 10^4$	$1.19 \times 10^{17}$	$1.26 \times 10^{17}$	$1.34 \times 10^{17}$	$1.35 \times 10^{17}$	$1.34 \times 10^{17}$	$1.36 \times 10^{17}$	$1.27 \times 10^{17}$
地球损失 Earth damage	$1.69 \times 10^7$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.10 \times 10^{11}$
煤层 Coal layer	$3.32 \times 10^4$	$2.30 \times 10^{21}$	$2.44 \times 10^{21}$	$2.64 \times 10^{21}$	$2.77 \times 10^{21}$	$2.79 \times 10^{21}$	$2.79 \times 10^{21}$	$2.58 \times 10^{21}$
小计 Total		$2.30 \times 10^{21}$	$2.44 \times 10^{21}$	$2.64 \times 10^{21}$	$2.77 \times 10^{21}$	$2.79 \times 10^{21}$	$2.79 \times 10^{21}$	$2.64 \times 10^{21}$
不可再生工业辅助能 Non-renewable industrial auxiliary energy								

项目 Items	能值转化率 Emergy transformity (sej/J 或 sej/g)	太阳能值 Solar energy/(sej/a)						
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
电力 Electric power	$2.69 \times 10^5$	$3.32 \times 10^{19}$	$3.33 \times 10^{19}$	$3.41 \times 10^{19}$	$3.55 \times 10^{19}$	$3.55 \times 10^{19}$	$3.47 \times 10^{19}$	$3.39 \times 10^{19}$
油脂 Oil	$1.11 \times 10^5$	$6.55 \times 10^{13}$	$2.71 \times 10^{14}$	$3.34 \times 10^{14}$	$1.46 \times 10^{14}$	$1.41 \times 10^{14}$	$7.72 \times 10^{13}$	$2.92 \times 10^{14}$
木材 Lumber	$5.86 \times 10^4$	$4.28 \times 10^{18}$	$5.73 \times 10^{18}$	$5.59 \times 10^{18}$	$4.37 \times 10^{18}$	$3.46 \times 10^{18}$	$4.25 \times 10^{18}$	$4.11 \times 10^{18}$
炸药 Explosive	$5.91 \times 10^6$	$4.00 \times 10^{19}$	$5.38 \times 10^{19}$	$5.08 \times 10^{19}$	$4.04 \times 10^{19}$	$3.20 \times 10^{19}$	$2.20 \times 10^{19}$	$3.76 \times 10^{19}$
雷管 Detonator	$5.91 \times 10^6$	$5.45 \times 10^{15}$	$6.72 \times 10^{15}$	$6.30 \times 10^{15}$	$4.72 \times 10^{15}$	$3.91 \times 10^{15}$	$2.81 \times 10^{15}$	$5.34 \times 10^{15}$
钢材 Steel products	$4.13 \times 10^9$	$3.21 \times 10^{19}$	$1.13 \times 10^{20}$	$2.05 \times 10^{19}$	$1.78 \times 10^{19}$	$2.52 \times 10^{19}$	$1.22 \times 10^{19}$	$2.31 \times 10^{19}$
水泥 Cement	$1.97 \times 10^9$	$2.86 \times 10^{19}$	$3.61 \times 10^{19}$	$3.82 \times 10^{19}$	$3.10 \times 10^{19}$	$3.08 \times 10^{19}$	$2.46 \times 10^{19}$	$2.57 \times 10^{19}$
砂石 Sand and stone	$8.47 \times 10^9$	$5.22 \times 10^{20}$	$7.05 \times 10^{20}$	$7.27 \times 10^{20}$	$5.53 \times 10^{20}$	$5.43 \times 10^{20}$	$5.36 \times 10^{20}$	$6.43 \times 10^{20}$
小计 Total		$6.60 \times 10^{20}$	$9.47 \times 10^{20}$	$8.76 \times 10^{20}$	$6.82 \times 10^{20}$	$6.70 \times 10^{20}$	$6.33 \times 10^{20}$	$7.67 \times 10^{20}$
人力资源 Human resources								
劳务 Labour services	$1.29 \times 10^7$	$2.61 \times 10^{20}$	$2.73 \times 10^{20}$	$2.61 \times 10^{20}$	$2.73 \times 10^{20}$	$2.43 \times 10^{20}$	$2.54 \times 10^{20}$	$2.46 \times 10^{20}$
总投入能值 Total input energy		$3.22 \times 10^{21}$	$3.66 \times 10^{21}$	$3.78 \times 10^{21}$	$3.72 \times 10^{21}$	$3.70 \times 10^{21}$	$3.67 \times 10^{21}$	$3.65 \times 10^{21}$
产出能值 Output emergy								
煤炭 Coal	$6.67 \times 10^4$	$2.71 \times 10^{21}$	$2.88 \times 10^{21}$	$3.11 \times 10^{21}$	$3.26 \times 10^{21}$	$3.29 \times 10^{21}$	$3.29 \times 10^{21}$	$3.12 \times 10^{21}$
瓦斯 Gas	$4.80 \times 10^4$	$1.26 \times 10^{18}$	$1.51 \times 10^{18}$	$2.09 \times 10^{18}$	$2.03 \times 10^{18}$	$2.27 \times 10^{18}$	$1.85 \times 10^{18}$	$1.89 \times 10^{18}$
燃料油 Fuel oil	$5.40 \times 10^4$	$1.28 \times 10^{20}$	$1.36 \times 10^{20}$	$1.80 \times 10^{20}$	$2.43 \times 10^{20}$	$2.69 \times 10^{20}$	$2.86 \times 10^{20}$	$2.55 \times 10^{20}$
总计 Total		$2.84 \times 10^{21}$	$3.01 \times 10^{21}$	$3.29 \times 10^{21}$	$3.51 \times 10^{21}$	$3.56 \times 10^{21}$	$3.57 \times 10^{21}$	$3.37 \times 10^{21}$
废物流能值 Waste flow emergy								
废水 Waste water	$1.12 \times 10^6$	$2.49 \times 10^{17}$	$2.37 \times 10^{17}$	$2.28 \times 10^{17}$	$2.33 \times 10^{17}$	$2.15 \times 10^{17}$	$1.97 \times 10^{17}$	$1.76 \times 10^{17}$
废气 Waste gas	$1.72 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{17}$	$1.81 \times 10^{17}$	$1.84 \times 10^{17}$	$1.82 \times 10^{17}$	$1.59 \times 10^{17}$	$1.40 \times 10^{17}$	$1.27 \times 10^{17}$
固体废弃物 Solid waste	$3.02 \times 10^6$	$5.71 \times 10^{17}$	$6.40 \times 10^{17}$	$7.80 \times 10^{17}$	$6.85 \times 10^{17}$	$4.77 \times 10^{17}$	$3.48 \times 10^{17}$	$3.31 \times 10^{17}$
小计 Total		$1.00 \times 10^{18}$	$1.06 \times 10^{18}$	$1.19 \times 10^{18}$	$1.10 \times 10^{18}$	$8.51 \times 10^{17}$	$6.85 \times 10^{17}$	$6.34 \times 10^{17}$
废弃物对环境的综合影响 能值 Comprehensive influence emergy of waste to environment	$1.15 \times 10^{20}$	$1.17 \times 10^{20}$	$1.19 \times 10^{20}$	$1.21 \times 10^{20}$	$1.23 \times 10^{20}$	$1.25 \times 10^{20}$	$1.27 \times 10^{20}$	

表中燃料油系开采伴生矿产油页岩所生产的

根据表 2 和表 3 综合可得北皂煤矿能值评价指标体系及其赋值(表 4)。

### 3.2 北皂煤矿复合生态系统能值指标分析与评价

从能值流量看出,矿区对于本地不可再生资源的利用量较高,属于高投入、高产出的能源密集型的复合系统。从能值投入产出比上分析可知,北皂煤矿复合生态系统的运行具有较好的平衡性,复合系统发展具有一定规模。

复合生态系统评价指标主要用来评价系统耦合度及系统的经济效益。北皂煤矿的能值转化率在 2007 年到 2011 年逐年下降,说明通过一系列的管理创新及设备更新,系统耦合度增加,经济效益增加,2012 数据的反弹是海域纵深开采难度加大的真实反映。系统结构中,自然资源投入占总投入的 72% 左右,煤炭资源占环境资源的 99%,说明矿区的经济效益大部分来源于煤炭资源消耗,而北皂煤矿的劳务比重不足 20%,体现了科技贡献率;通过对江苏省姚桥煤矿<sup>[13]</sup>的对比分析,可以看出北皂煤矿资源利用结构较为合理。

资源子系统是整个煤炭矿区复合生态系统的动力来源,平均资源消耗率较其他矿区低,说明新的产业链开发可以降低单位能值资源的消耗;煤炭资源产出率处于 82%—96% 之间,说明系统对煤炭资源有极大的依赖性;可再生资源负荷率高达 2800 多,说明矿区对可再生资源的利用极少。

经济子系统是资源利用的中枢,为社会子系统提供经济支持,能值投资率反映出北皂煤矿经济发展程度处于较好水平,这是发展多元信息化带来的优势;分析有效能值产出比可知,加大科技的投入可以提高资源的



综合效率,减少废弃物的排放;而矿区的能值货币比较高,应该使矿区向生产经营多元化方向发展。

表 4 北皂煤矿能值分析评价指标表  
Table 4 Beizao mine energy analysis and assessment indicators

能值指标 Assessment indicators	单位 Unit	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
能值流量 Energy flow								
可再生资源能值 (Renewable resources $R$ )	sej	$1.17 \times 10^{18}$	$1.16 \times 10^{18}$	$1.11 \times 10^{18}$	$1.15 \times 10^{18}$	$1.16 \times 10^{18}$	$1.16 \times 10^{18}$	$1.17 \times 10^{18}$
不可再生资源能值 (Non-renewable resources $N$ )	sej	$2.30 \times 10^{21}$	$2.44 \times 10^{21}$	$2.64 \times 10^{21}$	$2.77 \times 10^{21}$	$2.79 \times 10^{21}$	$2.79 \times 10^{21}$	$2.64 \times 10^{21}$
输入能值 (Input energy $F$ )	sej	$9.22 \times 10^{20}$	$1.22 \times 10^{21}$	$1.14 \times 10^{21}$	$9.55 \times 10^{20}$	$9.13 \times 10^{20}$	$8.88 \times 10^{20}$	$1.01 \times 10^{21}$
输出能值 (Output energy $Y$ )	sej	$2.84 \times 10^{21}$	$3.01 \times 10^{21}$	$3.29 \times 10^{21}$	$3.51 \times 10^{21}$	$3.56 \times 10^{21}$	$3.57 \times 10^{21}$	$3.37 \times 10^{21}$
能值总量 (Total energy $U$ )	sej	$3.22 \times 10^{21}$	$3.66 \times 10^{21}$	$3.78 \times 10^{21}$	$3.72 \times 10^{21}$	$3.70 \times 10^{21}$	$3.67 \times 10^{21}$	$3.65 \times 10^{21}$
复合生态系统评价指标 Assessment indicators of integrated ecosystem								
煤矿系统能值转换率 (ETC)	sej/J	$7.48 \times 10^4$	$8.01 \times 10^4$	$7.55 \times 10^4$	$6.96 \times 10^4$	$6.81 \times 10^4$	$6.73 \times 10^4$	$7.09 \times 10^4$
能值自给率 (ESR)	无量纲	0.8094	0.8093	0.8012	0.7887	0.7835	0.7796	0.7823
资源子系统能值评价指标 Assessment indicators of resource sub-system								
资源消耗率 (RCR)	无量纲	1.13	1.21	1.15	1.06	1.04	1.03	1.08
煤炭资源产出率 (CRYR)	无量纲	0.88	0.82	0.87	0.94	0.96	0.97	0.92
可再生资源负荷率 (RRLR)	无量纲	$2.57 \times 10^3$	$2.95 \times 10^3$	$3.17 \times 10^3$	$2.86 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$	$2.79 \times 10^3$	$2.77 \times 10^3$
经济子系统能值评价指标 Assessment indicators of economy sub-system								
能值投资率 (EIR)	无量纲	0.40	0.50	0.43	0.34	0.33	0.32	0.38
有效能值产出率 (EEYR)	无量纲	1.96	1.37	1.79	2.68	3.00	3.16	2.97
能值货币比 (EMR)	sej/¥	$3.34 \times 10^{13}$	$3.79 \times 10^{13}$	$3.92 \times 10^{13}$	$3.90 \times 10^{13}$	$3.86 \times 10^{13}$	$3.80 \times 10^{13}$	$3.97 \times 10^{13}$
社会子系统能值评价指标 Assessment indicators of society sub-system								
人均能值量 (EP)	sej/人	$9.72 \times 10^{17}$	$1.05 \times 10^{18}$	$1.14 \times 10^{18}$	$1.08 \times 10^{18}$	$1.20 \times 10^{18}$	$1.14 \times 10^{18}$	$1.17 \times 10^{18}$
能值功率密度 (EPD)	sej/m <sup>2</sup>	$1.09 \times 10^{14}$	$1.23 \times 10^{14}$	$1.27 \times 10^{14}$	$1.26 \times 10^{14}$	$1.25 \times 10^{14}$	$1.24 \times 10^{14}$	$1.23 \times 10^{14}$
环境子系统能值评价标准 Assessment indicators of environment sub-system								
废弃物与可再生资源能值比 (WER)	无量纲	0.86	0.92	1.08	0.96	0.73	0.59	0.54
废弃物处理能值与有效产出能 值比 (WDR)	无量纲	$4.17 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$	$3.71 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.60 \times 10^{-2}$	$3.89 \times 10^{-2}$
能值环境影响率 (EEIR)	无量纲	1.18	1.26	1.19	1.10	1.08	1.07	1.13

社会子系统和谐是复合生态系统的管理目标之一,社会子系统以人口为核心。矿区的人均能值密度处于上升趋势,能值功率密度的均值较高,但是土地资源可能会成为未来稀缺资源。

环境子系统渐渐成为制约矿区可持续发展的重要限制因素。北皂煤矿废弃物与可再生资源能值比在 2008 年之后不断下降,是提高资源的综合利用率和降低物料消耗的反映;从废弃物处理与有效能值先降后升的趋势中分析可知废弃物对生态环境的影响存在一个积累效应,矿区应该加大对废弃物的处理力度;能值环境影响率数据较低,且波动很小,说明北皂煤矿环境子系统负荷较小,物质利用率较高,生态系统较为稳定。

### 3.3 北皂煤矿复合生态系统管理建议

通过对北皂煤矿复合生态系统的评价和分析,提出相应的管理建议。(1) 适当调整资源利用结构,积极开发可再生资源。煤炭矿区复合生态系统可再生资源负荷率高达 2800 多,对可再生资源的利用较少,充分利用潮汐能、风能、太阳能等可再生资源,延伸矿产资源开发的生态产业链。(2) 加强产业集群建设,优化利用土地资源。煤炭资源产出率保持在 85% 左右,系统对煤炭资源储量的依赖性过大,应充分利用采煤的废弃物—煤矸石发展建材业、利用近海海水资源和采矿废弃土地发展水产养殖业,将煤炭矿区建设成为生态产业聚集区,减少对不可再生资源的依赖。(3) 进一步净化矿井排水、有害气体排放,减少污染物的排放,及时治理采

空区塌陷,恢复植被,以利于矿区复合生态系统健康。

#### 4 结论

煤炭矿区复合生态系统是由资源子系统、经济子系统、社会子系统、环境子系统相互相耦合而成的生态经济系统,以煤炭资源开发利用为主导,以物质循环、能量流动、价值转移和增值、信息传递为特征,实现生产、消费、生态环境调控等功能。文中运用能值分析方法,构建了矿区复合生态系统及各子系统能值评价指标体系,能对系统健康状况、经济、资源、环境利用效率进行评价。以山东省龙口矿区北皂煤矿为研究对象,对煤矿复合生态系统及各子系统分别进行了能值分析与评价,可以看出,北皂煤矿复合生态系统较为健康,运行效率较高。但是,凸显了相应的问题。

(1) 资源子系统 煤炭矿区是以煤炭资源开采为主导产业的区域,资源储量的枯竭是矿区可持续发展面临的主要问题,对不可再生资源的依赖性过大;可再生资源利用率低。

(2) 经济子系统 北皂煤矿的科技化和信息化程度较高,科技贡献率较大,但是经济系统的发展仍然过多地依赖于煤炭资源储量。

(3) 社会子系统 北皂煤矿人均能值用量呈现上升趋势,表明人均生活质量和生活水平均有所增长;区域能值功率密度也维持在较高的水平上,一定程度上反映了土地将成为系统可持续发展的制约性因素。

(4) 环境子系统 北皂煤矿一直致力于绿色矿山建设,2008年以后环境系统的压力就在逐步降低,各子系统的耦合性逐步增强,资源的循环利用程度也在加大,但是煤炭开采不可避免地产生土地资源破坏、水土污染等生态环境问题。

#### 参考文献(References):

- [1] Odum H T, Odum E C. Ecology and Economy: "Emergy" Analysis and Public Policy in Texas. Texas: The Office of Natural Resources and Texas Department of Agriculture, Austin, 1987, 163-171.
- [2] Odum H T. Self-organization, transformity and information. Science, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [3] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [4] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecological Engineering, 1997, 9(1/2): 51-69.
- [5] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李雷, 彭少麟. 评价系统可持续发展能力的能值指标. 中国环境科学, 2002, 22(4): 380-384.
- [6] 陆宏芳, 蓝盛芳, 彭少麟. 系统可持续发展的能值评价指标的新拓展. 环境科学. 2003, 24(3): 150-154.
- [7] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [8] 严茂超, 李海涛, 程鸿, 沈文靖. 中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估. 北京林业大学学报, 2001, 23(6): 66-69.
- [9] 金丹, 卞正富. 基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用. 生态学报, 2010, 30(7): 1725-1733.
- [10] Kazanci C, Schramski J R, Bastianoni S. Individual based emergy analysis: A Lagrangian model of energy memory. Ecological Complexity 2012, 11: 103-108.
- [11] Patterson M G. Are all processes equally efficient from an emergy perspective?: Analysis of ecological and economic networks using matrix algebra methods. Ecological Modelling, 2012, 226: 77-91.
- [12] 顾康康, 刘景双, 王洋. 生态足迹模型修正研究——以辽中地区矿业城市为例. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26(5): 633-639.
- [13] 金丹. 矿山生态系统物能流核算. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [14] 王立革, 焦晓燕, 董二伟, 郝春花, 苗伟, 田锋. 采煤沉陷区复垦前后农业生态系统能值变化特征分析. 生态科学, 2011, 30(3): 334-339.
- [15] 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. 生态学报, 2014, 34(3): 710-717.
- [16] Odum H T, Brown M T, Williams S B. Handbook of Emergy Evaluation. Folio#\_1: Introduction and Global Budget. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000: 7-8.
- [17] 骆世明. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 1987: 450-465.
- [18] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [19] 尚清芳. 干旱区绿洲农业生态经济系统能值分析——以武威市凉州区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.