

# 我国炼油企业能源效率评价方法研究

孙王敏, 刘建英, 姜洪殿, 杨晓光, 刘鹏鸽, 孙仁金\*

中国石油大学(北京)工商管理学院, 北京 102249

\* 通信作者, sunrenjin@cup.edu.cn

收稿日期: 2017-02-27

国家社会科学基金重大项目“非常规油气开发利用对国家能源安全和社会经济的影响”(13&ZD159)和国家自然科学基金项目“中国天然气安全预警与应急系统研究”(71273277)联合资助

**摘要** 在中国能源供需矛盾、结构性矛盾突出的情况下, 如何提高炼油企业的能源效率成了亟待解决的问题; 为了促进经济、能源与环境的可持续协调发展, 提高能源利用效率有着极为重要的现实意义。为此, 本文在分析影响炼油企业能源效率因素的基础上, 构建了炼油企业能源效率评价指标体系, 并运用组合赋权法确定各项指标的最终权重, 进而建立了基于灰色关联 TOPSIS 的炼油企业能源效率评价方法。同时运用 8 家炼油企业的生产数据, 对炼油企业的能源利用效率评价体系进行有效性检验。实证结果表明, 该指标体系能够客观、有效地反映出炼油企业能源效率水平, 可广泛用于评估炼油企业能源效率水平。

**关键词** 炼油企业; 能源效率评价; 组合赋权; 灰色关联 TOPSIS

## 0 引言

近年来, 我国单位 GDP 能耗逐年下降(见图 1), 粗放的发展方式正在转变。截至 2015 年年底, 我国已完成“十二五”规划目标, 单位 GDP 能耗下降 18.2%<sup>[1]</sup>。然而, 我国单位 GDP 能耗仍约为世界平均水平的 2 倍, 不仅高于发达国家, 也高于巴西、墨西哥等发展中国家。能源消耗量巨大但转化效率较低依然是我国能源消费面临的重要问题。能源对于国家的发展具有重要的战略意义, 是一个国家或地区总体发展战略的核心构成, 我国国民经济保持高速增长的基础是能源的持续供给。据国家统计局统计的相关数据显示, 在我国的能源消费结构中, 石油占据的比例为 18.5%。石油、天然气及各类炼化制品是我国国民经济健康、持续发展的坚实基础。

对于处于工业发展中期阶段的我国, 其各类工业的稳定发展需要能源的持续支持。同时, 随着我国能

源利用程度的加深, 环境污染的问题日益突出, 能源资源的获取难度日渐增加, 全国各地持续的雾霾天气也严重的影响了人民群众的日常生活。以高污染、高能耗为主要特征的传统工业部门, 将面临“优质油源获取难、环保标准升级快”的双重困境。作为传统的高污染、高能耗、高排放行业, 我国炼油企业在提高国家整体能源利用效率方面承担着重要的责任。而做好我国炼油企业能源效率评价对提高炼油企业能源利用效率具有重要意义。

现阶段, 有关能源利用效率的研究主要是从国家、省域等宏观层面进行研究。Ang B W 等研究了能源效率与经济的关系<sup>[2]</sup>, 吴琦等基于 DEA 模型对能源效率进行评价<sup>[3]</sup>, 而微观企业层面的研究相对匮乏。部分学者的研究涉及造纸、钢铁、火电和热电等企业的能源效率的评价, 陈由旺等研究了油气田的能源效率指标体系<sup>[4]</sup>, 而炼油企业能源效率评价的研究相对不足。为此, 本文在分析影响炼油企业能源效率因素的基础

引用格式: 孙王敏, 刘建英, 姜洪殿, 杨晓光, 刘鹏鸽, 孙仁金. 我国炼油企业能源效率评价方法研究. 石油科学通报, 2018, 01: 113-124  
SUN Wangmin, LIU Jianying, JIANG Hongdian, YANG Xiaoguang, LIU Pengge, SUN Renjin. Research on energy efficiency evaluation of oil refining enterprises in China. Petroleum Science Bulletin, 2018, 01: 113-124. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.01.012

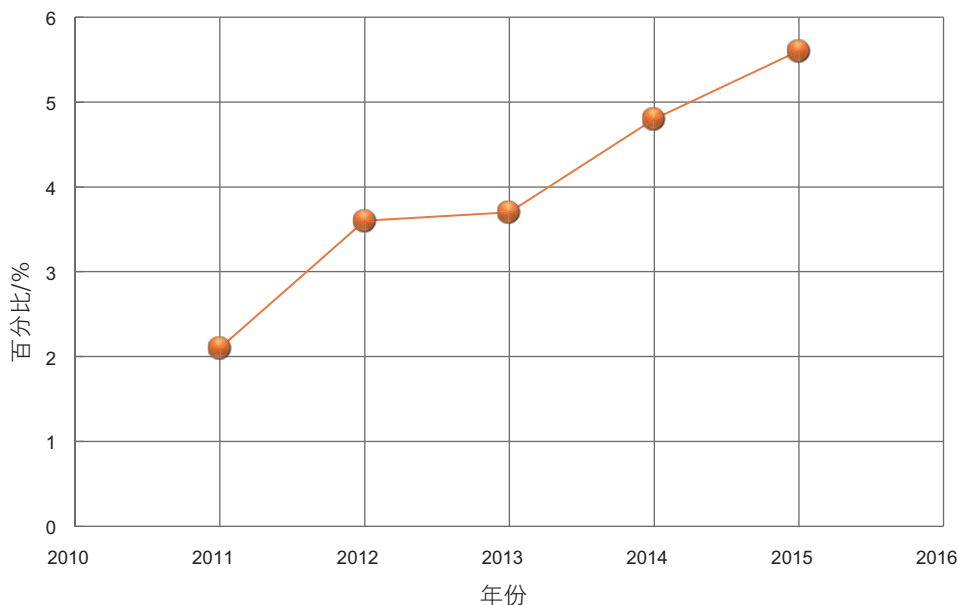


图1 2011—2017年单位GDP能耗下降百分比

Fig. 1 2011—2017 Percentage decline in energy consumption per unit of GDP

上,构建了炼油企业能源效率评价指标体系,并运用组合赋权法确定各项指标的最终权重,进而建立了基于灰色关联TOPSIS的炼油企业能源效率评价方法;同时选取8家具有代表性的炼油企业进行能源效率评价体系的实例验证,结果表明所采用的评价方法准确有效,模型运行可靠。

## 1 炼油企业能源效率影响因素分析

我国炼油企业能源利用效率较国际先进水平尚显落后<sup>[5]</sup>。全球领先的炼油企业轻油收率高达85%,能源消耗水平不足40 kg标准油/t原油。国内最强的两大石油石化企业轻油平均收率也仅为76%~78%,能源消耗水平也只降到58~60 kg标准油/t原油。而地方炼油企业的轻油收率更是低于60%,原油加工能源消耗超过80 kg标准油/t原油<sup>[6]</sup>。针对我国炼油企业的特点及问题,分别从经济因素、技术因素、管理因素和社会效益因素四个方面对影响炼油企业能源效率利用水平进行分析。

### 1.1 经济因素

影响炼油企业能源效率经济因素主要体现在外在能源价格和内在企业规模两个方面<sup>[7-10]</sup>。

(1)外在能源价格。能源价格是企业做出能源消费选择的重要衡量要素,其对能源效率的影响机制相对复杂。从长远来看,能源价格的提升有助于能源效率

的提高。但是,发挥能源价格调控能源效率的作用需要依靠市场化的定价机制。

(2)内在企业规模。企业规模的扩大有利于能源的循环利用,进而有助于企业整体能源利用效率的提升。同时,研究表明超过1000万t/a的炼厂其二氧化碳排放因子为0.188,500~1000万t的炼油企业的为0.197,低于500万t的为0.211。因此,企业规模对能源效率的影响不仅体现在规模经济效应,还体现在降低企业的碳排放强度方面。

### 1.2 技术因素

技术进步是促进能源效率提升的重要因素。随着社会生态环境的日益恶化,油品质量升级势在必行,对于炼油装置与设备的要求更高,炼油企业面临的环境保护困境和技术升级压力越来越大。因此,炼厂装置升级、炼油流程优化势在必行。无论是满足炼油企业内生的发展要求,还是应对外界环境限制,均需炼油企业着力于技术手段的提升。

### 1.3 管理因素

能源效率管理是指在设定的最优目标值下,结合国家的能源管理政策,制定科学合理的管理流程,通过调配资金、人员、技术等资源,实现能源利用效率的提高。管理与生产脱节、管理行动难落实等现象的存在致使能源效率的提升停滞于管理环节。究其原因,主要是各业务单元的沟通与配合、管理与技术人员的

合理调配问题。

### 1.4 社会效益因素

现阶段有关能源效率的研究已从“能源—经济”体系拓展至“能源—环境—经济”，将环境要素纳入能源效率体系是关注社会效益的需要。社会效益对于能源效率的影响最直接的体现即为环境规制<sup>[7]</sup>。其在宏观层面主要体现在政府的宏观管理体系即政策、战略和理念，在中观层面主要体现在影响产业结构，微观层面主要体现在对企业生产决策的影响。

## 2 炼油企业能源效率评价指标体系及方法

本文基于我国炼油企业生产运行的实际，并结合炼油企业能源利用效率影响因素，设计一套炼油企业能源效率评价指标体系，并对炼油企业能源效率进行评价，从而为企业提高能源利用效率及决策提供有力依据。

### 2.1 能源效率评价指标体系

以系统性、科学性、实用性和可操作性为基本原则，运用层次分析法将评价指标体系分成3个层次：目标层、准则层和指标层。依据炼油企业能源效率影响因素分析，将评价指标体系分解为4个要素指标：能耗结构指标、能源技术效率指标、能源利用经济指标、能源环境效率指标，如表1所示。

#### 2.1.1 能耗结构指标

能耗结构指标主要包括：水占能源消耗量的比重、电力占能源消耗量的比重、蒸汽占能源消耗量的比重和石油制品占能源消耗量的比重<sup>[8]</sup>。四项指标以 $A_i$ 来表示：

$$A_i = \frac{F_i}{F_0} \times 100\% \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

式中， $F_i$ 分别表示水、电力、蒸汽及石油制品消耗量； $F_0$ 表示在炼油企业生产运行过程中不进行加工转化的总体能源消耗量。

#### 2.1.2 能源技术效率指标

能源技术效率指标主要反映的是炼油企业生产运行过程中能源的使用效率。该指标主要以单因能耗 $B_1$ 、能量密度指数 $B_2$ 、能源产品加工转化率 $B_3$ 来表示。

$$B_1 = \frac{F_0}{J \times \gamma} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $J$ 、 $\gamma$ 分别表示原油及外购原料加工量、炼油能量因数。

$$B_2 = \frac{F_0/t}{\sum[(K \times \mu) + I + L]} \times 100\% \quad (3)$$

式中， $t$ 、 $K$ 、 $\mu$ 、 $I$ 、 $L$ 分别表示报告期全年天数、装置加工量、装置的标准能耗、显热和显区外系统能耗。

$$B_3 = \frac{F_c}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

式中， $F_c$ 表示炼油企业生产过程的能源投入总量， $Q$ 表示企业进行加工转化的产出总量。

表1 我国炼油企业能源效率评价指标体系

Table 1 Oil refining enterprises energy efficiency evaluation index system of China

主要指标		
目标层	指标层	
炼油企业 能源效率	准则层	指标层
	能耗结构指标(A)	水占能源消耗量的比重( $A_1$ )
		电力占能源消耗量的比重( $A_2$ )
		蒸汽占能源消耗量的比重( $A_3$ )
石油制品占能源消耗量的比重( $A_4$ )		
能源技术效率指标(B)	单因能耗( $B_1$ )	
	能量密度指数( $B_2$ )	
	能源产品加工转化率( $B_3$ )	
能源利用经济指标(C)	单位能耗利税额( $C_1$ )	
	单位能耗工业增加值( $C_2$ )	
	能源消费弹性系数( $C_3$ )	
能源环境效率指标(D)	年平均节能率( $D_1$ )	
	单位能耗CO <sub>2</sub> 排放量( $D_2$ )	
	工业用水重复利用率( $D_3$ )	

### 2.1.3 能源利用经济指标

在炼油企业能源效率评价体系中,主要反映的是能源消耗所带来的经济效益。因此,能源利用经济指标主要包括单位能耗利税额  $C_1$ 、单位能耗工业增加值  $C_2$ 、能源消费弹性系数  $C_3$ 。

$$C_1 = \frac{H}{F_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{M}{F_0} \times 100\% \quad (6)$$

$$C_3 = \frac{(F_{0(x+1)} - F_{0x})/F_{0x}}{(Z_{(x+1)} - Z_x)/Z_x} \quad (7)$$

式中,  $H$ 表示报告期内炼油企业的利税额;  $M$ 表示炼油企业在报告期内的工业增加值;  $F_{0(x+1)}$ 、 $F_{0x}$ 、 $Z_{(x+1)}$ 、 $Z_x$ 分别表示报告期内相应年份的总体能源消耗量和工业增加值<sup>[11]</sup>。

### 2.1.4 能源环境效率指标

能源环境效率指标的设立主要是基于环境规章制度与社会效益。该指标主要包括年平均节能率  $D_1$ 、单位能耗二氧化碳排放量  $D_2$ 和工业用水重复利用率  $D_3$ 。

$$D_1 = \left[ 1 - \left( \frac{F_5}{F_6} \right)^{\frac{1}{N}} \right] \times 100\% \quad (8)$$

$$D_2 = \frac{S}{F_0} \times 100\% \quad (9)$$

其中,  $F_5$ 表示报告期万元产值综合能耗,  $F_6$ 表示基期万元产值综合能耗,  $N$ 表示报告期和基期相隔的年份;  $S$ 表示炼油企业生产运行过程中所排放出的二氧化碳总量;  $D_3$ 可以通过相关资料直接获得<sup>[12-13]</sup>。

## 2.2 灰色关联 TOPSIS 法评价炼油企业能源效率

针对炼油企业能源效率评价指标体系的特点以及评价的目的,本文采用灰色关联 TOPSIS法进行评价。

TOPSIS法是一种多目标决策方法,该方法的关键在于筛选出目标决策问题中的“正理想解”和“负理想解”,之后经过计算,找寻到所有可选方案中距离“正理想解”最近且距离“负理想解”最远的方案。利用灰色关联度进一步改进 TOPSIS法,可以更确切地表述备选方案与理想方案的贴和度,并以此对比较方案的优劣程度,最终提供决策依据。

运用灰色关联 TOPSIS法评价炼油企业能源效率的步骤如下<sup>[14-15]</sup>:

首先,规范化指标数值并确定各评价指标的权重,列出加权标准化矩阵。

### (1) 构建指标矩阵

假设对  $m$ 个样本进行评价,包含  $n$ 个评价指标,相对应的各指标值为  $a_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ ), 则其指标矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

### (2) 指标矩阵规范化

不同指标的单位存在差异,无法直接进行比较,为消除这种差异需要对各指标进行无量纲化处理,得到新的无量纲矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\left( \sum_{i=1}^m (a_{ij})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

### (3) 确定指标权重

首先分别运用层次分析法和熵值法对各项指标的权重进行计算,然后采用组合赋权法确定各项指标的最终权重。由于层次分析法和熵值法已较为成熟,在此不多做赘述,重点介绍组合赋权法。

组合系数的确定需要考虑以下 2 个限制条件:

① 各个评价对象经过加权后的得分与“最优点”的广义距离最短:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{c=1}^s \alpha_c w_j^i (1 - x_{ij}) \quad (12)$$

式中,  $l_i$ 表示各个评价对象的加权得分与“最优点”的广义距离;  $w_j^i$ 表示第  $c$ 种赋权方法第  $j$ 个指标的权重;  $x_{ij}$ 表示第  $i$ 个对象第  $j$ 个指标经过规范化处理后的值。

② 以 Jaynes 最大熵原理为基础,以各赋权结果差异最小化为原则,构建目标函数:

$$\max Z = - \sum_{c=1}^s \alpha_c \ln \alpha_c \quad (13)$$

在上述两个限制条件的基础上,构建目标函数:

$$\min \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{c=1}^s \alpha_c w_j^i (1 - x_{ij}) + (1 - \theta) \sum_{c=1}^s \alpha_c \ln \alpha_c$$

$$\text{s.t.} \sum_{c=1}^s \alpha_c = 1 \quad \alpha_c > 0 \quad (14)$$

式中,  $\theta$ 表示两个不同目标间的平衡系数,该数值一般为  $0 \leq \theta \leq 1$ , 本文取  $\theta = 0.5$ , 通过拉格朗日函数求解组合权重  $\alpha_c$ , 可以得到:

$$\alpha_c = \frac{\exp \left\{ - \left[ 1 + \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j^i (1 - x_{ij}) / (1 - \theta) \right] \right\}}{\sum_{c=1}^s \exp \left\{ - \left[ 1 + \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j^i (1 - x_{ij}) / (1 - \theta) \right] \right\}} \quad (15)$$

因此，由组合赋权法得到的组合权重为：

$$w_e = \sum_{c=1}^s \alpha_c w_c \quad (16)$$

式中， $w_e$ 表示组合赋权后的指标权重， $w_c$ 表示运用层次分析法和熵值法分别计算的各个指标的权重， $\alpha_c$ 表示组合系数， $\sum_{c=1}^s \alpha_c = 1$ 。

(4) 指标矩阵标准化

将规范化后的指标矩阵与相应的指标权重相乘，求得加权标准化矩阵  $Y$  为：

$$Y = X \cdot W \quad (17)$$

其次，确定评价样本的正理想解和负理想解，计算样本与正理想样本和负理想样本的欧氏距离和灰色关联度。

(1) 确定正理想解  $Y_0^+$  与负理想解  $Y_0^-$

$$Y_0^+ = \left( \max_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^+, \min_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^- \right) = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_m^+) \quad (18)$$

$$Y_0^- = \left( \max_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^-, \min_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^+ \right) = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_m^-) \quad (19)$$

式中， $J^+$  为正向指标， $J^-$  为负向指标。

(2) 计算样本到正理想解和负理想解的欧氏距离

$S_i^+$  和  $S_i^-$

$$S_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^n w_j (y_{ij} - y_j^+)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

$$S_i^- = \left[ \sum_{j=1}^n w_j (y_{ij} - y_j^-)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

(3) 计算样本到正理想解和负理想解的灰色关联度

① 计算被评价对象中的样本  $i$  与“正理想解”之间的灰色关联度：

$$T_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_{ij}^+ \quad (22)$$

式中，灰色关联系数： $\mu_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j \Delta y_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta y_{ij}}{\Delta y_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta y_{ij}}$ ， $\Delta y_{ij} = |y_i^+ - y_{ij}|$ ， $\rho \in [0, 1]$ ， $\min_i \min_j \Delta y_{ij}$  代表的是两级最小差； $\max_i \max_j \Delta y_{ij}$  代表的是两级最大差， $\rho$  代表分辨系数，一般取 0.5。

② 被评价对象中的样本  $i$  与“负理想解”之间的灰色关联度为：

$$T_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_{ij}^- \quad (23)$$

式中，灰色关联系数  $\mu_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j \Delta y_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta y_{ij}}{\Delta y_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta y_{ij}}$ 。

最后，根据计算相对贴适度，实现样本的排序优选。

相对贴适度  $\pi_i$  主要表示的是被评价样本与“正理想解”和“负理想解”在趋势变化层面的上的接近程度，其计算公式如下所示：

$$\pi_i = \Omega_i^+ / (\Omega_i^+ + \Omega_i^-) \quad (24)$$

$$\Omega_i^+ = \beta_1 s_i^- + \beta_2 t_i^+ \quad (25)$$

$$\Omega_i^- = \beta_1 s_i^+ + \beta_2 t_i^- \quad (26)$$

式中， $\Omega_i^+$  表示被评价对象与“正理想解”的贴近程度； $\Omega_i^-$  表示被评价对象与“负理想解”的贴近程度； $\beta_1$  表示评价者对位置偏好程度； $\beta_2$  表示评价者对形状偏好程度。并且， $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ， $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。

经过计算所得的相对贴适度可以用来进行样本优劣的排序。具体的排序方法为：相对贴适度数值越大，则表示被评价样本越趋向于“正理想解”样本，那么样本偏优；反之，样本偏劣。

### 3 实证分析

#### 3.1 评价目标概况

经过数据搜集与筛选，本文选取了 8 家炼油企业的相关数据进行炼油企业能源效率评价指标体系的实证分析。所涉及的炼油企业包括综合型炼油企业、燃料型炼油企业、炼化一体化企业和西北地区最大的石化企业等，本文对企业的筛选以原油加工能力趋近和生产业务单元相似为主要原则，保证 8 家企业的可比性。本文构建的能源利用效率评价指标体系使用最优组合赋权法赋权，其中客观赋权部分需要用到炼油企业实际生产运行的数据。为了排除不同指标数据因量纲的差别而无法进行比较的影响因素，需对相应的数据进行预处理。预处理主要包括：各类正负向指标指向的一致化处理和指标数据的无量纲化处理。8 家炼油企业各指标的原始生产数据和预处理后的相关数据如表 2 和表 3 所示。

#### 3.2 确定炼油企业评价指标权重

##### 3.2.1 层次分析法赋权

本文设计了调查问卷，邀请了中国石油大学、北京化工大学、沈阳化工大学、辽宁石油化工大学、中石油华北石化、大庆石化、锦州石化、寰球工程和经济研究院的相关专家对本文构建的能源效率评价指标体系进行重要性打分。经构造判断矩阵和随机一致性

表2 8家炼油企业的评价指标数据

Table 2 Evaluation index data of eight refining enterprises

炼厂 评价指标	a	b	c	d	e	f	g	h
$X_1: A_1/\%$	4.53	8.3	1.39	9.87	8.94	12.46	27.41	14.65
$X_2: A_2/\%$	37.75	16.32	29.05	9.24	8.43	1.39	28.90	5.63
$X_3: A_3/\%$	38.42	18.34	17.39	16.79	14.53	18.63	17.90	17.29
$X_4: A_4/\%$	19.3	57.04	52.17	64.1	68.1	67.52	25.79	62.43
$X_5: B_1$	10.75	7.84	11.83	8.06	14.71	8.5	9.2	19.34
$X_6: B_2$	62.36	128.74	112.39	59.54	90.17	84.75	70.17	97.21
$X_7: B_3/\%$	91.78	95.10	70.07	97.49	63.76	98.08	74.54	61.55
$X_8: C_1$ (万元/t标准煤)	0.3393	0.7649	0.0896	0.6223	0.4275	0.2421	0.3274	0.2634
$X_9: C_2$ (万元/t标准煤)	0.3133	0.2919	0.0813	0.5679	0.3749	0.0896	0.2725	0.4196
$X_{10}: C_3$	1.54	0.97	1.15	0.53	0.50	0.84	1.82	0.78
$X_{11}: D_1/\%$	8.49	2.58	3.17	4.25	3.30	2.96	4.03	6.57
$X_{12}: D_2$ (吨位/t标准煤)	2.3576	2.0374	4.2630	1.6320	1.7541	2.8560	2.7447	1.8425
$X_{13}: D_3/\%$	95.67	98.04	84.16	97.25	68.16	62.34	71.23	80.70

数据来源: 各单位统计资料

表3 8家炼油企业的评价指标数据(预处理后)

Table 3 Evaluation index data of eight refining enterprises (after pretreatment)

炼厂 评价指标	a	b	c	d	e	f	g	h
$X_1: A_1$	0.1359	0.4416	0.1325	0.2956	0.3193	0.4960	0.1393	0.5605
$X_2: A_2$	0.3309	0.4907	0.0941	0.1723	0.3436	0.2869	0.5388	0.3473
$X_3: A_3$	0.3413	0.0543	0.4212	0.1536	0.1836	0.2282	0.3202	0.7009
$X_4: A_4$	0.6805	0.2302	0.2517	0.2049	0.1928	0.1945	0.5092	0.2104
$X_5: B_1$	0.3280	0.4498	0.2981	0.4375	0.2397	0.4149	0.3833	0.1823
$X_6: B_2$	0.4536	0.2197	0.2517	0.4751	0.3137	0.3338	0.4031	0.2910
$X_7: B_3$	0.3917	0.4058	0.2990	0.4160	0.2721	0.4186	0.3181	0.2627
$X_8: C_1$	0.2758	0.6218	0.0728	0.5059	0.3475	0.1968	0.2661	0.2141
$X_9: C_2$	0.3282	0.3058	0.0852	0.5948	0.3927	0.0939	0.2854	0.4395
$X_{10}: C_3$	0.1790	0.2841	0.2397	0.5200	0.5512	0.3281	0.1514	0.3534
$X_{11}: D_1$	0.6227	0.1892	0.2325	0.3117	0.2420	0.2171	0.2956	0.4819
$X_{12}: D_2$	0.3228	0.3736	0.1785	0.4664	0.4339	0.2665	0.2773	0.4131
$X_{13}: D_3$	0.4064	0.4164	0.3575	0.4131	0.2895	0.2648	0.3026	0.3428

检验之后, 指标体系权重汇总如表4所示。

### 3.2.2 熵值法赋权

运用熵值法对我国炼油企业能源效率评价指标进行计算后结果如表5所示。

### 3.2.3 最优组合赋权

运用组合赋权法计算出组合权重系数:

$$\alpha_1 = \frac{\exp\left\{-\left[1 + \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j^c (1 - x_{ij}) / (1 - \theta)\right]\right\}}{\sum_{c=1}^s \exp\left\{-\left[1 + \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j^c (1 - x_{ij}) / (1 - \theta)\right]\right\}}$$

$$= \frac{1.019\ 92 \times 10^{-5}}{1.019\ 92 \times 10^{-5} + 0.667\ 19 \times 10^{-5}}$$

$$= 0.6045$$

表 4 我国炼油企业能源效率评价指标体系权重汇总 (层次分析法)

Table 4 Refineries energy efficiency evaluation index system weight summary (AHP)

准则层	权重	元素层次	综合权重
能耗结构指标 (A)	0.13	水占能源消耗量的比重 (A <sub>1</sub> )	0.0182
		电力占能源消耗量的比重 (A <sub>2</sub> )	0.0494
		蒸汽占能源消耗量的比重 (A <sub>3</sub> )	0.0078
		石油制品占能源消耗量的比重 (A <sub>4</sub> )	0.0546
能源技术效率指标 (B)	0.36	单因能耗 (B <sub>1</sub> )	0.1584
		能量密度指数 (B <sub>2</sub> )	0.0612
		能源产品加工转换率 (B <sub>3</sub> )	0.1404
能源利用经济指标 (C)	0.28	单位能耗利税额 (C <sub>1</sub> )	0.1512
		单位工业增加值用能费用 (C <sub>2</sub> )	0.0840
		能源消费弹性系数 (C <sub>3</sub> )	0.0448
能源环境效率指标 (D)	0.23	年平均节能率 (D <sub>1</sub> )	0.0897
		单位能耗 CO <sub>2</sub> 排放量 (D <sub>2</sub> )	0.1012
		工业用水重复利用率 (D <sub>3</sub> )	0.0391

表 5 炼油企业能源效率评价指标体系权重汇总 (熵值法)

Table 5 Refineries energy efficiency evaluation index system weight summary (the entropy method)

准则层	权重	元素层次	综合权重
能耗结构指标 (A)	0.4654	水占能源消耗量的比重 (A <sub>1</sub> )	0.0889
		电力占能源消耗量的比重 (A <sub>2</sub> )	0.0889
		蒸汽占能源消耗量的比重 (A <sub>3</sub> )	0.1695
		石油制品占能源消耗量的比重 (A <sub>4</sub> )	0.1182
能源技术效率指标 (B)	0.0779	单因能耗 (B <sub>1</sub> )	0.0339
		能量密度指数 (B <sub>2</sub> )	0.0291
		能源产品加工转换率 (B <sub>3</sub> )	0.0148
能源利用经济指标 (C)	0.3337	单位能耗利税额 (C <sub>1</sub> )	0.1272
		单位工业增加值用能费用 (C <sub>2</sub> )	0.1276
		能源消费弹性系数 (C <sub>3</sub> )	0.0789
能源环境效率指标 (D)	0.1230	年平均节能率 (D <sub>1</sub> )	0.0772
		单位能耗 CO <sub>2</sub> 排放量 (D <sub>2</sub> )	0.0342
		工业用水重复利用率 (D <sub>3</sub> )	0.0117

$$\alpha_2 = \frac{\exp\left\{-\left[1 + \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j^c (1 - x_{ij}) / (1 - \theta)\right]\right\}}{\sum_{c=1}^s \exp\left\{-\left[1 + \theta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j^c (1 - x_{ij}) / (1 - \theta)\right]\right\}}$$

$$= \frac{0.66719 \times 10^{-5}}{1.01992 \times 10^{-5} + 0.66719 \times 10^{-5}}$$

$$= 0.3955$$

最优组合赋权后, 炼油企业能源效率评价指标体系中各指标的权重如表 6 所示。

### 3.3 炼油企业能源利用效率评价

#### 3.3.1 评价结果

依据灰色关联 TOPSIS 方法的步骤, 首先对 8 家炼油企业生产数据的预处理结果和对炼油企业能源效率

评价指标体系的权重计算进行加权标准化矩阵的计算。

(1)由预处理8家企业评级指标数据和表6计算出加权标准化矩阵,如图2。

(2)计算“正理想方案”和“负理想方案”分别为:

$$Y_0^+ = (0.0259, 0.0350, 0.0503, 0.0543, 0.0491, 0.0230, 0.0380, 0.1006, 0.0602, 0.0231, 0.0528, 0.0123)$$

$$Y_0^- = (0.0061, 0.0061, 0.0154, 0.0199, 0.0107, 0.0238, 0.0118, 0.0086, 0.0088, 0.0160, 0.0133, 0.0078)$$

(3)计算各炼厂与“正理想方案”和“负理想方案”的欧氏距离:

$$S_i^+ = (0.0267, 0.0220, 0.0440, 0.0196, 0.0276, 0.0371, 0.0291, 0.0314)$$

$$S_i^+ = (0.0239, 0.0388, 0.0086, 0.0354, 0.0226, 0.0141, 0.0200, 0.0221)$$

(4)计算各炼厂与“正理想方案”和“负理想方案”的灰色关联度,其中分辨系数取值0.5。

$$T_i^+ = (0.5808, 0.8548, 0.7172, 0.7811, 0.8909, 0.8303, 0.6314, 0.8587)$$

$$T_i^- = (0.5984, 0.7681, 0.8515, 0.8115, 0.7818, 0.7761, 0.6647, 0.7609)$$

(5)计算各个方案与理想方案的相对贴近度,在计算过程中,默认 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$ ,即假设两关联度重要性相同。

$$\eta_i = (0.4917, 0.5307, 0.4477, 0.4956, 0.5302, 0.5094, 0.4824, 0.5263)$$

由计算结果可知b炼厂与最优方案最为贴近,即

表6 炼油企业能源效率评价指标体系权重(最优组合法)

Table 6 Refinery enterprise energy efficiency evaluation index system weight (optimal combination of law)

准则层	权重	元素层次	综合权重
能耗结构指标(A)	0.2583	水占能源消耗量的比重(A <sub>1</sub> )	0.0462
		电力占能源消耗量的比重(A <sub>2</sub> )	0.0605
		蒸汽占能源消耗量的比重(A <sub>3</sub> )	0.0718
		石油制品占能源消耗量的比重(A <sub>4</sub> )	0.0798
能源技术效率指标(B)	0.2454	单因能耗(B <sub>1</sub> )	0.1062
		能量密度指数(B <sub>2</sub> )	0.0485
		能源产品加工转换率(B <sub>3</sub> )	0.0907
能源利用经济指标(C)	0.3273	单位能耗利税额(C <sub>1</sub> )	0.1678
		单位工业增加值用能费用(C <sub>2</sub> )	0.1012
		能源消费弹性系数(C <sub>3</sub> )	0.0583
能源环境效率指标(D)	0.1690	年平均节能率(D <sub>1</sub> )	0.0648
		单位能耗CO <sub>2</sub> 排放量(D <sub>2</sub> )	0.0747
		工业用水重复利用率(D <sub>3</sub> )	0.0295

$$Y = \begin{bmatrix} 0.0063 & 0.0215 & 0.0245 & 0.0543 & 0.0358 & 0.0220 & 0.0356 & 0.0446 & 0.0332 & 0.0104 & 0.0528 & 0.0241 & 0.0120 \\ 0.0204 & 0.0319 & 0.0039 & 0.0184 & 0.0491 & 0.0107 & 0.0368 & 0.1006 & 0.0309 & 0.0166 & 0.0160 & 0.0133 & 0.0105 \\ 0.0061 & 0.0061 & 0.0302 & 0.0201 & 0.0326 & 0.0122 & 0.0271 & 0.0118 & 0.0086 & 0.0140 & 0.0197 & 0.0133 & 0.0105 \\ 0.0137 & 0.0112 & 0.0110 & 0.0163 & 0.0478 & 0.0230 & 0.0377 & 0.0818 & 0.0602 & 0.0303 & 0.0264 & 0.0348 & 0.0122 \\ 0.0148 & 0.0223 & 0.0132 & 0.0154 & 0.0262 & 0.0152 & 0.0247 & 0.0562 & 0.0397 & 0.0321 & 0.0205 & 0.0324 & 0.0085 \\ 0.0229 & 0.0186 & 0.0164 & 0.0155 & 0.0453 & 0.0162 & 0.0380 & 0.0318 & 0.0095 & 0.0191 & 0.0184 & 0.0166 & 0.0078 \\ 0.0064 & 0.0350 & 0.0230 & 0.0406 & 0.0419 & 0.0196 & 0.0289 & 0.0431 & 0.0289 & 0.0088 & 0.0251 & 0.0207 & 0.0089 \\ 0.0259 & 0.0226 & 0.0503 & 0.0168 & 0.0199 & 0.0141 & 0.0238 & 0.0347 & 0.0448 & 0.0206 & 0.0409 & 0.0309 & 0.0101 \end{bmatrix}$$

图2 加权标准化矩阵

Fig. 2 Weighted normalization matrix



能源效率最优。该评价结果也与b炼厂在现实当中的能源利用情况吻合。

### 3.3.2 模型有效性检验

灰色关联分析中涉及的分辨系数对评价结果产生的影响比较重大。因此,需要对该决策模型的有效性进行检验。

检验方法主要是通过改变分辨系数的值,观察在不同的分辨系数下,最优方案是否保持稳定。

当 $\rho=0.1$ 时,被评价方案与理想方案的相对贴近度为:

$$\eta_1 = (0.4655, 0.5695, 0.3629, 0.4753, \\ 0.05691, 0.5353, 0.4515, 0.5357)$$

当 $\rho=0.3$ 时,被评价方案与理想方案的相对贴近度为:

$$\eta_3 = (0.4885, 0.5250, 0.4356, 0.4887, \\ 0.5403, 0.05165, 0.4759, 0.5383)$$

当 $\rho=0.7$ 时,被评价方案与理想方案的相对贴近度为:

$$\eta_7 = (0.4940, 0.5250, 0.4583, 0.4987, \\ 0.5242, 0.5058, 0.4844, 0.5200)$$

当 $\rho=0.9$ 时,被评价方案与理想方案的相对贴近度为:

$$\eta_9 = (0.4952, 0.5123, 0.4648, 0.5004, \\ 0.5187, 0.5035, 0.4907, 0.5159)$$

由上述关于相对贴近度的计算结果可知,当分辨系数为0.1、0.3、0.5、0.7和0.9时,最优方案均为b炼厂,即b炼厂的能源利用效率最优。b炼厂作为国内著名的石化企业,其原油的一次加工能力和二次加工能力均位居前沿,年加工能力均为1000万t。以自身拥有的77套生产装置为基础,其发展成为了年产汽油、煤油和柴油600万t以上的大型炼油企业。同时,依托强大的技术实力,该公司化工产品年生产能力可达184万t。b企业的能耗结构指标(水占能源消耗的比例、电占能源消耗的比例)、能源利用经济指标(单位能耗利税额)都明显高于其他七家企业。在分辨系数变化的情况下,模型运算结果没有改变,表明各主要因素的变化对模型运算结果没有影响,模型可靠,方法有效。

## 4 我国炼油企业提高能源效率的建议

炼油企业能源利用效率研究的诸多文献均着眼于

整体,以整体能源利用效率的提升为主要目标,其建议多涉及炼油行业的国家政策主导、炼油行业的整体规模提升、炼油行业的技术进步。但是从个体角度来看,着眼于炼油企业长足发展的能源利用效率提升的研究并不充足。因此,本文以企业管理的视角,通过进行炼油企业能源利用效率评价指标体系的设计,对我国炼油企业能源利用情况的改善提出相应的建议。

### 4.1 调整能源消耗结构

通过上述评价结果可知,在炼油企业能源效率评价指标体系中,有关能耗结构的权重合计约占24%,其中以蒸汽和石油制品等化石能源的消耗比重指标各约7%。石油制品的消耗对能源效率的影响更多的体现在负向产出端,二氧化碳的超量排放与此相关。

从投入的角度来讲,为获得更高的能源利用效率需要以相对较少的投入获得同样的产出。从产出角度来讲,为获得更高的能源利用效率需要以同等的能源获得更“少”的非期望产出。因此,能耗结构调整的主要目标即是寻找高效、清洁的替代能源。

### 4.2 规划炼油装置联合利用能源

在能源利用效率评价指标体系中,单位能耗利税和单位工业增加值用能费用的权重分别为16%、10%。由灰色关联TOPSIS法计算过程可知,权重是评价开展的基础。这两项指标改善的关键在于“开源节流”。

诸多有关炼油企业能源利用效率提升对策的文献中均对国外炼厂低温余热回收利用技术有所提及。低温余热的回收利用需要对炼油装置的联合利用情况进行调整。而提高炼油企业能源利用效率的关键就在规划炼油装置。炼厂常规装置的低温余热留存及利用主要有以下几种情况:

(1)常减压装置。中间产品通过换热过程后直接作为下游装置的热进料,其中间产品常见的有减压蜡油、渣油等。

(2)催化裂化装置。该装置回收低温热能的基本原理是将蕴藏着大量低温热能的中间产品与就近的气分装置进行热联合,常见的中间产品有轻柴油、稳定汽油、分馏塔顶循环油。

(3)延迟焦化装置。该装置低温热能主要来源于工艺过程,其基本原理是渣油在经过加热炉的加温后,在焦炭塔内生产高温油气和焦炭;之后高温油气和焦炭历经分离和冷却流程即生产了含有低温热能的油气

和热水。

(4) 炼油厂蒸汽。该部分低温热能属于潜在热能回收源, 炼厂蒸汽经过放热过程后产生的饱和凝结水包含一定的热量, 约为全部热量的 20%~30%, 该部分热能的回收利用有助于能源利用效率的大幅提升。

### 4.3 优化产品结构

经济效益和费用类指标在炼油企业能源效率评价颇为重要。石油行业动荡频繁, 炼油企业确保经济指标良好的唯一途径是优化产品结构, 调整高附加值产品的比重。炼油企业现在面临着原油资源劣质化、重质化和产品清洁标准严格化的矛盾, 并且由于整体经济形势的不景气, 炼油企业能源利用的经济效率受到影响。炼油企业能源利用经济效率的提升需要高附加值产品的支撑。

重质油的加工主要有两大类工艺路线: 加氢和脱碳。此两种工艺路线均着眼于生产氢碳比更高的产品。加氢处理装置的比重近年来增长迅速, 但是相较于国际平均水平, 我国炼油企业加氢装置处理能力占据炼厂整体处理能力的比重仍不到 40%。炼油厂的蜡油、渣油如果通过加氢处理, 那么其可用于加工高硫重质原油, 并且在加工的过程中, 三废排放量少, 产品硫含量低。现行经济形势下, 经过加氢处理用渣油生产的运输燃料具有相对较高的经济收益。

产品结构的优化从本质来讲是对炼油企业不同生产装置的协同调整, 通过合理的装置搭配、合理的工艺选择实现高附加值产品的生产。

### 4.4 二氧化碳捕获和循环利用

二氧化碳的排放属于工业生产过程中不可避免的环节。在炼油企业能源利用效率评价指标体系中, 二氧化碳的排放是一个负向指标, 其属于典型的非期望产出。单位能耗二氧化碳指标排放指标的“改善”有赖于投入方向能源的清洁化, 同时也可以从产出方向寻找解决方案。二氧化碳的再利用可直接作用于负向指标的改善, 也可作用于正向经济效益指标的提升。

在环境规制日趋严格的今天, 炼油企业能源利用

效率的提升需要高度重视二氧化碳的减排和循环利用。二氧化碳的捕获路线主要有三类, 适合于合成气的燃烧前捕获, 适用于稀释烟道气的燃烧后捕获, 适用于高浓度二氧化碳烟气的富氧燃烧。

二氧化碳捕获的最终目的实现二氧化碳的“增值”。有关二氧化碳的应用, 比较成熟的是二氧化碳驱油。随着我国石油资源的开采难度日益增大, 二次采油、三次采油、低渗油藏对于驱油剂的需求也将日益增加。炼油厂烟道气中的二氧化碳经过分离回收后可以用于低渗透油藏驱油。利用二氧化碳驱油不仅可以提高油气资源的采收效率, 同时又可以实现二氧化碳的减排。

炼油企业能源利用效率的提升是一项系统工程, 单独的能源消耗结构的调整或是单方面技术投入的增加可能不会带来能源利用效率的改善, 同时消费能源类别的改变也会引起相应工艺流程或者操作设备的变更。因此, 提高我国炼油企业的能源利用效率需要多措并举、多方向努力。

## 5 结论

本文梳理了能源效率评价的理论与方法, 深入的探讨了我国炼油企业能源利用效率的影响因素, 包括技术、经济、管理和社会效益等。建立了以炼油企业能源效率影响因素为内涵的能源效率评价指标体系。从能耗结构、能源技术效率、能源利用经济效率、能源环境效率等 4 个方面入手, 选取了 13 项具体指标组成评价指标体系。指标体系的确定进一步明确了炼油企业能源利用与多方面产出的关系, 综合考虑了炼油企业能源消耗的正向产出和负向产出。并选取了 8 家具有代表性的炼油企业进行能源效率评价体系的实例验证, 验证结果表明本文所采用的方法准确有效, 模型运行可靠。基于指标体系所包含的能耗结构指标、能源技术效率指标、能源利用经济效率指标和能源利用环境效率指标, 本文提出了调整能源消费机构、优化原料和产品结构、规划炼油装置联合利用能源、二氧化碳捕获和循环利用 4 个方面的能源利用效率提升建议。

## 参考文献

- [1] 孙贤胜, 钱兴坤, 姜雪峰. 2015 年国内外油气行业发展报告 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2016. 168-175. [SUN X S, QIAN X K, JIANG X F. Domestic and international oil and gas industry in 2015 development report [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016. 168-175]

- [2] ANG B W. Monitoring changes in economy-wide energy efficiency :From energy-GDP ratio to composite efficiency index[J]. Energy Policy, 2006 (34): 574-582.
- [3] 吴琦, 武春友. 基于DEA的能源效率评价模型研究[J]. 管理科学, 2009, 01: 103-112. [WU Q, WU C Y. Energy efficiency evaluation model based on DEA [J]. Management Science, 2009, 01: 103-112.]
- [4] 陈由旺, 穆剑, 马建国, 等. 油气田能源效率指标体系及评价模型的研究[J]. 石油规划设计, 2008, 03: 1-4+7+48. [CHEN Y Y, MU J, MA J G, et al. Research on energy efficiency index system and evaluation model of oil and gas field [J]. Petroleum Planning and Design, 2008, 03: 1-4 + 7 + 48.]
- [5] 朱彤. 我国石化工业能源效率与节能潜力[J]. 经济管理, 2010, 10: 27-35. [ZHU T. Energy efficiency and energy saving potential of China's petrochemical industry [J]. Economic Management, 2010, 10: 27-35.]
- [6] 中国石油和化学工业联合会产业发展部. 化解产能过剩矛盾专题研究报告① 炼油: 产能快增, 监管须跟上[J]. 中国石油和化工, 2014, 02: 22-26. [China Petroleum and Chemical Industry Federation of Industry Development Department. To resolve the overcapacity contradictions special report ① Refining: rapid increase in production capacity, regulation must be followed [J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2014 (02): 22-26.]
- [7] 师傅, 沈坤荣. 政府干预、经济集聚与能源效率[J]. 管理世界, 2013, 10: 6-18+187. [SHI B, SHEN K R. Government intervention, economic agglomeration and energy efficiency [J]. Management World, 2013, 10: 6-18 + 187]
- [8] 严菲, 谭忠富. 基于DEA方法的全要素能源效率分析[J]. 华东电力, 2009, 09: 1568-1571. [YAN F, TAN Z F. Total factor energy efficiency analysis based on DEA method [J]. East China Electric Power, 2009, 09: 1568-1571.]
- [9] 钱伟民, 汤建光. 能源使用效率与中国能源价格市场化[J]. 经济问题探索, 2009, 10: 76-80. [QIAN W M, TANG J G. Energy efficiency and marketization of China's energy prices [J]. Economic Exploration, 2009, 10: 76-80.]
- [10] 薛静静, 沈镭, 刘立涛, 等. 中国区域能源利用效率与经济水平协调发展研究[J]. 资源科学, 2013, 04: 713-721. [XUE J J, SHEN L, LIU L T et al. Research on the coordinated development of energy efficiency and economic level in China [J]. Resources Science, 2013, 04: 713-721.]
- [11] 刁心柯, 唐安宝. 能源价格变动对能源效率影响研究[J]. 中国矿业, 2012, 06: 37-41. [DIAO X K, TANG A B. Study on the impact of energy price change on energy efficiency [J]. China Mining, 2012, 06: 37-41]
- [12] 李涛. 基于环境效应的中国区域全要素能源效率评价[J]. 山西财经大学学报, 2012, 06: 17-24. [LI T. Evaluation of total factor energy efficiency in China based on environmental effects [J]. Journal of Shanxi University of Finance and Economics, 2012, 06: 17-24.]
- [13] 李兰冰. 中国能源绩效的动态演化、地区差距与成因识别—基于一种新型全要素能源生产率变动指标[J]. 管理世界, 2015, 11: 40-52. [LI L B. Dynamic evolution of China's energy performance, regional disparity and origin recognition-based on a new indicator of total factor energy productivity changes [J]. Management World, 2015, 11: 40-52.]
- [14] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与TOPSIS法的光伏发电项目风险评价研究[J]. 电网技术, 2013, (06): 1514-1519. [LI Y B, YU X Y, WANG Z J. Study on risk assessment of photovoltaic power generation project using gray correlation and TOPSIS [J]. Power System Technology, 2013, (06): 1514-1519.]
- [15] 钱吴永, 党耀国, 熊萍萍, 等. 基于灰色关联定权的TOPSIS法及其应用[J]. 系统工程, 2009, (08): 124-126. [QIAN W Y, DANG Y G, XIONG P P et al. TOPSIS method based on gray relational weighting and its application [J]. Systems Engineering, 2009, (08): 124-126.]

---

## Research on energy efficiency evaluation of oil refining enterprises in China

SUN Wangmin, LIU Jianying, JIANG Hongdian, YANG Xiaoguang, LIU Pengge, SUN Renjin

*School of Business Administration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** How to improve the energy efficiency of refineries has become an urgent issue to be solved as demand for refined products increases. It is very important to improve the energy efficiency in order to promote the sustainable and coordinated development of the economy, energy and environment. Based on the analysis of the factors that influence the energy efficiency of oil refineries, this paper constructs an index system of energy efficiency evaluation of oil refineries, and uses the combination weighting method to determine the final weights of the indexes. Then, an energy efficiency evaluation method for refinery enterprises based on grey correlation technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) are established.

At the same time, using the production data of eight refineries, the efficiency evaluation system of the oil refinery is tested. The empirical results show that the index system can objectively and effectively reflect the energy efficiency of refineries, and can be widely used to evaluate the energy efficiency of refineries.

**Keywords** oil refining enterprise; energy efficiency evaluation; combination weighting; grey TOPSIS

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.01.012

(编辑 付娟娟)