

# 中国工业行业的生态效率

毛建素, 曾润, 杜艳春, 姜畔

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

**摘要:** 中国工业是资源消费和污染物排放的主要源头, 解析工业各行业的生态效率可为中国产业结构调整 and 整体环境质量改善提供必要信息. 在分析工业构成并构建工业系统与外部环境之间关系的基础上, 选择能源消费和废水、固体废物、SO<sub>2</sub>、工业烟尘、粉尘等污染物的排放量作为研究的环境影响类别, 界定了与这些环境影响相关的生态效率, 估算了中国 2007 年的工业生态效率现状, 结果为: 能源效率 615.5 万元 · ktce<sup>-1</sup>; 废水和固废方面的生态效率分别为 54.3 万元 · kt<sup>-1</sup> 和 1.9 万元 · t<sup>-1</sup>; 工业 SO<sub>2</sub>、烟尘和粉尘方面的生态效率分别为 59.6、169.2 和 184.6 万元 · t<sup>-1</sup>. 深入分析了 39 个工业部门的生态效率, 结果表明, 以上几种生态效率具有明显的行业不均衡性, 表现为不同行业在不同类型生态效率中的工业排序明显不同; 与此同时, 对于同一种生态效率, 不同工业行业的数值可相差几百倍到几万倍, 表明通过优化工业结构将具有较大的提高工业生态效率的可能性.

**关键词:** 结构调整; 环境影响; 节能; 环境排放物; 工业行业; 生态效率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2788-07

## Eco-efficiency of Industry Sectors for China

MAO Jian-su, ZENG Run, DU Yan-chun, JIANG Pan

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Industry is the main source of resource consumption and environmental emissions of China, and the analyzing of eco-efficiencies for industrial sectors may provide essential information for the restructure of industrial system and the improvement of environmental quality of China. The industry composition was analyzed and the relationship between the industry and its environment was established. The energy consumption and the main environmental emissions such as wastewater, solid waste, industry SO<sub>2</sub>, smog, dust were chosen as the environmental impact categories, the corresponding eco-efficiencies of industry were defined and estimated for China in 2007. The results are as follows: the energy efficiency is 615.5 × 10<sup>4</sup> yuan · ktce<sup>-1</sup>, the wastewater and solid waste related eco-efficiencies are 54.3 × 10<sup>4</sup> yuan · kt<sup>-1</sup> and 1.9 × 10<sup>4</sup> yuan · t<sup>-1</sup>, respectively; industry SO<sub>2</sub>, smog, dust related eco-efficiencies are 59.6 × 10<sup>4</sup>, 169.2 × 10<sup>4</sup> and 184.6 × 10<sup>4</sup> yuan · t<sup>-1</sup>, respectively. The eco-efficiencies of 39 industry sectors were analyzed extensively and the results showed that, the distribution of industrial sectors in above eco-efficiencies is uneven, and the order of industrial sector in industry will vary with industry sector and eco-efficiency category. Meanwhile, for the same category of eco-efficiency, the values for different industry sectors may change from centuplicate to several thousand folds, therefore a great possibility for the improvement of industry eco-efficiency is exist in the restructure of industry system.

**Key words:** restructure; environmental impacts; energy-saving; environmental emissions; industry sectors; eco-efficiency

近些年来, 资源与环境质量恶化已成为制约中国持续发展的瓶颈要素<sup>[1]</sup>, 中国正加大力度, 从多角度寻找措施, 以实现增效、节资、降污的目的<sup>[2,3]</sup>, 产业结构调整也因此成为实现这一目标的重要措施之一<sup>[4,5]</sup>. 但如何调整? 哪些行业应当淘汰或缩减, 哪些行业应当推崇或重点发展? 这些问题还没有明确的答案.

生态效率泛指单位环境负荷下的社会服务量<sup>[6]</sup>, 改善生态效率意味着获得相同服务下产生较少的环境影响, 或相同的环境影响下可提供更多的社会服务. 因此, 改善生态效率已成为协调人类和环境关系的重要手段. 近年来, 不仅在解析生态效率基本规律<sup>[7]</sup>、评估工业产品性能<sup>[8]</sup>、调整产业结构<sup>[9]</sup>等方面取得重要进展, 而且还广泛用于典型行业、典型区域的产业系统环

境性能评估<sup>[10]</sup>、系统改进<sup>[11,12]</sup>、新设备启用<sup>[13]</sup>等实践中, 为推动产业系统生态进化发挥了重要作用<sup>[14,15]</sup>.

中国正处于工业化进程中, 在获得国民经济 43% 份额的同时, 工业还消费着 72% 的能源, 并排放着大量的环境废物、污染物<sup>[16]</sup>, 是中国能源消费和污染排放的主要源头. 然而, 针对各工业部门详细分析其生态效率的研究尚鲜见报道. 本文将生态效率这一概念引入工业系统, 构建工业及其各行业与外部环境之间的关系框架, 详细分析各行业的生态效率, 以期为中国工业行

收稿日期: 2010-01-25; 修订日期: 2010-03-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAC28B03); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07209-009)

作者简介: 毛建素 (1966 ~), 女, 博士, 副教授, 高级工程师, 主要研究方向为产业生态学、生态经济、城市生态规划与管理, E-mail: maojs@bnu.edu.cn

业调整提供必要信息和理论依据.

1 研究方法

1.1 系统组成

根据中国国民经济行业分类标准 GB/T 4754-2002,工业系统由 39 种行业部门构成,各部门名称及其本研究中采用的简写代码如表 1 所示.

1.2 工业系统与环境之间的关系框架

表 1 工业行业的名称及其代码  
Table 1 Names and codes for industry sectors

| 代码  | 行业名称              | 代码  | 行业名称               |
|-----|-------------------|-----|--------------------|
| CMW | 煤炭开采和洗选业          | MEM | 医药业                |
| PGX | 石油和天然气开采业         | CFM | 化学纤维业              |
| FMM | 黑色金属矿采选业          | RUM | 橡胶制品业              |
| NFM | 有色金属矿采选业          | PLM | 塑料制品业              |
| NOM | 非金属矿采选业           | NMM | 非金属矿物制品业           |
| OOM | 其他采矿业             | FMS | 黑色金属冶炼及压延加工业       |
| AFP | 农副食品加工业           | NFS | 有色金属冶炼及压延加工业       |
| FOM | 食品业               | MPM | 金属制品业              |
| BEM | 饮料业               | GMM | 通用设备制造业            |
| TOM | 烟草制品业             | SMM | 专用设备制造业            |
| TXM | 纺织业               | TRM | 交通运输设备制造业          |
| TWM | 纺织服装、鞋帽业          | EEM | 电气机械及器材业           |
| LFM | 皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业  | CEM | 通信设备、计算机及其他电子设备制造业 |
| WBP | 木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业 | ICM | 仪器仪表及文化、办公用机械制造业   |
| FNM | 家具制造业             | AOM | 工艺品及其他制造业          |
| PAM | 造纸及纸制品业           | WRD | 废弃资源和废旧材料回收加工业     |
| RMP | 印刷业和记录媒介的复制       | EHP | 电力、热力的生产和供应业       |
| ARM | 文教体育用品业           | GPS | 燃气生产和供应业           |
| FUP | 石油加工、炼焦及核燃料加工业    | WPS | 水的生产和供应业           |
| CMM | 化学原料及化学制品业        |     |                    |

在工业系统中,任何一个行业都将消耗物质资源和能源,并向社会提供特定的服务,与此同时,由于产业代谢作用,将向环境排放各种环境污染物质.本研究中选择能源消耗和主要环境污染物质,包括废水、固体废物未利用量(即固废产生量与固废综合利用量的差值)、废气(包括SO<sub>2</sub>、烟尘、粉尘)的排放量作为工业系统的主要环境负荷,选用工业增加值作为工业及其构成行业的服务量.不难推断,就整个工业系统而言,其所消耗的资源(或能源)、提供的社会服务和排放的环境污染物都是其构成工业行业的相应数值的总和.若采用符号  $E$  代表系统的能源投入量,单位是  $\text{tce} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $G$  代表系统向社会提供的服务,并以经济增加值表示,单位是  $\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $Q$  代表环境污染物排放量,单位是  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,则工业系统与外部环境之间的关系可表达为图 1.

图 1 中,下标  $i$  表示某一工业行业的编号,下标  $n$  表示工业系统中的行业总数,其中各参数之间存在如下关系:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

(1)

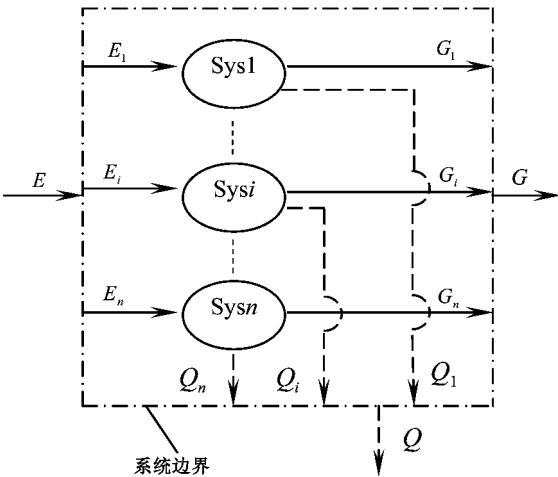


图 1 工业系统与其环境之间关系框架  
Fig. 1 Conceptual framework of the relationship between industrial system and its environment

$$G = \sum_{i=1}^n G_i$$

(2)

$$Q^j = \sum_{i=1}^n Q_i^j \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5)$$

(3)

式中,  $E$  表示能源消耗量,单位是  $\text{tce} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $G$  表

示经济增加值,单位是万元·a<sup>-1</sup>;Q表示污染物排放量,单位是t·a<sup>-1</sup>;角标*j*是环境污染物的种类,取1~5的整数,分别代表废水、固体废物、SO<sub>2</sub>、烟尘和粉尘5种环境污染物.

1.3 行业的生态效率

对于本研究中的系统框架(图1),当选择工业增加值作为系统的产出,选择能源消费量和环境污染物排放量作为系统的环境影响时,可分别定义相应的能源效率和环境效率.其中能源效率用符号*e*表示,单位是万元·tce<sup>-1</sup>,可表达为:

$$e = \frac{G}{E} \tag{4}$$

与污染物排放相关的环境效率用符号*q*表示,单位是万元·t<sup>-1</sup>污染物,可表达为:

$$q^j = \frac{G}{Q^j} \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5) \tag{5}$$

不难看出,能源效率或环境效率越高,意味着获得相同的产值所需要消耗的能源数量或所排放环境污染物数量越少.或者,也意味着,消耗相同数量的能源或排放相同数量的环境污染物,可以获得更高的经济产出量.

另外需要注意,生态效率是针对特定系统而言的概念.在图1框架下,可推导出作为工业系统与其构成的各工业行业的生态效率之间的关系,其能源效率和污染物相关环境效率可分别表达为:

$$e = \left[ \sum_{i=1}^n (f_{Gi} \cdot e_i^{-1}) \right]^{-1} \tag{6}$$

$$q^j = \left[ \sum_{i=1}^n (f_{Gi} \cdot q_i^{j-1}) \right]^{-1} \tag{7}$$

式中,*f<sub>Gi</sub>*是第*i*种行业对工业增加值的贡献率,且

$\sum f_{Gi} = 1$ . 由式(6)和(7)可见,整个工业系统的生态效率(包括能源效率和环境效率)与其经济构成、以及各行业的生态效率有关.为了提高整个工业系统的生态效率,既需要提高各行业的生态效率,又需要调整工业结构,提高具有较高生态效率的行业在工业中的经济份额.

值得注意的是,式(6)和(7)中只出现了*f<sub>Gi</sub>*,即经济构成,这是因为该模型框架中只选择了经济产出作为系统的服务量.如果选择其他服务,则将与所选服务类型的构成有关.

1.4 数据及来源

本研究主要涉及能源消费量、工业增加值和废水、固体废物、废气的排放数量等几种数据类别,其中固体废物采用固废产生量与固废综合利用量的差值来反映固体废物相关的环境负荷,而废气排放量则考虑了SO<sub>2</sub>、烟尘、粉尘3种大气污染物的排放.以上各类数据均来源于2008年中国统计年鉴<sup>[16]</sup>,为2007年的统计数据.

2 结果与讨论

2.1 工业增加值的行业构成

研究中首先估算了工业的经济构成,采用工业行业对工业增加值的贡献率表示,其结果按照从高到低的顺序表示,如图2所示.

由图2可见,各工业行业对工业增加值的贡献率均在10%以下,其中,黑色金属冶炼及压延加工业(代码FMS)和电力、热力的生产和供应业(代码EHP)2个行业对工业增加值的贡献率最高,但也不到8%.

2.2 工业及行业的生态效率

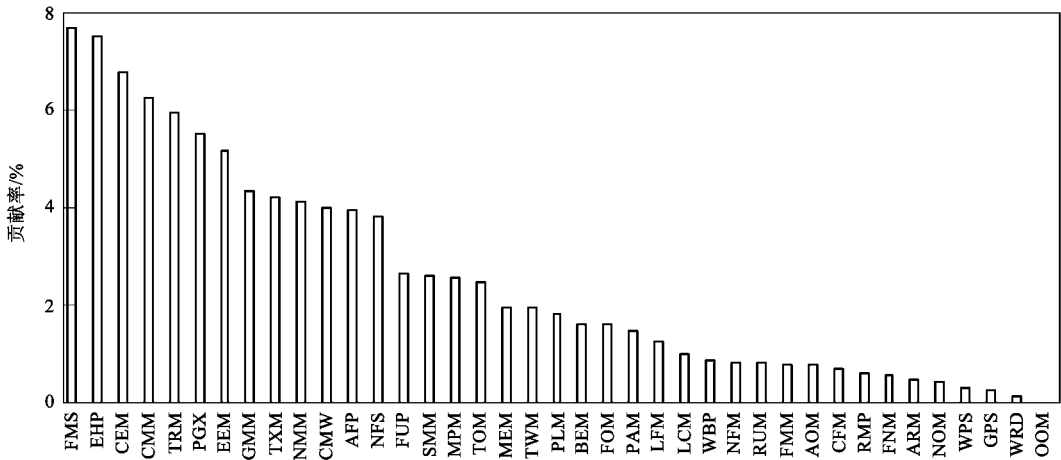


图2 工业行业对工业增加值的贡献率排序

Fig. 2 Contribution ratio to industry added value by industry sectors from highest to lowest

按照前文所述方法,计算得到 2007 年中国工业及其构成的各个行业的生态效率,其中作为整体而言的工业系统的生态效率数值见表 2。如前文所述,由于生态效率越高,意味着越有利

表 2 工业各类环境负荷相应的生态效率

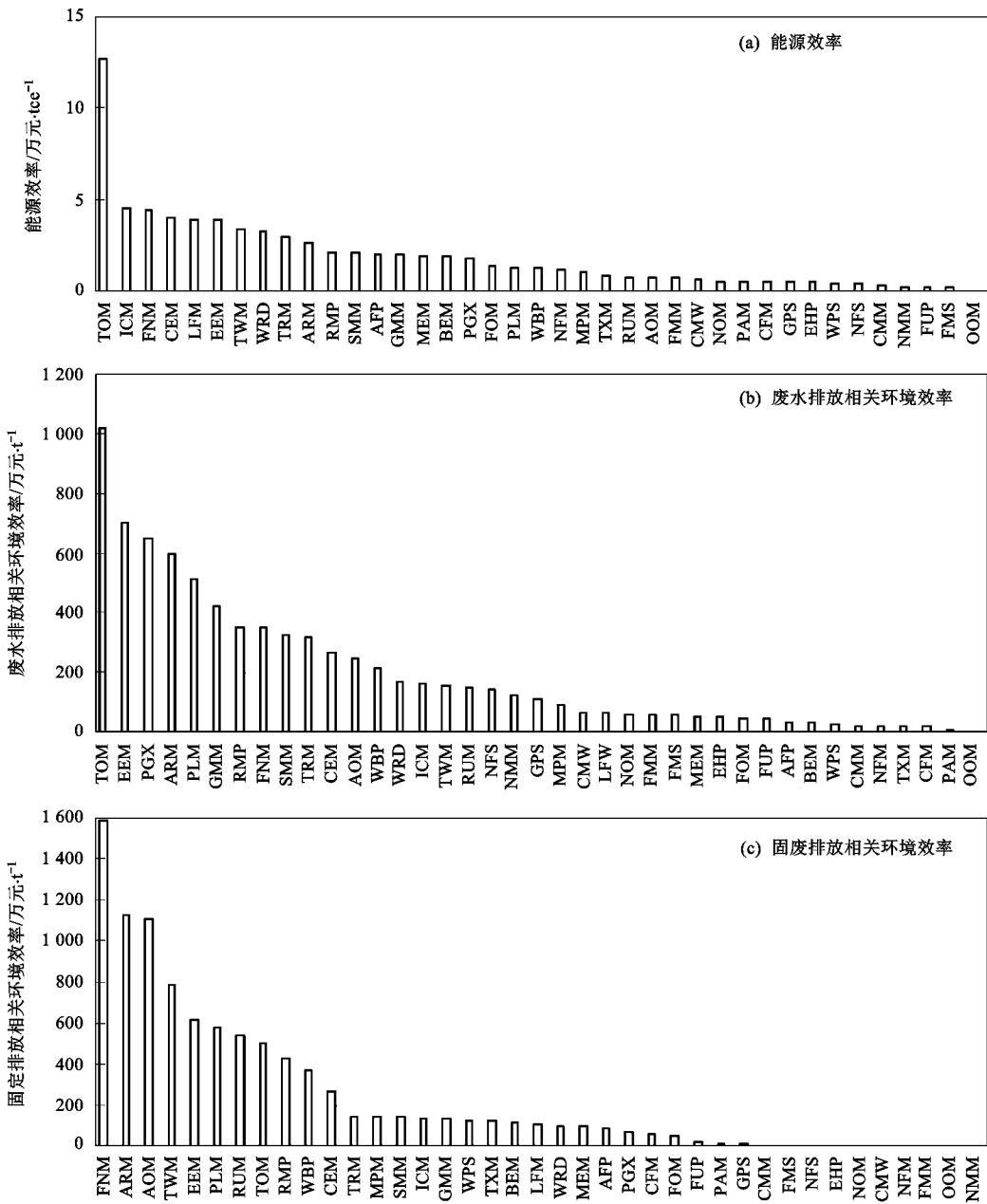
Table 2 Values of industry eco-efficiencies by environmental loads category

| 生态效率类别 | 能源效率<br>/万元·ktce <sup>-1</sup> | 废水相关效率<br>/万元·kt <sup>-1</sup> | 固废相关效率<br>/万元·t <sup>-1</sup> | SO <sub>2</sub> 相关效率<br>/万元·t <sup>-1</sup> | 烟尘相关效率<br>/万元·t <sup>-1</sup> | 粉尘相关效率<br>/万元·t <sup>-1</sup> |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 数值     | 615.5                          | 54.3                           | 1.9                           | 59.6                                        | 169.2                         | 184.6                         |

于节约资源、降低污染物排放,因此,适当加大具有较高生态效率的行业在工业中的份额,同时,缩减具有较低生态效率的行业在工业中的份额,将有利于整个工业生态效率的提高,进而获得节资降耗的收效.为此,各工业行业的生态效率在 39 个行业中的

位置,将是工业结构调整的重要依据.基于这一目的,将各工业行业在能源消费和废水、固废、SO<sub>2</sub>、烟尘、粉尘等污染物的排放方面的生态效率分别为按照从高到低排序的方式,汇总在图 3 中。

由图3(a)可见,烟草制品业(代码TOM)的能



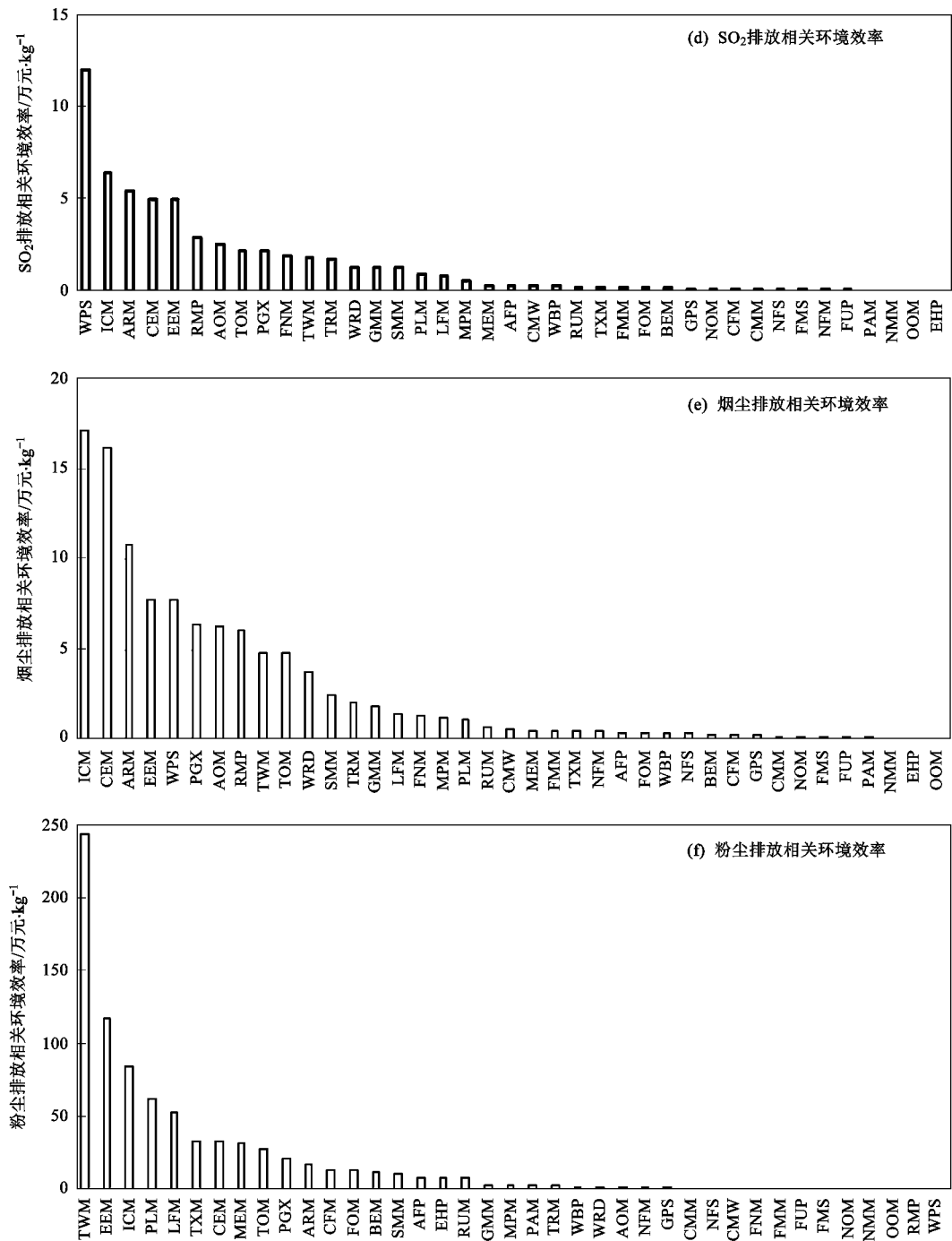


图 3 与各类环境负荷相关的工业行业生态效率排序

Fig. 3 Eco-efficiencies related to the selected environmental loads by industry sectors from highest to lowest

源效率最高,达到 12.7 万元 · tce<sup>-1</sup>,远高于其它工业行业的能源效率,是紧随其后的仪器仪表及文化、办公用机械制造业(代码 ICM)和家具制造业(代码 FNM)的能源效率的近 3 倍,高出工业能源效率近 20 倍,是能源效率最低工业行业其他采矿业(代码 OOM)的能源效率的 490 倍,因此成为带动工业能源效率提高的主导行业.与此同时,在废水排放方

面,由图 3(b)可见,烟草制品业(代码 TOM)的环境效率也高居首位,达到 1 万元 · t<sup>-1</sup>废水排放量,高出紧随其后的电气机械及器材制造业(代码 EEM)的环境效率约 50%,是工业废水排放相关环境效率的 18.7 倍,高出该类环境效率最低行业其他采矿业(代码 OOM)的 416 倍.

在固废排放方面,由图 3(c)可见,家具制造业

(代码 FNM)的固废排放相关环境效率最高,约高出紧随其后的文教体育用品业(代码 ARM)和工艺品及其他制造业(代码 AOM)的环境效率 40%,是工业固废排放环境效率的 837 倍,是相应环境效率最低的几个工业行业,如非金属矿物制品业(代码 NMM)、其他采矿业(代码 OOM)的 4 万余倍。

图 3(d)展示了工业行业 SO<sub>2</sub> 排放相关的环境效率,从中可见,水的生产和供应业(代码 WPS)的环境效率最高,达到 11.9 万元·kg<sup>-1</sup>排放,高出紧随其后的仪器仪表及文化、办公用机械制造业(代码 ICM)约 85%,是工业 SO<sub>2</sub> 排放相关环境效率的 200 倍,是最低环境效率行业电力、热力的生产和供应业(代码 EHP)的近千倍。

在烟尘排放方面,由图 3(e)可见,仪器仪表及文化、办公用机械制造业(代码 ICM)的环境效率最高,为 17 万元·kg<sup>-1</sup>烟尘排放,高出工业的烟尘相关环境效率近百倍,是烟尘相关环境效率最低行业其他采矿业(代码 OOM)的 570 多倍。

在粉尘排放方面,由图 3(f)可见,纺织服装、鞋帽业(代码 TWM)的环境效率最高,并高达 243 万元·kg<sup>-1</sup>粉尘排放,是紧随其后的电气机械及器材业(代码 EEM)的粉尘排放相关环境效

率的 2.1 倍,超出工业的环境效率的 1 300 多倍,约是粉尘排放相关环境效率最低行业其他采矿业(代码 OOM)的环境效率的 25 000 倍。

2.3 行业生态效率的不均衡性

为了更清晰地看出不同工业行业在不同类型生态效率方面的排序差异,可考虑将各工业行业以上 6 种生态效率汇总在一张图中。但由于不同类别的生态效率具有不同的量纲,比如,能源效率的单位是万元·tce<sup>-1</sup>,而废水相关环境效率的单位是万元·t<sup>-1</sup>,因而不能直接将以上 6 种不同类别的生态效率数值描述在一张图中。为此,本研究采用对工业行业的生态水平进行估分的办法,步骤如下:首先按照工业行业的各种生态效率数值的大小排序进行赋值,考虑到共有 39 个行业,将具有生态效率最高值的行业设定为 19,依次降低,中间值为 0,最低值的行业为 -19。并将该赋值得分作为该行业在这一种生态效率的生态分值,见表 3 所示。表示能源消费方面,OOM 行业在中国 39 个行业的生态效率最低,其生态分值是 -19。而 PGX、NFM、FOM 这 3 个行业的生态分值分别为 3、-1 和 2,表示其能源效率居于 39 个行业的中间位置。其次,将赋值后的各工业行业的生态分值汇总到同一图中,见图 4。

表 3 若干工业行业的生态分值示例

| 行业代码 | CMW | PGX | FMM | NFM | NOM | OOM | AFP | FOM |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 能源消耗 | -15 | 3   | -6  | -1  | -8  | -19 | 7   | 2   |

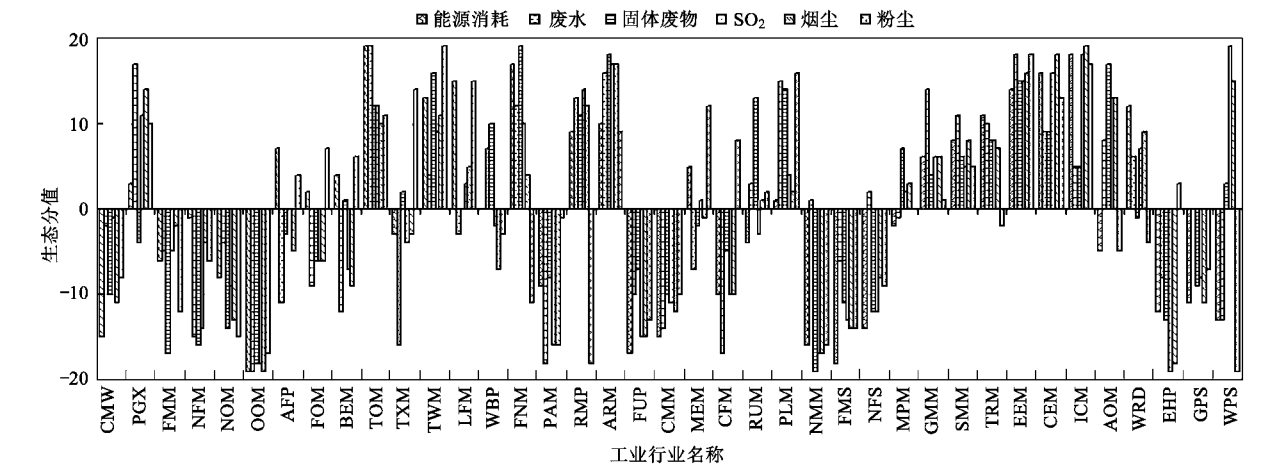


图 4 工业行业各类生态效率的生态分值

由图 4 可见,不同工业行业的生态效率分布呈现出明显的不均衡性,表现为同一工业行业,其不同类别的生态效率的生态分值截然不同,表明其在工业中的排序截然不同。如 BEM 行业,其在能源、废

水、固废、SO<sub>2</sub>、烟尘和粉尘方面的生态分值分别为 4、-12、1、-7、-9 和 6。这意味着,从能源、固废和粉尘角度看,该行业的生态效率相对较高,并均位于工业各行业的前 19 位,而在废水、SO<sub>2</sub> 和烟尘排

放方面,其生态效率相对较低,并位于工业行业的后19位。

## 2.4 数据的不确定性

尽管研究中数据均来源于中国统计年鉴,但仍然不可避免的存在着某些数据不尽人意的情况,比如统计中没有印刷业和记录媒介的复制业(代码RMP)和水的生产和供应业(代码WPS)这2个行业的粉尘排放数据,大概是这2个行业均不产生粉尘污染物,或者粉尘排放的数量很少因而可忽略不计。而非金属矿物制品业(代码NMM)的固体废物未利用量出现了负值,也就是其固体废物产生量大于固体废物的综合利用量,这大概是由于废物利用政策或技术条件的改变使往年未能利用的固废废物在研究年度得到了利用所致。

## 3 结论

(1)中国2007年工业生态效率为:能源效率 $615.5 \text{ 万元} \cdot \text{ktce}^{-1}$ ;废水和固废分别约为 $54.3 \text{ 万元} \cdot \text{kt}^{-1}$ 和 $1.9 \text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$ ;SO<sub>2</sub>、工业烟尘和粉尘方面分别约为59.6、169.2和184.6  $\text{万元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

(2)中国各工业行业在能源消费和废水、固体废物、SO<sub>2</sub>、烟尘、粉尘等污染物排放方面的生态效率的工业排序明显不同,表现为明显的行业不均衡性。

(3)对于同一种生态效率,不同工业行业的生态效率数值可相差几百倍到几万倍,其中行业生态效率的最高值可高出工业生态效率的几十倍到上千倍,由此推测,通过调整并优化工业行业结构将可提高工业的生态效率。

## 参考文献:

- [1] 韩保江. 六大瓶颈制约经济增长[J]. 人民论坛, 2006, **12B**: 16-17.
- [2] 刘江宜,余瑞祥. 建设资源节约型和环境友好型社会的挑战及途径[J]. 中国国土资源经济, 2009, **22**(2): 31-33.
- [3] 王维兴,荣光. 钢铁工业节能的思路和途径[J]. 中国钢铁业, 2007, **3**: 18-20.
- [4] 郭广涛,郭菊娥,席酉民,等. 西部产业结构调整节能降耗效应测算及其实现策略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, **18**(4): 44-49.
- [5] 王岳平. “十二五”时期我国产业结构调整战略与思路[J]. 中国经贸导刊, 2009, **21**: 18-20.
- [6] OECD Eco-efficiency [M]. Paris: OECD, 1998.
- [7] Mao J S, Lu Z W, Yang Z F. Eco-efficiency of lead in China's lead-acid battery system [J]. J Ind Ecol, 2006, **10**(1/2): 185-197.
- [8] Aoe T. Eco-efficiency and eco-design in electrical and electronic products [J]. J Clean Prod, 2007, **15**(15): 1406-1414.
- [9] Sharabaroff A, Boyd R, Chimeli A. The environmental and efficiency effects of restructuring on the electric power sector in the United States: An empirical analysis [J]. Energy Policy, 2009, **37**(11): 4884-4893.
- [10] Beér J M. High efficiency electric power generation: The environmental role[J]. Prog Eng Combust, 2007, **33**(2): 107-134.
- [11] Lora E E S, Salomon K R. Estimate of ecological efficiency for thermal power plants in Brazil[J]. Energ Convers Manage, 2005, **46**(7-8): 1293-1303.
- [12] De Castro-Villela I A, Silveira J L. Ecological efficiency in thermoelectric power plants[J]. Appl Therm Eng, 2007, **27**(5-6): 840-847.
- [13] Descamps C, Bouallou C, Kanniche M. Efficiency of an Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) power plant including CO<sub>2</sub> removal[J]. Energy, 2008, **33**(6): 874-881.
- [14] Korhonen J, Savolainen I, Ohlström M. Applications of the industrial ecology concept in a research project: Technology and Climate Change (CLIMTECH) Research in Finland[J]. J Clean Prod, 2004, **12**(8-10): 1087-1097.
- [15] Ashton W S. The structure, function, and evolution of a regional industrial ecosystem [J]. J Ind Ecol, 2009, **13**(2): 228-246.
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.