

Effect on SO₂ Emission Control in Chinese Industrial Sectors: Based on Fuzzy Clustering Analysis

Dapeng Liang¹, Chong Wu¹, Xinpeng Xing¹, Zhigang Wang¹

1. School of Management, Harbin Institute of Technology, HIT, Harbin, P.R.China

1. ldp740920@hotmail.com

Abstract: SO₂ emission reduction is the main objective in China's first-phase emission reduction plan. To realize this objective, it is crucial to boost energy efficiency of key industries and waste gas treatment capacity through industrial policies. In this paper, fuzzy clustering analysis is adopted to build up a clustering model applied to industrial emission reduction. In this model, thirty-nine industries in China are classified according to energy consumption, industrial added value, total capital and SO₂ emission so as to fix the "particular sector" on scale. And then they are reclassified according to energy intensity (EI) and clean level (CL) to fix the "particular sector" on energy efficiency and waste gas treatment. Based on the classification above, in this paper, China's industrial data are analyzed lengthwise from 2001 to 2007 to reflect the change of China's efficiency of energy consumption and waste gas treatment. As is analyzed, some heavy industries such as the electric power and steel industries are considered primary industries that seriously consume huge energy and emit waste gases. Thus, energy saving and emission reduction should be focused on in these industries. However, emission reduction is diverse among them, and in the process of rapid heavy industrialization, the efficiency of energy consumption and waste gas treatment in some industries like the electric power industry is lowering, which restricts the achievement of China's goal for emission reduction. In addition, the classification according to EI and CL indicates that the efficiency of the light industry is lower than that of the heavy industry. Therefore, the policy-makers should equally pay attention to energy saving and emission reduction in the light industry.

Keywords: fuzzy clustering analysis; emission reduction; industrial sector

减排政策与国有工业企业减排效果的实证研究 基于模糊分类方法

梁大鹏¹, 吴冲¹, 邢新朋¹, 王志刚¹

1. 哈尔滨工业大学管理学院单位, 哈尔滨, 中国, 150001

1. ldp0920@hit.ed.cn

摘要: 本文采用模糊聚类的方法, 根据国有企业的能源消耗量、工业增加值、总资产和 SO₂ 排放量指标数据对中国 39 个工业产业进行分类, 然后依据能源密度和清洁度程度两个指标进行第二次分类, 以此确定能源效率和废气处理的特征产业。在以上分类基础上, 对 2001 年至 2007 年国有企业数据进行纵向的分类比较, 来反映中国工业产业的能源使用效率和废气处理效率在这一时间区间内的变化。本文认为电力产业和钢铁产业等重工业是中国经济的支柱产业, 也是能源消耗和废气排放的最主要的产业, 因此节能减排的目标应集中在这样的产业。这些产业在节能减排效果方面的差别巨大, 而且在迅速重工业化过程中, 电力等产业的能源效率和废气处理效率在降低, 这都对中国的废气减排目标形成制约。除此之外, 多数轻工业的能源使用效率和废气处理效率低于重工业, 因此, 这些产业的节能减排工作应该得到政策制定者的更多关注。

关键词: 国有企业; 节能减排; 聚类分析

本课题得到国家自然科学基金(70941031)、教育部人文社会科学基金(09YJC790061)、黑龙江省自然科学基金(QC08C72)和哈尔滨工业大学创新基金(HIT.NSRIF.2008.59)的资助。

1 背景

节能减排已经成为中国政府最关注的问题之一, 在中国的“十一五”规划中明确提出了节能减排的目

标。目前中国的废气减排的第一阶段目标是减少二氧化硫、工业粉尘和烟尘的排放量。控制计划主要集中在工业产业部门。从政策执行方面看，对电力等重工业产业的关注程度最高，执行的力度越最大。

中国的空气污染主要来自于燃煤导致的污染物，主要的污染物包括 SO_2 、工业粉尘和工业烟尘^[1]。经过污染治理，目前工业烟尘和粉尘的排放已经大量减少。目前的空气污染中， SO_2 占到了 53% 以上，2005 年工业产生的废气是 166612.9Gm^3 ，其中 SO_2 为 25.49Mt ，烟尘为 11.83Mt ，粉尘为 9.11Mt 。85% 的 SO_2 、80% 的粉尘和 68% 的烟尘是来自于燃煤。

我国总的工业废气由 1998 年的 77807Gm^3 增加到 2005 年的 166613Gm^3 ，增长了 1.14 倍。但废气排放的增长速度是低于经济增长速度。 SO_2 减排的增长率从 2003 年开始，一直处于增长的状况，这同中国从 2003 年开始的重点加强对 SO_2 排放控制，并推出一系列旨在减少废气排放，尤其是 SO_2 排放的政策有关。这些政策对工业废气排放的控制起到了关键的作用。

本文作者曾经研究了我国工业产业的生产清洁度问题，得到中国减少废气排放所要重点控制的一些产业。指出了中国 39 个工业产业的能源密度和生产清洁度的差异，证明了这些特殊产业在控制废气排放上的群体特征。并依据这些特征，对中国在工业化进程中，轻工业和重工业对控制废气排放方面的差异进行了解释。本文沿着这样的研究主线，对中国工业产业进行更加深入细致的分类，明确具有显著特殊性的产业，并将这些产业作为控制 SO_2 排放的重点产业。

本文采用模糊聚类分析方法对中国 39 个工业产业进行分类。主要依据经济规模、能源消耗、经济效益和污染程度四个方面的指标，这些指标可以分为规模指标和效率指标两类。规模指标反映产业在规模上的差异，效率指标则反映能源消耗效率和废气处理效率方面差异。除了对横截面数据进行分类，还要通过纵向的分类比较，发现一段时间区间内产业特殊性的变化情况。通过这样的分析能够确定影响中国节能减排效果的重点产业，为政策制定者提供必要的依据。

本文第二部分确定聚类分析的数据和分类方法，并建立分类模型，为实证部分提供分析工具；第三部分，进行实证分析，对 39 个工业产业依据不同 6 个指标进行截面和时间段的数据分类，并针对分类结果进行分析；第四部分，提出研究结论和相应的政策建议。

2 产业模糊聚类分析数据及方法

2.1 数据来源

本文采用的数据分为两大类：一类是反映产业在整个经济中的地位的数据，本文称之为规模数据，是没有经过处理转换的绝对量指标，反映 39 个工业产业在整个工业部门中的基本状况。指标包括工业增加值、总资产、能源消费数量、 SO_2 排放量。数据来自《中国统计年鉴 1998-2006》。第二类是反映各产业能源利用效率和废气处理效率的指标，本文称之为效率指标。这一类数据是在规模数据基础上进行转换获得的比率型数据。包括 39 个工业产业的能源清洁度 (CL) 和能源密度 (EI) 指标。

能源消费的效率 and 废气处理效率是反映废气控制的最关键的指标。本文首先建立两个反映这两个效率的指标。我们用能源密度来反映能源消耗的效率，能源密度的计算公式为：

$$EI = \frac{ec}{ep}$$

其中，EI 是能源密度，ec 是能源消耗数量，ep 是经济产出数量。这个指标反映的是能源消费的效率，即单位经济产出的能源消耗数量。技术水平和结构调整被认为是中国能源密度下降的最关键因素^[2]。同时也有部分观点认为终端能源密度的下降部分来自于新能源的开发。我们使用工业增加值和能源消费数量来计算能源密度指标。

为反映废气处理效率，我们采用清洁水平指标：

$$CL = \frac{we}{ec}$$

其中，we 是废气排放数量，CL 是清洁水平。CL 代表能源消费过程中的清洁程度。CL 越高，能源消耗产生的废气数量越大。因为这个指标只和能源消耗和废气排放的物理数量相关，因此，这个指标能够反映废气处理的技术水平^[3]。

2.2 模糊聚类分析方法

聚类分析把一个没有类别标记的样本集按照某种准则划分成若干个类，使得在同一类的样本尽可能的相似，而在不同类的样本尽可能的不相似。目前的聚类分析方法分为硬聚类方法和模糊聚类方法。硬聚类方法是把每个待辨识的对象严格地划分到某个类中，具有非此即彼的性质，样本对各个子类的隶属度取 0 和 1 两种值，样本只能属于所有类别中的某一类别。传统的硬聚类方法大体上可分为启发式和划分式。启

发式方法将数据进行树状分类，常常给出数据集的几种可能的分类情况；划分式则将数据按照某种标准划分成单一的结果，包括目标函数法、密度估计法、图结构法和最近邻法^[4]。

硬聚类方法具有非此即彼的性质，因此这种分类的类别界限是分明的。而实际上大多数对象并没有严格的属性，它们在性态和类属方面存在着模糊性。1965年 Zadeh 教授提出的模糊理论，人们开始用模糊的方法来处理聚类问题，并称之为模糊聚类分析，它是聚类分析与模糊理论相结合的产物^[5]。模糊聚类方法中的分类结果仍然用样本对各类的隶属度来表示，只是这时样本对各某个类别的隶属度扩展到了整个[0,1]区间，样本对所有类别的隶属度之和是 1。

与硬聚类方法相比，模糊聚类方法提高了算法的寻优概率，所得的聚类结果明显地优于硬聚类方法。由于模糊聚类得到了样本属于各个类别的不确定性程度，表达了样本类属的模糊性，即建立起了样本对于类别的不确定性的描述，能更客观地反映现实情况，从而成为聚类分析研究的主流。

模糊划分的概念最早由 Ruspini 提出，随后人们在此基础上提出了多种聚类方法，比较典型的有：基于相似性关系和模糊关系的方法，基于模糊等价关系的传递闭包方法、基于模糊图论最大树方法，模糊聚类神经网络和基于先进的优化算法的聚类等方法^[6]。本文采用基于模糊等价关系的模糊聚类方法。

3 分类计算结果

3.1 分类的思路

本文的研究目标是通过聚类分析找到中国 39 个工业产业中，能源消费、废气排放和经济效益规模上具有相似性的产业群，在这样的产业群内分析产业在能源效率和生产清洁度上的差别。为了实现这样的研究目标，本文采取如下的方法：

(1)、根据 39 个工业产业的能源消耗总量、资产总量、工业增加值和 SO₂ 排放量作为规模指标进行模糊聚类，这样确定的产业群中的各产业在能源消耗、经济产出和效益以及废气排放规模是接近的。在分类过程中，通过 λ 代表截集变化，规模上具有特殊性的产业不断被“过滤”出来。本文把这些明显区别于其他产业的特殊产业称为“特征产业”，这些产业是制定政策是需要重点关注的。

(2)、根据能源清洁度和能源密度这两个效率指标

进行第二次分层，用这一个分层结果同第一次分层结果进行比较，根据对比结果找到规模和比率指标存在差异的产业。

(3)、时间序列的纵向比较，选择一时间区间内的两个时点，采用相同的方法进行分类，得到两个时点上的分类结果，再将分类结果进行比较。通过这样的比较确定哪些产业进入或者退出原来的特征产业群。

表 1.39 产业名称及产业代码

产业代码	产业名称	产业代码	产业名称
1	煤炭开采和洗选业	21	医药制造业
2	石油和天然气开采业	22	化学纤维制造业
3	黑色金属矿采选业	23	橡胶制品业
4	有色金属矿采选业	24	塑料制品业
5	非金属矿采选业	25	非金属矿物制品业
6	其他采矿业	26	黑色金属冶炼及压延加工业
7	农副食品加工业	27	有色金属冶炼及压延加工业
8	食品制造业	28	金属制品业
9	饮料制造业	29	通用设备制造业
10	烟草制品业	30	专用设备制造业
11	纺织业	31	交通运输设备制造业
12	纺织服装、鞋、帽制造业	32	电气机械及器材制造业
13	皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业	33	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
14	木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	34	仪器仪表及文化、办公用机械制造业
15	家具制造业	35	工艺品及其他制造业
16	造纸及纸制品业	36	废弃资源和废旧材料回收加工业
17	印刷业和记录媒介的复制	37	电力、热力的生产和供应业
18	文教体育用品制造业	38	燃气生产和供应业
19	石油加工、炼焦及核燃料加工业	39	水的生产和供应业
20	化学原料及化学制品制造业		

3.2 根据规模指标进行分类

根据能源消费、废气排放、工业增加值和总资产进行分类后，形成的产业群见表 2。表中的数字表示表 1 中产业代码。

表 2. 2007 年的规模指标分类结果

λ	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类	第 5 类	第 6 类	第 7 类	第 8 类	第 9 类	第 10 类
0.9	1	2	10	19	20	25	26	27	31	37
0.8	1, 31	2	10	19, 27	20	25	26	27	31	37

0.7	2	20	25	26	37
0.6	26	37			
0.3	37				

从分类结果上看，产业聚类随着 λ 增加而逐渐改变。当 $\lambda=0.3$ 时，只有电力产业同其他产业不同。这说明从生产规模、废气排放程度和经济效益来看，电力产业都是足够特别的产业。当 λ 在 0.4 到 0.6 之间时，黑色金属冶炼及压延加工业成为第二个特征产业，说明这一产业同电力产业的规模特性上最为接近。随着中国经济的发展，基础建设投资的快速增加推动了钢铁产业需求增加，推动了这一产业的快速发展。当 $\lambda=0.7$ 时，石油和天然气开采业、化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业成为特征产业。当 $\lambda=0.8$ 时，煤炭开采和洗选业、烟草制品业、石油加工、炼焦及核燃料加工业、有色金属冶炼及压延加工业和交通运输设备制造业成为特征产业。

按照规模指标分类的特征产业中，只有烟草制品业是轻工业。这说明中国经济增长、能源消耗和废气排放的重工业化特征非常明显。这些重工业产业的生产规模占到了整个中国工业产值的 73% 以上，能源消耗占到了 54% 以上，而废气排放占到了 81.4% 以上，在规模上具有绝对的优势，也是 SO_2 最主要的排放源。因此，为了控制能源消耗和废气增长，这些产业是关键的目标产业。如果对比这些产业的能源消耗和 SO_2 排放数据，可以看到这些产业的能源消费同 SO_2 排放之间具有明显的非一致性。这一现象的主要原因在于这些产业中的煤炭消耗数量比例远远高于其他产业。这些产业的煤炭消耗量为整个工业产业煤炭消耗量的 84.5%。能源结构不合理造成的废气排放过高在这些产业中体现得非常明显，因此，通过改变这些产业的用能结构来降低 SO_2 排放量是解决中国空气污染的重要手段。出于这样的考虑，在中国重工业中提高电能消耗比例，在发电行业采用清洁发电技术成为必然趋势。为了反映工业产业在规模上的变化，我们采用相同的方法对 2001 年中国 39 个工业产业进行了分类，分类结果见表 3。

表 3. 2001 年的规模指标分类结果

λ	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类	第 5 类	第 6 类	第 7 类	第 8 类	第 9 类
0.8	1	2	10	19	20	25	26	31	37

0.6	2	20	25	26	37
0.562350	26	37			
0.5	37				

结果显示，电力产业始终与其他产业在规模上存在明显的差距。 $\lambda=0.6$ 时，除了电力产业，2007 的特征产业只有黑色金属冶炼及压延加工业，而在 2001 年时，石油和天然气开采业、化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业也都是特征产业。这说明从 2001 年至 2007 年，电力产业与其他几个特征产业的发展速度间的差距在拉大。

计算 2001 年和 2007 年的电力产业同石油和天然气开采业、化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、煤炭开采和洗选业、石油加工炼焦及核燃料加工业、有色金属冶炼及压延加工业和交通运输设备制造业之间的相似统计量的值。2001 和 2007 年分别为 0.510581 和 0.523264，表明，这些产业同电力产业的距离在增加。产生这一现象的原因在于中国电力产业从 2001 年至 2007 年间经历了“快速扩张”的过程。尤其是从 2004 年至 2007 年，每周新建一座电站。迅速扩张虽使中国的电力供需矛盾得到缓解，但同时也造成电力行业的运营效率下降，环境问题更加突出。

3.3 根据效率指标进行分类

规模指标分类说明各产业之间在规模上的接近程度，显示中国工业产业的经济产出、能源消耗和废气排放规模上的重工业化特征。为了反映各产业在能源使用效率和 SO_2 处理效率上的差别，根据能源密度和清洁程度两个指标对 39 个工业产业进行第二次分类，得到结果如表 4。

表 4. 2007 年根据 EI 和 CL 的产业分类

λ	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类	第 5 类	第 6 类	第 7 类	第 8 类	第 9 类
0.987949	3,11,13, 20,23,26,38	4	5,7,10, 21,22,27	6	8, 25	9	14, 19	16	37
0.983348		4	6	8,25	9	16	37		
0.982595		4	6	9	16	37			
0.8		6	37						
0.7		6	37						

分类结果显示，电力产业在能源效率和清洁度方

面始终是最特殊的产业。我们能够看到，电力产业的能源密度并不是最高，但是清洁程度指标却是最高的产业。这说明中国的电力产业在用能效率方面并非最差，但是在废气处理技术方面最差。可见，中国的发电企业通过技术革新来提高废气处理能力的需要非常迫切。当 λ 达到 0.983348 时，按照规模指标进行分类时得到的特征企业还没有出现在特征产业群中。其他采矿业、有色金属矿采选业、饮料制造业、造纸及纸制品业、非金属矿物制品业、食品制造业成为特征产业。这些产业多数为轻工业。当 λ 达到 0.987949 时，特征产业群中，黑色金属采选业、黑色金属冶炼及延压加工业等重工业产业才成为特征产业，而那些规模指标分类的特征产业的特殊性并不明显。这说明，从产业的能源利用技术和废气处理技术上看，重工业的效果要优于轻工业。这是一个有趣的现象，这说明虽然中国空气污染程度的加重可以归因于重工业化程度的提高，但是重工业并非空气污染的唯一元凶，轻工业在废气处理技术和能源技术方面的相对落后也是重要的因素。而且随着中国轻工业的快速发展，急需要制定针对这些产业内的节能减排政策。

采用相同的分类方法，对 2001 年中国的工业产业依据 *EI* 和 *CL* 两个指标进行了分类，分类结果见表 5。

表 5. 2001 年根据 *EI* 和 *CL* 的产业分类

λ	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类	第 5 类	第 6 类
0.9	3,27	9	16	20,22	25	37
0.898502	9	16	20,22	25	37	
0.8	9	25	37			
0.6	25	37				

2001 年的特征产业依然以重工业为主，而且电力产业也是最特殊的产业。计算 2007 年和 2001 年的相似统计量，分别为 2.278898 和 2.942826。这说明从 2001 年到 2007 年间，电力产业在规模扩张的同时，用能效率和废气处理的相对效率在降低。作为最主要的规模产业，这样的变化是非常危险的。对政策制定者来说，这将导致一个两难的困境，即提高电力消耗的比例就会导致电力产业排放的 SO_2 进一步增加，从而使得能源结构调整控制废弃的目标难以实现。与电力产业相似的另一个产业是其他采矿业，但是这一产业不属于规模特征产业，对整个大气环境的影响远没有电力产业显著。但非金属矿采选业在 2007 年成为效率指标的

特征产业，这一产业中最重要的是水泥行业。而 2001 年至 2007 年，正是中国建筑业快速发展的时期，这说明在中国水泥产业快速发展的过程中节能减排的效率降低了。与这两个产业相反，化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业等产业的能源效率和废气处理效率都在 2001 至 2007 年间得到了提高，这说明中国针对这些产业的控制 SO_2 排放的政策是有效的。

4 结论及政策含义

本文对中国 39 个工业产业进行分类的结果显示，中国经济增长、能源消耗和废气排放的重工业化特征非常明显。重工业产业的生产规模、能源消耗及废气排在规模上具有绝对的优势。为了控制能源消耗和废气增长，这些产业应该是关键的目标产业。

在规模上，电力产业和钢铁产业是最为典型的产业，而且同其他产业之间的差别在进一步拉大，随着中国经济的发展，基础建设投资的快速增加，推动了这两个产业的快速发展。但从效率指标分类结果看，中国电力产业的能源密度和废气处理水平并不高，并从 2001 年到 2007 年呈现了进一步降低的趋势，主要由于中国电力产业从 2001 年至 2007 年间扩张程度超出了其他产业的速度。能源结构不合理造成的废气排放增加在规模特征产业中体现得非常明显，因此，通过改变这些产业的用能结构，尤其是提高电力消耗在产业中的比例，来降低 SO_2 排放量是解决中国空气污染的重要手段。电能消耗的增加会带来电力产业的废气排放数量增加，而且电力产业的效率低下会导致更严重的大气环境的污染。为了解决这样的困境，提高电力产业的燃烧技术水平和废气处理能力是关键。

重工业并非空气污染程度加重的唯一原因，轻工业在废气处理技术和能源技术方面的相对落后也是重要的因素。而且随着中国轻工业的快速发展，急需要制定针对这些产业内的节能减排政策。

References (参考文献)

- [1] Jonathan E. Sinton, David G. Fridley, What goes up: recent trends in China's energy consumption[J], Energy Policy 28 (2000): 671-687
- [2] Paul Crompton, Yanrui Wu, Energy consumption in China: past trends and future directions[J], Energy Economics 27 (2005): 195-208
- [3] Liang Dapeng, Zhou Yan. waste gas emission control and constraints of energy and economy in China[J], Energy Policy 36 (2008): 268-279
梁大鹏, 周燕. 中国废气排放控制与能源经济约束研究[J]. 能源政策. (2008): 268-279

- [4] Gao Xinbo. Fuzzy Clustering Theory and Application[M].Xi'an : Xidian University Press,2004.81-84
高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 81-84
- [5] Hirota K, Pedrycz W. Direction fuzzy clustering and its application to fuzzy modeling[J]. FSS, 1996:315-326
- [6] He Qing. Advance in Fuzzy Clustering Theory and Application [J], FUZZY SYSTEMS AND MATHEMATICS2(1998):89-94
何清. 模糊聚类分析理论与应用研究发展[J]. 模糊系统与数学. 2(1998): 89-94