

# Forecasts of Industrial Energy Consumption and Air Pollutant Emissions in Henan Province

Lulu Tian, Ke Wang, Lei Liu, Ruiqin Zhang\*

College of Chemistry and Molecular Engineering & Environmental Science Research Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou  
Email: lulu15838361280@163.com, \*rqzhang@zzu.edu.cn

Received: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2013; revised: Aug. 3<sup>rd</sup>, 2013; accepted: Aug. 9<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Lulu Tian et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In this paper, industrial energy consumption of Henan in 12<sup>th</sup> Five Years Plan was analyzed firstly and then the direct emissions of air pollutions caused by industrial energy consumption which included SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> were calculated. And on this basis, the industrial energy consumption and air pollution emissions of Henan in 12<sup>th</sup> Five Years Plan were forecasted by LEAP model and scenario analysis method, at last, the results were analyzed by using LMDI method. The study shows that Henan's energy consumption keeps growing and air pollutant emission decreases during 12<sup>th</sup> Five Years Plan, main driving factors resulting in emissions' change are the increase of the activity level and the decrease of the energy intensity and emission factors.

**Keywords:** Energy Consumption; Pollutant Emissions; LEAP Model; LMDI

## 河南省工业能源消费及大气污染物排放预测研究

田璐璐, 王克, 刘磊, 张瑞芹\*

郑州大学, 化学与分子工程学院&环境科学研究院, 郑州  
Email: lulu15838361280@163.com, \*rqzhang@zzu.edu.cn

收稿日期: 2013年7月22日; 修回日期: 2013年8月3日; 录用日期: 2013年8月9日

**摘要:** 本文首先对“十二五”期间河南省的工业能源消费情况进行分析, 进而估算其 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 等大气污染物的直接排放量, 并在此基础上, 采用 LEAP 模型和情景分析法对“十二五”期间河南省工业能源消费量与大气污染物的排放量进行了预测, 使用 LMDI 分解方法对预测结果进行分析。研究表明, “十二五”期间河南省的能源消费量仍保持增长, 而大气污染物排放量均有所下降; 影响排放变化的主要因素是活动水平的增长, 能源强度和排放因子的下降。

**关键词:** 能源消费; 污染物排放; LEAP 模型; LMDI

### 1. 引言

#### 1.1. 研究背景与意义

工业的发展离不开能源的支持。河南省的资源和能源比较丰富, 是全国的能源、原材料重要基地, 现阶段河南省处于工业化中前期, 重工业发展必然要消

\*通讯作者。

耗大量能源, 长期形成高耗能, 高污染的粗放型增长模式, 所以河南省既是生产大省, 也是消耗大省。然而, 能源消费必将导致污染物的排放, 大气污染的主要来源之一是工厂废气的排放, 工厂多分布在工业发达地区, 但是由于人类活动和地理位置的影响, 污染总体北方重于工业更为发达的南方。河南省属于中原地区, 中小企业众多, 大气自然环境扩散条件不好,

“十一五”末，大气污染状况位于全国前五位以内，属于污染非常严重的地区，“十二五”减排形势十分严峻，既要完成存量削减任务，又要消化掉污染物新增量，任务十分艰巨。

工业能源消费在河南省总能源消费中占了 80% 以上，了解工业能源消费现状，进而全面深入认识主要能源消费过程中大气污染物的排放特征，是开展能源环境管理和污染物排放控制等工作的重要基础。本文在参考了相关研究的基础上尝试对河南省工业各行业能源消费及其所引起的大气污染物直接排放情况进行统计，预测及分析。本文中所涉及的大气污染物排放均为工业部门由能源消费引起的大气污染物直接排放，下文不再进行特别说明。

## 1.2. 研究综述

能源是国民经济和工业发展必不可少的物质基础。长期以来，中国经济高速增长所引发的能源消耗问题受到了学者的广泛关注。姜磊，闫云凤曾对中国 29 个行业能源消费与工业增长的关系进行研究分析<sup>[1]</sup>；孔婷运用 1998~2007 年 30 个省市的年度数据，对中国 6 个区域的工业能源消耗强度及其影响因素进行了实证分析<sup>[2]</sup>；而陈军通过对中国煤炭、石油两类非可再生能源的消费在区域工业增长中的判别分析，探讨了区域工业化水平对能源消费水平的影响<sup>[3]</sup>；史丹则分析了我国经济快速增长条件下能源消费减缓的原因<sup>[4]</sup>。

而针对大气污染排放量的相关研究，主要是从区域，行业两个角度进行的。工业发达的地区，污染相对严重。长江三角洲地区是我国工业最发达的地区之一，当地的污染物排放研究也相对较多。吴晓路和翟一然分别建立了 2004 和 2008 年长江三角洲地区的大气污染物排放清单<sup>[5,6]</sup>。此外，葛维琦研究了山西省的污染现状和存在的主要问题，提出了控制现阶段山西大气环境的相应对策<sup>[7]</sup>。奚姗姗根据社会经济发展预测和分行业预测，得出“十二五”期间安徽省 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 新增排放量，并对各重点行业的减排潜力进行分析<sup>[8]</sup>。水泥，钢铁，电力等行业是污染物排放贡献率较大的几个行业。针对这些行业的污染物排放情况，国内也进行了研究。Yu Lei 根据现有的和未来可能的法规来预测未来至 2020 年的排放情况<sup>[9]</sup>。刘大钧介绍了我国钢铁企业排放 NO<sub>x</sub> 污染现状<sup>[10]</sup>。

在污染物排放的研究中，多采用能源环境模型对污染物的排放情况进行预测与分析。LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) 模型是由瑞典斯德哥尔摩环境研究所(Stockholm Environment Institute, SEI)和美国波士顿 Tellus 研究所联合开发的一个能源 - 环境 - 经济情景分析模型，是最常用的自底而上能源环境模型，张建民，殷继焕对 LEAP 进行了系统分析<sup>[11]</sup>，在上海市及北京市能源消耗及大气污染物排放也均得到应用<sup>[12,13]</sup>。

对污染物排放量变化的驱动因素分析中 LDMI 分解方法(Logarithmic mean Divisia index)较为常用，B. W. Ang 等人采用 LMDI 方法将一个国家或地区的污染物排放分解为活动水平、产业结构、能源强度、能源结构和排放因子五个方面<sup>[14]</sup>，牛晓耕则基于 LMDI 模型对能源消费碳排放影响因素进行了分析<sup>[15]</sup>。

## 1.3. 研究思路及方法

本文针对河南省工业各行业煤，石油，天然气三种能源消费活动水平数据，并根据能源消费量，排放因子及去除率对河南省工业各行业主要大气污染物的直接排放量进行估算，对其排放现状进行分析，并依据 2015 年规划指标和经济能耗趋势，采用情景分析法和 LEAP 模型对未来至 2015 年的能耗与大气污染物直接排放情况进行预测，并使用 LMDI 方法对研究结果进行分析。

LEAP 模型是以能源需求和环境影响为研究对象，根据能源需求情况及未来规划年内的社会经济发展趋势，设计出不同发展情景下的能源消费模式，从而对各部门的能源需求、消费及环境影响进行预测的一种模型。它可以用来预测不同驱动因素影响下，全社会中长期的能源供应与需求，并计算能源在流通和消费过程中的大气污染物和温室气体的排放量。本文以《河南省“十二五”节能减排综合性工作方案》<sup>[16]</sup>中的单位能耗规划值作为依据，采用能效对标的方式预测河南省工业行业的能源消费量，并根据相关燃料的排放因子与去除率计算大气污染物排放量。根据 LEAP 模型，得到污染物排放计算公式：

$$C = \sum_{ij} E_{ij} P_{ij} (1 - w_{ij}) \quad (1)$$

其中 C 为污染物直接排放量，E 为能源消费量，P 为排放因子，w 为去除率，i 为能源品种，j 为行业和主

要产品。

$$\begin{aligned} & \text{SO}_2\text{排放量} \\ & = \text{能源消费量} \times \text{含硫量} \times (1 - \text{去除率}) \times M_{\text{SO}_2} / M_s \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{NO}_x\text{排放量} = \text{能源消费量} \times \text{排放因子} \times (1 - \text{去除率}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & PM_{10}, PM_{2.5-10}\text{燃煤排放量} \\ & = \text{煤消费量} \times \text{排放因子} \times (1 - \text{去除率}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & PM_{10}\text{燃油/气排放量} \\ & = \text{石油/天然气消费量} \times \text{颗粒物排放因子} \times PM_{10}\text{比例} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & PM_{2.5}\text{燃油/气排放量} \\ & = \text{石油/天然气消费量} \times \text{颗粒物排放因子} \times PM_{2.5}\text{比例} \end{aligned} \quad (6)$$

情景分析法又称脚本法或者前景描述法，是假定某种现象或某种趋势将持续到未来的前提下，对预测对象可能出现的情况或引起的后果做出预测的方法。根据河南省“十二五”期间能源消费可能发生的趋势，分行业能源消费的预测采用情景分析方法，设置两种情景：冻结情景与节能情景，并在冻结情景的基础上设置大气污染物的冻结情景与减排情景，在节能情景基础上设置大气污染物排放的节能情景与执行情景。情景定义如表 1。

依据 LMDI 分解方法，对河南省工业污染物排放变化量  $\Delta C_{\text{tot}}$  从活动水平  $\Delta C_{\text{act}}$ ，产业结构  $\Delta C_{\text{str}}$ ，能源强度  $\Delta C_{\text{int}}$ ，能源结构  $\Delta C_{\text{mix}}$  和排放因子  $\Delta C_{\text{emf}}$  五个方面进行因素分解，计算公式如下：

$$\Delta C_{\text{tot}} = \Delta C_{\text{act}} + \Delta C_{\text{str}} + \Delta C_{\text{int}} + \Delta C_{\text{mix}} + \Delta C_{\text{emf}} \quad (7)$$

$$\Delta C_{\text{act}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln \left( \frac{Q^T}{Q^0} \right) \quad (8)$$

$$\Delta C_{\text{str}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln \left( \frac{S^T}{S^0} \right) \quad (9)$$

$$\Delta C_{\text{int}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln \left( \frac{I^T}{I^0} \right) \quad (10)$$

$$\Delta C_{\text{mix}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln \left( \frac{M^T}{M^0} \right) \quad (11)$$

$$\Delta C_{\text{emf}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln \left( \frac{U^T}{U^0} \right) \quad (12)$$

其中  $Q$  代表活动水平， $S$  代表产业结构， $I$  代表

Table 1. Definitions of scenarios  
表 1. 情景定义

能源消费	大气污染物	情景描述
冻结情景	冻结情景	能源利用效率不再增长，减排工作不再深入
	减排情景	能源利用效率不再增长，部分减排设备达先进水平
节能情景	节能情景	能源利用效率 2015 年达到规划指标，减排工作不再深入
	执行情景	能源利用效率 2015 年达到规划指标，部分减排设备达到先进水平

能源强度， $M$  代表能源结构， $U$  代表排放因子。

## 2. 河南省工业能源消费及大气污染物排放现状分析

### 2.1. 河南省工业能源消费现状

随着“十一五”期间河南省经济的高速发展，能源消费量也飞速增长，这主要是由于河南省目前正处于工业加速发展阶段，工业仍然是河南省经济发展的主要推动因素，工业能耗占总能耗的比重在 80% 左右。在工业中，高耗能产业又占据了较大比重，致使河南省的能耗增长速度高于全国平均水平。

根据《河南省统计年鉴 2011》<sup>[17]</sup> 统计，分行业能源消费及汇总结果如图 1 所示。

在工业能源消费结构中，煤炭是消费的主体，5 年来一直保持在 94% 左右，这主要是由河南省煤炭资源相对丰富，生产能力较强，同时石油资源相对贫乏以及国际市场上石油价格居高不下等因素所决定的。而分行业来看，电力行业占了河南省工业能源消费的较大比例，而电力行业的能源结构也是以煤为主的。

### 2.2. 河南省工业大气污染物排放估算

#### 2.2.1. 大气污染物排放因子来源

根据对河南省工业大气污染物排放量和相关文献的调研，本文所选用的排放因子(表 2)主要来源于河南省环境统计数据、相关文献研究结果、LEAP 模型缺省排放因子。

对于  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的去除率，本文根据《河南环境统计》(内部资料，由河南省环保厅提供)中各行业污染物排放量及去除量计算得到。由于《河南环境统计》中没有对烟尘的粒径的划分，故本文通过将河南省工业各行业的烟尘去除率与相关文献<sup>[18]</sup>中烟尘去除率

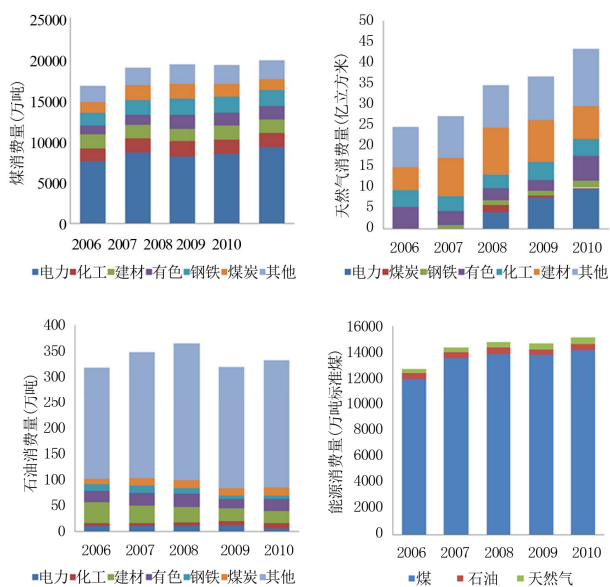


Figure 1. Energy consumption situation of Henan province  
图 1. 河南省能源消费情况

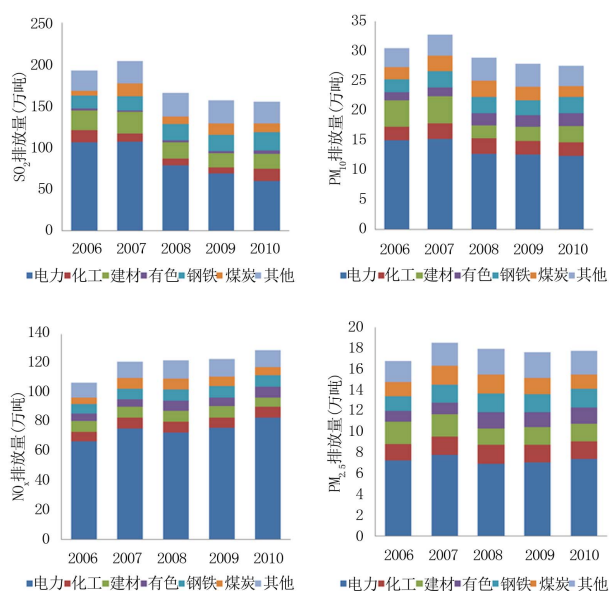


Figure 2. Sector's air pollutant emissions of Henan over the years  
图 2. 历年各行业污染物排放情况

Table 2. Air pollutant emission factors of varieties of fuels  
表 2. 分燃料品种污染物排放因子

污染物	煤	石油	天然气
NO <sub>x</sub>	电力	8.85 kg/t <sup>[6]</sup>	200 kg/TJ
	其他	4.05 kg/t <sup>[18]</sup>	150 kg/TJ
PM <sub>2.5-10</sub>	电力	34 kg/t <sup>[19]</sup>	
	其他	3.51 kg/t <sup>[19]</sup>	
PM <sub>2.5</sub>	电力	12 kg/t <sup>[19]</sup>	
	其他	1.89 kg/t <sup>[19]</sup>	
颗粒物排放因子 <sup>[5]</sup>		0.245 kg/t	0.00012 kg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub> 比例 <sup>[1]</sup>		86%	56%
PM <sub>2.5</sub> 比例 <sup>[1]</sup>		0	100%

注：未标来源的因子均来自 LEAP 模型。

进行对比，并通过推算得到河南省各行业 PM<sub>2.5-10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub> 去除率。

### 2.2.2. 大气污染物排放估算结果

根据所选用的排放因子，计算 2006~2010 年河南省工业能源消费引起的大气污染物直接排放结果如图 2 所示。

通过以上图表可知，电力行业各种污染物的排放比重都是最大的，这是由于电力行业能源消费所占比重较大，且河南省主要以煤为发电能源，因此，电力行业减排影响是最大的，也是减排工作的重点，污

染物去除率也相对其他行业较高。

就四种污染物来看，河南省工业部门 SO<sub>2</sub> 减排工作起步较早，“十一五”期间，进展也较好，排放量有所减少，颗粒物减排工作虽然也起步较早，但由于颗粒物减排设备对 PM<sub>10</sub> 减排效果优于 PM<sub>2.5</sub>，故 PM<sub>10</sub> 排放量明显降低，PM<sub>2.5</sub> 排放量却仍然继续增长，而 NO<sub>x</sub> 减排设备普及率较低，排放量持续增长。由此可见，河南省工业污染物排放形势仍然十分严峻。

## 3. 河南省工业能源消费及污染物排放预测

### 3.1. 能源消费预测

根据 1.3 中所述情景定义，依据单位产品能源消费量的规划，采用 LEAP 模型分别预测冻结情景和节能情景下河南省 2015 年的工业能源消费量，所得结果如表 3 与表 4 所示。

冻结情景和节能情景下 2015 年河南省的工业总能耗分别为 21378.90 万吨标准煤和 18152.35 万吨标准煤。冻结情景下，“十二五”期间煤，石油，天然气消费量及能源消费总量分别增长了 39.11%，49.21%，87.35%，41.1%，但是单位工业增加值能耗较 2010 年减少 5.93%，表明能源消费结构的调整对节约能源有一定影响；节能情景考虑了节能技术的进一步发展，能源消费增长速度相对较慢，煤，石油，天然气消费量及能源消费总量分别增长了 18.33%，

**Table 3. Sector's energy consumption forecasts in 2015**  
**表 3. 2015 年各行业能源消费预测**

情景	煤(10 <sup>4</sup> t)		石油(10 <sup>4</sup> t)		天然气(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	
	冻结	节能	冻结	节能	冻结	节能
电力	12895.90	11833.69	8.11	5.59	28.48	28.48
化工	2729.46	2156.71	16.92	12.03	3.99	3.79
建材	1974.15	1841.70	28.67	25.80	15.33	13.80
有色	2449.40	1995.80	27.27	20.82	9.05	6.91
钢铁	2243.19	1796.27	3.86	1.48	2.76	1.06
煤炭	1815.00	1079.72	27.90	12.38	0.34	0.15
其他	3454.25	2699.12	382.67	300.99	21.09	19.44

**Table 4. Summary of industrial energy consumption forecasts in 2015**

**表 4. 2015 年工业能源消费预测汇总**

	煤(10 <sup>4</sup> t)	石油(10 <sup>4</sup> t)	天然气(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	总计(10 <sup>4</sup> tce)
冻结情景	27561.36	495.40	81.04	21378.90
节能情景	23443.92	381.66	70.91	18152.35

14.95%，63.94%，19.8%，单位工业增加值能耗较 2010 年减少 20.12%，相对冻结情景，能源消费总量减少 15.09%。节能技术的不断引进与提高，将为缓解河南省工业能源压力发挥更加巨大的作用。总体来看，节能情景是符合河南省未来发展趋势的情景。

### 3.2. 大气污染物排放预测

根据 1.3 中所述的情景定义，结合 3.1 中工业能源消费的预测结果和“十二五”期间河南省工业大气污染物去除设备的普及率，分别预测四种情景下 2015 年河南省工业部门的 SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub> 直接排放量，如表 5 与表 6 所示。

由表 6 可见，在执行情景与减排情景下，2015 年河南省工业部门的 SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub> 排放量下降率可以达到《河南省“十二五”节能减排综合性工作方案》<sup>[16]</sup> 中的规划水平，而 PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub> 排放下降率可以达到国家《重点区域大气污染防治“十二五”规划》<sup>[20]</sup> 中河北省和山东省的下降水平。结合河南省目前污染物减排技术的普及率来看，由于当前河南省污染物减排技术尤其是 NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 减排技术普及率仍较低，短期内无法达到理想的污染物去除水平，因此可以认为执行情景中 SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub> 排放预测是最

**Table 5. Sector's air pollutant emissions forecasts in 2015**  
**表 5. 2015 年各行业污染物排放预测**

	单位	电力	化工	建材	有色	钢铁	煤炭	其他	
冻结情景	SO <sub>2</sub>	10 <sup>4</sup> t	83.77	22.42	22.4	6.18	25.32	13.22	40.56
	NO <sub>x</sub>	10 <sup>4</sup> t	115.26	11.39	9.05	10.63	9.21	7.3	18.11
	PM <sub>10</sub>	10 <sup>4</sup> t	17.32	3.51	3.33	3.19	3.15	2.47	5.15
	PM <sub>2.5</sub>	10 <sup>4</sup> t	10.29	2.58	2.06	2.33	2.18	1.74	3.47
节能情景	SO <sub>2</sub>	10 <sup>4</sup> t	76.87	17.71	20.89	5.04	20.23	7.86	32.17
	NO <sub>x</sub>	10 <sup>4</sup> t	105.87	9.03	8.41	8.63	7.3	4.31	14.37
	PM <sub>10</sub>	10 <sup>4</sup> t	15.9	2.77	3.1	2.6	2.52	1.47	4.09
	PM <sub>2.5</sub>	10 <sup>4</sup> t	9.44	2.04	1.92	1.9	1.74	1.04	2.76
减排情景	SO <sub>2</sub>	10 <sup>4</sup> t	59.32	8.86	18.2	3.25	22.58	10.86	38.15
	NO <sub>x</sub>	10 <sup>4</sup> t	75.04	8.78	6.97	8.19	7.13	7.3	14.1
	PM <sub>10</sub>	10 <sup>4</sup> t	14.31	2.25	1.78	2.1	2	1.62	3.18
	PM <sub>2.5</sub>	10 <sup>4</sup> t	9.5	1.48	1.09	1.33	1.21	0.98	1.94
执行情景	SO <sub>2</sub>	10 <sup>4</sup> t	54.43	7	16.97	2.65	18.04	6.14	29.81
	NO <sub>x</sub>	10 <sup>4</sup> t	68.93	6.96	6.48	6.64	5.65	3.45	11.15
	PM <sub>10</sub>	10 <sup>4</sup> t	13.13	1.77	1.66	1.71	1.6	0.96	2.49
	PM <sub>2.5</sub>	10 <sup>4</sup> t	8.72	1.17	1.01	1.09	0.97	0.58	1.52

**Table 6. Summary of industrial air pollutant emission forecast in 2015**

**表 6. 2015 年大气污染物排放预测汇总**

		冻结情景	节能情景	减排情景	执行情景
SO <sub>2</sub>	排放量(10 <sup>4</sup> t)	213.86	180.76	161.21	135.04
	10~15 年变化率	37.95%	16.60%	3.98%	-12.90%
NO <sub>x</sub>	排放量(10 <sup>4</sup> t)	180.96	157.91	127.53	109.27
	10~15 年变化率	40.19%	22.33%	-1.21%	15.35%
PM <sub>10</sub>	排放量(10 <sup>4</sup> t)	38.12	32.45	27.24	23.33
	10~15 年变化率	38.88%	18.22%	-0.78%	-15.01%
PM <sub>2.5</sub>	排放量(10 <sup>4</sup> t)	24.65	20.83	17.53	15.06
	10~15 年变化率	39.15%	17.60%	-1.05%	-15.01%

符合河南省“十二五”发展趋势的。

与节能情景和先进情景相比，冻结情景和减排情景中都未考虑节能技术在污染物排放中的作用，节能技术的应用使能源消费量有所降低，将直接导致污染物排放量的降低，节能情景 SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub> 排放量比冻结情景分别减少 15.48%，12.74%，14.88%，15.49%，执行情景比减排情景减少 16.23%，14.31%，

14.34%，14.10%。

减排情景和执行情景是在冻结情景和节能情景的基础上，考虑减排技术的使用，通过对工厂产生的污染物进行处理，减少污染物的排放。减排情景与冻结情景相比，SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub>排放量减少了24.62%，29.53%，28.56%，28.89%，而执行情景与节能情景相比，SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub>排放量也分别减少了25.29%，30.80%，28.11%，27.73%。

#### 4. 结果分析

采用LMDI方法对河南省工业大气污染物排放变化量进行因素分解，结果如图3所示。

污染物排放因素分解结果显示影响河南省工业部门大气污染物排放变化的五个重要因素中，活动水平对污染物排放起正向的拉动作用，且影响最为显著，2006~2010年期间对SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，PM<sub>10</sub>，PM<sub>2.5</sub>影响比例分别达-289.75%，337.39%，-597.67%，1181.90%，预计2010~2015年除SO<sub>2</sub>外，活动水平对其他三种污染物的影响均会减小，但仍将是影响最大的因素，影响比例分别为-297.04%，-243.29%，-246.22%，-246.98%。其他因素基本均起抑制作用(2006~2010年间NO<sub>x</sub>排放因子起拉动作用但影响极小)。

2006~2010年期间，SO<sub>2</sub>总排放量有所减少，能源强度与排放因子的抑制作用非常明显，分别占162.71%和169.37%，产业结构的优化也为其减排工作做出30.48%贡献，而能源结构的调整影响较小，仅占10.91%。由于这期间SO<sub>2</sub>的减排工作已有一定成效，预计2010~2015年期间总排放量减少幅度将会降低，但是能源强度与排放因子引起的SO<sub>2</sub>排放变化比例为148.98%和206.69%，产业结构与能源结构影响依旧较小，所占比例分别为30.48%和10.91%。

PM<sub>10</sub>与SO<sub>2</sub>排放量因素分解颇为相似，2006-2010年产业结构，能源强度，能源结构与排放因子占因素比例为-107.37%，329.73%，8.76%，251.80%；预计2010-2015年各因素所占比例为-246.22%，18.96%，116.11%，7.87%，203.27%。但两阶段变化有所不同，SO<sub>2</sub>产业结构与能源强度影响比重有所降低，能源结构与排放因子所占比重有所升高，而PM<sub>10</sub>所有因素影响比重都有所减少。

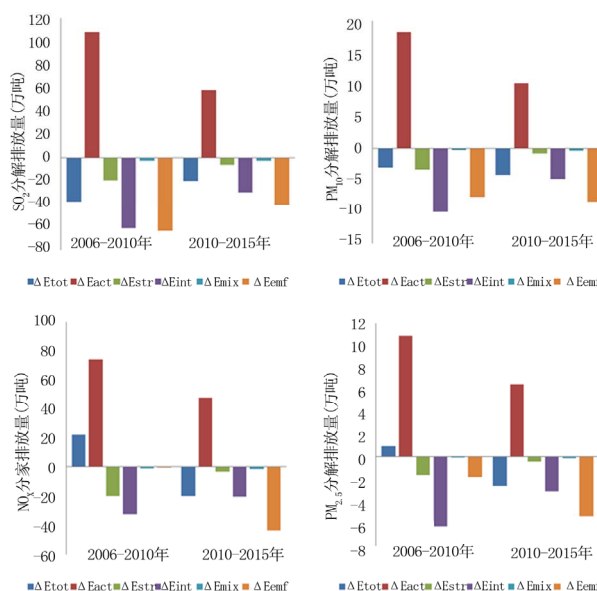


Figure 3. Factors decomposition of air pollutant emissions  
图3. 污染物排放因素分解图

NO<sub>x</sub>排放量在2006~2010年期间呈上升趋势，其中抑制排放量增长的主要因素是产业结构的优化与能源强度的减小，因素所占比例为-89%与-146.13%，能源结构与排放因子基本未起任何作用，影响比例仅占-3.72%与1.46%。预计2010~2015年期间，排放因子的影响比重显著增大，占218.83%，而能源强度影响比重降为101.98%，排放因子将成为NO<sub>x</sub>减排的最大贡献者，产业结构的优化影响比重明显减小为18.96%，能源结构的影响略有升高为7.87%。

PM<sub>2.5</sub>排放量在2006~2010年期间亦呈上升趋势，抑制其排放的主要因素为能源强度的减小，影响比重为679.59%，排放因子与产业结构的优化影响比重相当，分别占-182.43%和205.26%，能源结构的影响非常小，仅占-14.62%。预计2010~2015年期间排放总量亦有所下降，各影响因素影响比重也都有所下降，其中产业结构与能源强度影响下降最为明显，排放因子影响比重最大，产业结构与能源结构影响甚微。能源强度，能源结构与排放因子占因素比例分别为18.74%，117.81%，7.29%和203.14%。

综合以上分析可知，2006~2010年期间，节能技术对各污染物减排工作已有重要影响，且预计2010~2015年期间仍将发挥巨大的作用；而在2006~2010年期间，减排技术对SO<sub>2</sub>与PM<sub>10</sub>排放影响较大，PM<sub>2.5</sub>排放影响较小，对NO<sub>x</sub>排放基本不起任



何作用, 预计在 2010~2015 年期间, 减排技术的推广和普及将是大气污染物减排工作的关键所在。

## 5. 结论

根据 LEAP 模型预测结果, 能源消费节能情景与大气污染物排放执行情景是最符合河南省未来发展趋势的两种情景。节能情景下, 2015 年河南省工业部门的能源消费总量可达 18152.35 万吨标准煤, 较 2010 年增长了 19.8%, 其中煤, 石油, 天然气消费量分别达为 23443.92 万吨, 381.66 万吨, 70.91 亿立方米, 较 2010 年增长了 18.33%, 14.95%, 63.94%, 消费总量增长速度减慢, 天然气消费比重也将明显升高。执行情景下, 2015 年河南省工业部门的  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  直接排放量将达到 135.04 万吨, 109.27 万吨, 23.33 万吨, 15.06 万吨, 较 2010 年减少 12.90%, 15.35%, 15.01%, 15.01%,  $\text{SO}_2$  与  $\text{PM}_{10}$  减排工作进一步深入,  $\text{NO}_x$  与  $\text{PM}_{2.5}$  直接排放量也由增长转为下降。

根据对预测结果的分析, 可以发现, 在影响污染物直接排放的因素中, 活动水平, 排放因子和能源强度所占比重较大, 经济的增长势必导致污染的加重, 然而节能减排技术的发展将减轻了污染的程度, 此外产业结构与能源结构的调整对大气污染物减排工作也有一定作用, 但影响较小。总体来看, 未来节能减排技术的推广和普及仍将是河南省工业部门大气污染物减排工作的关键所在。

## 参考文献 (References)

[1] 姜磊, 闫云凤. 中国 29 个行业能源消费与工业增长关系研究[J]. 产经评论, 2012, 3(3): 32-40.

- [2] 孔婷, 孙林岩, 何哲. 中国工业能源消耗强度的区域差异—基于省(市)面板数据模型的实证分析[J]. 资源科学, 2010, 32(7): 1222-1229.
- [3] 陈军, 成金华, 吴巧生. 工业化水平区域差异与中国能源消费[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(5): 59-64.
- [4] 史丹. 我国经济增长过程中能源利用效率的改进[J]. 经济研究, 2002, 9: 49-56.
- [5] 吴晓路. 长三角地区大气污染物排放清单研究[D]. 复旦大学, 2010.
- [6] 翟一然, 王勤耕, 宋媛媛. 长江三角洲地区能源消费大气污染物排放特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1574-1582.
- [7] 葛维琦. 山西工业大气污染物排放现状与环境控制对策[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(8): 66-68.
- [8] 奚姗姗. 安徽省主要大气污染物排放总量控制, “十二五”规划及可达性分析[D]. 合肥理工大学, 2010.
- [9] Y. Lei, Q. Zhang, C. Nielsen, et al. An inventory of primary air pollutants and  $\text{CO}_2$  emissions from cement production in China, 1990-2020. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(1): 147-154.
- [10] 刘大钧, 魏有权, 杨丽琴. 我国钢铁生产企业氮氧化物减排形势研究[J]. 环境工程, 2010, 30(5): 118-126.
- [11] 张建民, 殷继焕. LEAP 模型系统分析[J]. 中国能源, 1999, 6: 31-35.
- [12] 陈长虹, 李莉, 黄成等. LEAP 模型在上海市能源消耗及大气污染物减排预测中的应用[C]. 中国会议, 上海, 11-2005, 16-21.
- [13] 国方媛. 北京能源需求及环境综合模型研究与应用[D]. 华北电力大学, 2011.
- [14] B. W. Ang. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [15] 牛晓耕, 李素峰, 丁欣. 基于 LMDI 模型的能源消费碳排放影响因素分析—以河北省为例[C]. 国际会议, 武汉, 24-9-2011, 118-122.
- [16] 河南省人民政府. 河南省人民政府关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知[URL], 2012. <http://www.henan.gov.cn/zwgk/system/2012/01/10/010286089.shtml>
- [17] 河南省统计局. 河南统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [18] 国家环境保护局科技标准司. 工业污染物产生和排放系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [19] 张强. 中国人为源颗粒物排放模型及 2001 年排放清单估算[J]. 自然科学进展, 2006, 16(2): 223-231.
- [20] 国家环境保护部. 关于印发《重点区域大气污染防治“十二五”规划》的通知[URL], 2012. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201212/t20121205\\_243271.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201212/t20121205_243271.htm)