

基于 LMDI 和层次聚类的中国省级工业 SO₂ 排放影响因素分析

裴孝东 吴静 薛俊波¹

(中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190;

中国科学院大学 公共政策与管理学院, 北京 100049)

【摘要】: 利用 Kaya 恒等式和 LMDI 模型, 基于 29 个省份 2008—2016 年的面板数据, 从全过程控制视角, 进行了国家层面和省级层面的工业 SO₂ 排放影响因素的分解, 将其分解为三大因子、六大子效应, 并对省份进行层次聚类。研究结果表明, 经济规模效应是促进全国和各地区工业 SO₂ 排放的主导因素, 末端治理效应是抑制其排放的主导因素, 不同省份各效应的作用程度及方向不同。以工业比重、高硫能源占比以及能源强度为指标, 利用层次聚类将 29 个省份划分为六大区域, 分析了各区域的特征和不同, 提出了针对性的减排建议。相关部门需充分考虑各地区工业 SO₂ 排放的特征与差异性, 制定合适的减排政策。

【关键词】: 工业 二氧化硫 LMDI 层次聚类

【中图分类号】: X51; X196 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)12-183-07

0 引言

自改革开放以来, 中国的工业经济得到了快速的发展, 工业化水平也大幅提升。1978—2017 年, 工业增加值实现了从 1622 亿元到 247860 亿元的巨大飞跃, 年均实际增长达 10.9%^[1]。但与此同时, 工业化造成的环境问题也日益显现, 工业污染排放量占全国污染总量 70% 以上。对工业污染进行治理花费巨大, 2016 年我国工业污染源治理投资额达 819 亿元, 治理废气花费 561.5 亿元。其中 SO₂ 是最主要的废气污染物之一^[2]。因此, 研究 SO₂ 排放的影响因素是制定工业废气减排的基础, 也是实现工业可持续和绿色发展的一个重要前提。

目前, 有诸多学者从不同的视角, 利用不同的方法研究了 SO₂ 的排放和其影响因素之间的关系。白雪洁和曾津^[3]运用灰色关联分析法从省级层面测算了 SO₂ 排放量与汽车、环境规制以及工业发展间的关联度, 发现载货汽车带来最多的排放量。王辉等^[4]运用随机前沿分析法和工具变量法对我国 276 个地级城市面板数据进行分析, 发现技术进步显著抑制 SO₂ 排放。文洁和刘运佳^[5]基于多层线性模型对我国 30 个省份工业部门的面板数据进行分析, 得出 FDI 可以显著抑制结构效应对 SO₂ 排放强度的正相关, 削弱技术效应对 SO₂ 排放强度的负相关的结论。索成等^[6]基于投入产出模型研究了京津冀及周边区域贸易隐含 SO₂ 排放, 发现排放主要来自能源动力行业、金属冶炼和制品制造业、非金属矿物制品和化学工业。田成诗等^[7]采取基于扩展的 EKC 模型研究了我国

¹**作者简介:** 裴孝东, 博士研究生, 研究方向为生态经济与可持续发展。E-mail:xdpeiucas@126.com; 薛俊波, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 研究方向为计算经济学、政策模拟。E-mail:jbxue@casisd.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目“地球系统模式与综合评估模型的双向耦合”(2016YFA0602703); 国家自然科学基金项目“《巴黎协定》背景下我国城市参与国家气候治理的分类机制及政策研究——基于可计算模拟评估”(41871219)

国大气环境污染与劳动生产率的动态关系,表明工业 SO₂ 排放强度和劳动生产率呈倒“N”型关系,科技水平显著促进了工业 SO₂ 排放,而外商直接投资水平和政府管制水平显著抑制了工业 SO₂ 排放。金春雨和吴安兵^[8]设置 SO₂ 排放量为环境污染水平的代理变量,采取 PSTR 模型研究发现,在全国及分区域层面,工业经济结构以及经济增长对环境污染都存在着明显的门槛效应和非线性影响,并且两者对 SO₂ 排放的非线性影响具有显著的区域差异性。

除上述所提研究方法之外,碳排放研究常用的 LMDI 分解法也在分析 SO₂ 排放中发挥着重要的作用。张平淡等^[9]基于 1998—2009 年中国的 SO₂ 排放数据,采取 LMDI 分解法将排放分解为能源消费结构效应、能源消费强度效应和污染排放处理效应,并且通过联立方程模型深入研究环保投资如何影响这三种效应。潘成荣等^[10]对 2011—2013 年安徽省及主要地市的工业废气排放量变化进行分析,通过 LMDI 分解法对工业废气排放量进行了排放强度因素、行业结构因素以及经济规模因素的分解,发现安徽省及主要地市的 SO₂ 排放总量及重点行业排放情况都存在着较大的差异,并且阻碍减排的主要因素是经济增长,而促进减排的因素是排放强度和行业结构。

目前,利用 LMDI 分解法对 SO₂ 的排放进行研究,大部分都不分产业,具体到工业领域 SO₂ 的排放研究不太多,且 LMDI 分解影响因素不够彻底,未能进行深入地分析。本研究拟参考王迪等^[11]提出的全过程控制视角思路,从三个环节(源头预防、过程控制、末端治理)出发,利用 Kaya 恒等式和 LMDI 分解法构建国家层面和省级层面工业 SO₂ 排放影响因素分解模型,并确定其中关键因素,对中国 29 个省份(未包含新疆、西藏及港澳台地区)进行聚类分析,研究不同地区这些因素的特征及异同,以期为制定具有针对性的差异化环保减排政策提供有益的决策参考。

1 研究方法及数据来源

1.1 Kaya 恒等式

Kaya 恒等式最先由日本学者 Kaya^[12]提出,该等式被用来阐释二氧化碳排放与碳排放强度、能源强度、人均产值以及人口规模之间的关系。其原始形式如式(1)所示,将二氧化碳排放量展开为碳排放强度($\frac{CO_2}{E}$)、能源强度($\frac{E}{GDP}$)、人均产值($\frac{GDP}{P}$)以及人口规模(P)四个因素。

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P \quad (1)$$

式中:CO₂代表二氧化碳的排放量,E代表能源的消费量,GDP代表国内生产总值,P代表总人口。

Kaya 恒等式由于变换灵活、易于分解的特点,在科学研究中受到广泛欢迎,诸多学者在式(1)基础上进行了扩展,常常结合 LMDI 分解法将其应用于水利、环境和能源等诸多领域。同样,Kaya 恒等式也被一些学者用来对 SO₂ 的排放影响因素进行研究^[13, 14, 15, 16, 17]。目前对 SO₂ 排放影响因素的分解角度不尽相同,可依据具体情形从人口规模、经济规模、产业结构、能源结构以及技术水平等多角度进行分解。因此,本文结合要研究对象的实际情况,利用 Kaya 恒等式将全国 29 个省份的工业 SO₂ 排放影响因素进行如式(2)与式(3)所示的扩展。

$$D^t = G^t \cdot \frac{Y^t}{G^t} \cdot \frac{D^t}{Y^t} = G^t \cdot T^t \cdot Q^t \quad (2)$$

式中:t代表年份,D^t为第t年的地区工业 SO₂ 排放量,G^t为第t年的地区生产总值,Y^t为第t年的地区工业增加值。 $T^t = \frac{Y^t}{G^t}$

是工业增加值占生产总值的比例,代表工业经济结构; $Q^t = \frac{D^t}{Y^t}$ 是单位工业增加值排放的 SO₂ 量,代表技术效应。因此,工业 SO₂ 的

排放可初步分解为经济规模效应 G^t 、工业结构效应 T^t 和技术效应 Q^t 三种。

然而，技术效应的作用机理较经济规模效应和工业结构效应更为复杂，可更进一步分解^[18]，从而更加深入地探讨 SO_2 排放的

影响因素，并提出更为全面的治理对策。鉴于此，本文将 $\frac{D^t}{Y^t}$ 拆分为 $\frac{E^t}{Y^t} \cdot \frac{C^t}{E^t} \cdot \frac{A^t}{C^t} \cdot \frac{D^t}{A^t}$ ，则得到式 (3)。

$$D^t = G^t \cdot \frac{Y^t}{G^t} \cdot \frac{E^t}{Y^t} \cdot \frac{C^t}{E^t} \cdot \frac{A^t}{C^t} \cdot \frac{D^t}{A^t} = G^t \cdot T^t \cdot K^t \cdot I^t \cdot M^t \cdot N^t \quad (3)$$

式中： E^t 为第 t 年的地区工业能源消费总量， C^t 为第 t 年的地区工业高硫能源消费总量， A^t 为第 t 年的地区工业 SO_2 产生量。

$K^t = \frac{E^t}{Y^t}$ 是单位工业增加值的能源消费量，代表能源强度； $I^t = \frac{C^t}{E^t}$ 是高硫能源消费占总能源消费的比例，代表工业能源结构； $M^t = \frac{A^t}{C^t}$ 是单位高硫能源消费产生的 SO_2 排放量，代表高硫能源清洁利用水平，数值越小表明越环保； $N^t = \frac{D^t}{A^t}$ 是 SO_2 排放量占产生量的比例，代表末端治理水平，数值越小表明治理水平越高。

由此可知，工业 SO_2 排放受到经济规模效应、工业结构效应、工业能源强度效应、工业能源结构效应、能源清洁利用效应和末端治理效应的综合影响。其中，工业能源强度、工业能源结构、能源清洁利用和末端治理水平均为技术效应。

从全过程控制视角分析，源头预防因子包括经济规模和工业结构，过程控制因子包括工业能源强度、工业能源结构和能源清洁利用，末端治理因子为末端治理水平（以 SO_2 的排放比例表示）。从经济角度和环保角度考虑，源头预防和过程控制相较于末端治理更有优势。

1.2 LMDI 分解法

在能源消费和环境保护等领域，因素分解法作为一种重要的研究方法被广泛运用。因素分解法主要包括两大类：结构因素分解法 (structural decomposition analysis, SDA)，指数因素分解法 (index decomposition analysis, IDA)，而在每种大类底下又可以细分为多种小类。后者主要以拉式因素分解法 (laspeyres index decomposition method, LI) 和迪氏因素分解法 (divisia indexed composition method, DI) 为主^[19]。对数平均迪氏指数模型 (log arithmic mean divisia index, LMDI) 是由 Ang 基于迪氏因素分解法所提出的，该模型的分解结果不包含残差项，且能有效解决数据负值和零值问题^[20]，其有加法分解和乘法分解两种形式，两种形式的分解结果具有唯一性和一致性^[21]的特点，且可以实现相互转换。

因 LMDI 模型的加法分解形式更为直观，故本研究基于 Kaya 恒式 (3)，采用加法分解形式对工业 SO_2 排放量进行分解，得到式 (4)。

$$\Delta D^t = D^t - D^{t-1} = \Delta G^t + \Delta T^t + \Delta K^t + \Delta I^t + \Delta M^t + \Delta N^t \quad (4)$$

式中： ΔD^t 为相邻两年的工业 SO_2 排放量之差，也即第 t 年减排总效应；总效应由六个方面构成，分别是第 t 年的经济规模效应 (ΔG^t)、工业结构效应 (ΔT^t)、工业能源强度效应 (ΔK^t)、工业能源结构效应 (ΔI^t)、能源清洁利用效应 (ΔM^t) 和末端治理效应 (ΔN^t)。根据 LMDI 模型计算方法，六个效应可表示为式 (5)~(10)：

$$\Delta G^t = \sum_{i=1}^{29} W_i^t \times (\ln G_i^t - \ln G_i^{t-1}) \quad (5)$$

$$\Delta T^t = \sum_{i=1}^{29} W_i^t \times (\ln T_i^t - \ln T_i^{t-1}) \quad (6)$$

$$\Delta K^t = \sum_{i=1}^{29} W_i^t \times (\ln K_i^t - \ln K_i^{t-1}) \quad (7)$$

$$\Delta I^t = \sum_{i=1}^{29} W_i^t \times (\ln I_i^t - \ln I_i^{t-1}) \quad (8)$$

$$\Delta M^t = \sum_{i=1}^{29} W_i^t \times (\ln M_i^t - \ln M_i^{t-1}) \quad (9)$$

$$\Delta N^t = \sum_{i=1}^{29} W_i^t \times (\ln N_i^t - \ln N_i^{t-1}) \quad (10)$$

式中：各变量的下标 i 代表省份；各变量的上标 t 和 $t-1$ 分别代表相邻年份。

第 j 类影响因素的贡献率为：

$$con(j) = \begin{cases} \Delta D_j / \Delta D, \Delta D > 0 \\ -\Delta D_j / \Delta D, \Delta D < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： ΔD_j 为第 j 类影响因素效应。 $con(j)$ 为正值，代表第 j 类影响因素效应促进工业 SO_2 的排放，反之抑制排放。

1.3 层次聚类方法

所谓聚类分析，就是对目标对象按照一定的规则分成几类，使得类内的个体尽可能相似，而类间的个体尽可能不同。聚类算法是数据挖掘中常用的一种算法，在各个领域中都有广泛的应用，其大致可分为基于划分聚类算法、基于层次聚类算法、基于密度聚类算法和基于网格聚类算法等^[22]。本研究将选取基于层次聚类算法进行 29 个省份间的聚类分析。

层次聚类算法是广为人知的聚类算法之一，相较于 K 均值聚类而言，其优点是自适应的聚类，不需要提前设定类数 K ，可以发现类的层次关系，依据实际需求灵活分成不同的类数。其基本原理是，通过计算不同类别数据点间的相似程度生成一棵层次嵌套聚类树，按照层次分解的顺序可分为凝聚层次聚类法(自下而上)和分裂层次聚类法(自上而下)。

以凝聚法为例，基本流程为：(1)把每个样本看作单独一类，计算两两样本间的最小距离；(2)把距离最小的两类合并成一个新类；(3)重新计算新类与所有类之间的距离；(4)重复(2)、(3)两步，直到所有类最后合并成一类。

1.4 数据来源及处理

生产总值数据、工业增加值数据均来自《中国统计年鉴》， SO_2 产生量数据、 SO_2 排放量数据经《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》综合整理得到。考虑到经济发展中价格变化的影响，生产总值和工业增加值均折算到 2008 年不变

价。

根据已有研究，工业 SO₂ 的排放主要来自煤炭和油类的燃烧，故本研究将高硫能源定义为原煤、焦炭、原油和燃料油。各省份的工业能源消费量数据和高硫能源消费量数据来源于《中国能源统计年鉴》，且均已折算为标准煤数据。

2 实证分析

2.1 全国工业 SO₂ 排放影响因素分解

根据 LMDI 模型和 29 个省份的统计数据综合计算，得到 2008—2016 年国家层面的工业 SO₂ 排放影响因素的逐年分解结果，如表 1 所示。由表 1 可见，2008—2016 年全国工业 SO₂ 排放总量在 2009—2010 年、2010—2011 年以及 2013—2014 年增加，在 2010—2011 年增加最多，而其他时段都在减少，在 2015—2016 年减少最多。总体来说，排放量呈递减趋势，2008—2016 年排放总量共减少了 1091.21 万吨，其中，经济规模、工业结构以及能源清洁利用这三个效应均对工业 SO₂ 排放产生正向驱动，分别使其增加 1256.69 万吨、97.28 万吨和 315.11 万吨。工业能源强度、工业能源结构以及末端治理这三个效应均对工业 SO₂ 排放产生负向驱动（即抑制作用），分别使其减少 1053.54 万吨、161.56 万吨和 1545.19 万吨。基于全过程控制视角，从累积效应来看，源头预防因子均促进工业 SO₂ 排放，末端治理因子抑制排放，而过程控制因子有双重作用——工业能源强度和工业能源结构抑制排放，能源清洁利用促进排放——但总体是抑制了排放。

表 2 展示了六大效应对国家层面工业 SO₂ 减排的贡献率，数值前面负号代表抑制作用。

经济规模是促进工业 SO₂ 排放的主导因素，这与 He^[23] 的研究结论相一致，其对各个时段的排放贡献率均维持在 10.02%~897.32% 之间，累计贡献率为 115.16%。随着经济的飞速发展，我国工业化水平快速提高，工业规模也不断扩大，使得能源消耗量持续上升，进而增加了工业 SO₂ 排放量。

工业结构对工业 SO₂ 排放的增促进作用有限，其累计贡献率仅为 8.91%，这种微弱的增促进作用可被其他强有力的抑制作用所抵消。而在 2014—2015 年和 2015—2016 年，工业结构的贡献率为负值，表明其对工业 SO₂ 排放的抑制作用已经逐渐显现，这可能与我国的产业结构调整优化有关。《2014 年政府工作报告》里指出，要加大结构调整力度，增强发展后劲，2014 年中国第三产业增加值快于第一产业和第二产业，服务业比重超过了工业，达到 48.2%。从后两年贡献率可看出，工业结构尚有进一步调整和优化空间，以达到对工业 SO₂ 排放更大的抑制作用。

工业能源强度是单位工业增加值的能源消费总量，代表着能源效率。由表 2 知其是抑制工业 SO₂ 排放的次要因素，在各个时段的排放贡献率均为负值。为了转变经济的增长方式、提高增长质量和效益，避免片面追求增速，我国在 2006 年首次将单位能耗纳入宏观目标控制体系，又依据《“十一五”规划纲要》设定《“十一五”期间各地区单位生产总值能源消耗降低指标计划》，这些方针政策降低了我国 2008—2016 年的工业能源强度，进而减少了工业 SO₂ 的排放。在未来，工业能源强度依旧是抑制工业 SO₂ 排放的有力抓手。

表 1 2008—2016 年国家层面工业 SO₂ 排放影响因素分解结果 单位：万吨

年份	源头预防因子		过程控制因子			末端治理因子	综合效应
	经济规模	工业结构	工业能源强度	工业能源结构	能源清洁利用	末端治理	
2008—2009	196.42	2.64	-79.73	-19.00	36.75	-278.50	-141.41

2009—2010	215.46	47.77	-243.36	-7.52	186.83	-175.17	24.01
2010—2011	213.40	47.26	-124.19	29.16	-129.85	144.09	179.88
2011—2012	184.19	24.38	-153.60	-34.20	163.23	-346.94	-162.94
2012—2013	148.05	11.95	-177.63	-147.90	217.97	-217.83	-165.38
2013—2014	121.10	0.28	-83.89	-11.93	1.94	4.72	32.22
2014—2015	108.21	-21.84	-105.99	-15.82	-33.09	-92.23	-160.76
2015—2016	69.86	-15.17	-85.15	45.64	-128.67	-583.32	-696.82
累积效应	1256.69	97.28	-1053.54	-161.56	315.11	-1545.19	-1091.21

表 2 2008—2016 年国家层面工业 SO₂排放影响因素贡献率

年份	源头预防因子		过程控制因子			末端治理因子	合计
	经济规模	工业结构	工业能源强度	工业能源结构	能源清洁利用	末端治理	
2008—2009	138.90	1.87	-56.38	-13.43	25.99	-196.94	-100
2009—2010	897.32	198.96	-1013.53	-31.31	778.09	-729.52	100
2010—2011	118.63	26.27	-69.04	16.21	-72.18	80.11	100
2011—2012	113.04	14.96	-94.27	-20.99	100.18	-212.92	-100
2012—2013	89.52	7.23	-107.40	-89.43	131.80	-131.72	-100
2013—2014	375.87	0.86	-260.38	-37.02	6.02	14.65	100
2014—2015	67.31	-13.58	-65.93	-9.84	-20.59	-57.37	-100
2015—2016	10.02	-2.18	-12.22	6.55	-18.47	-83.71	-100
累积效应	115.16	8.91	-96.55	-14.81	28.88	-141.60	-100

注：表中贡献率为百分比。

工业能源结构和工业结构类似，累积贡献率比较小，对工业 SO₂排放的抑制作用有限，并且在 2010—2011 年和 2015—2016 年促进了排放，表明这两个时段对高硫能源的消耗比较多，进而增加了工业 SO₂的排放。

能源清洁利用并未显现出抑制工业 SO₂排放的效果，相反，其累积效应值仅次于经济规模，是第二大正向驱动因素。其在 2010—2011 年、2014—2015 年以及 2015—2016 年抑制工业 SO₂排放，其他年份恶化了排放。这说明高硫能源高效、清洁转化和低污染物排放还有很大的提升空间，能源清洁利用的减排潜力需要进一步深挖。

末端治理水平衡量了使用技术设备处理产生的污染物、使其达到排放标准的能力。末端治理尽管在 2010—2011 年和 2013—2014 年的累积效应为正值、表现出正向驱动作用，但从整体看，其是工业 SO₂ 减排的核心因素，尤其在 2015—2016 年，强有力地减排了 583.32 万吨。

从全过程控制视角分析，目前我国在控制工业 SO₂ 排放上，总的来说还是轻源头控制、重末端治理的，工业 SO₂ 排放仍然处于先污染、后治理的环境治理模式，这样使得环境治理投入成本过高、付出的代价过大，不是可持续发展的道路。

2.2 省级工业 SO₂ 排放影响因素分解及差异分析

我国幅员辽阔，不同地区的经济发展水平、工业化程度、技术特征以及环境政策等均有着很大的差异性，工业 SO₂ 的排放也呈现着不同趋势、特征以及内在驱动因素。图 1 展示了我国 29 个省份 2016 年相较于 2008 年的工业 SO₂ 排放变化量和变化率。可以看到除海南和云南外，其余省份工业 SO₂ 排放量都减少了，减排量前三名分别是河南 (97.47 万吨)、内蒙古 (75.92 万吨) 以及广西 (68.25 万吨)，减排率前三名分别是北京 (82.25%)、广西 (80.86%) 以及河南 (78.32%)。不同省份工业 SO₂ 排放变化量和变化率呈现出巨大的差异。

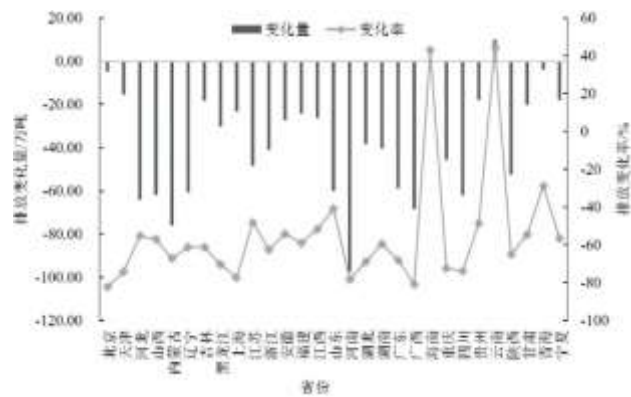


图 1 2008—2016 年全国省级工业 SO₂ 排放变化量及变化率

图 1 仅从首末两个时点进行了初步的分析。为进一步探究各地区在不同时段的工业 SO₂ 排放的驱动因素，从而更好地制定针对性的、因地制宜的减排政策，利用 LMDI 分解法，得到 2008—2016 年各地区工业 SO₂ 排放影响因素分解结果的累积减排图 (图 2、图 3)。

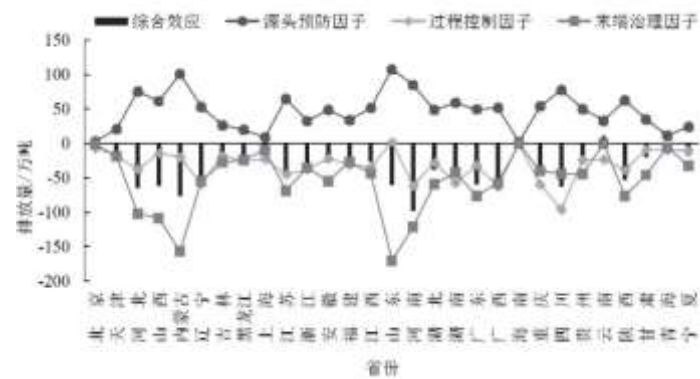


图 2 2008—2016 年全国省级工业 SO₂ 排放影响因素分解图(全过程视角)

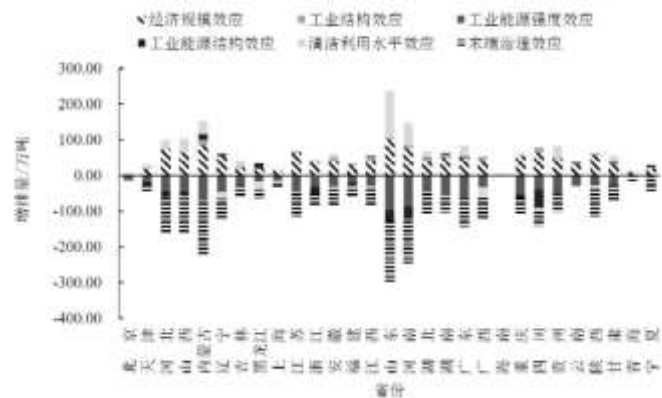


图 3 2008—2016 年全国省级工业 SO₂ 排放影响因素分解图(细分效应)

由图 2 和图 3 可知，源头预防因子是促进各地区工业 SO₂ 排放的主导因素，并且其中经济规模效应是工业 SO₂ 增排的最主要因素。源头预防因子导致山东和内蒙古的增排量最大，分别为 108.02 万吨和 100.74 万吨，其中经济规模效应对山东和内蒙古的工业 SO₂ 增排贡献值达到 101.48 万吨和 85.49 万吨，而工业结构效应对两者贡献值仅为 6.54 万吨和 15.25 万吨。除山东外，过程控制因子均抑制各地区工业 SO₂ 的排放。进一步细分过程控制因子为三大子效应可知，工业能源强度效应均抑制各地区(包括山东)工业 SO₂ 的排放。这说明各地区响应国家号召、执行单位生产总值能源消耗降低指标计划的效果明显。而工业能源结构效应以及清洁利用水平效应则在不同地区呈现出截然不同的作用，工业能源结构效应和清洁利用水平效应对 11 个地区的工业 SO₂ 排放产生正向驱动作用，对 18 个地区产生负向作用，产生正向或负向作用的省份有所不同，同时恶化排放的有内蒙古、江苏、湖北、广东、云南和甘肃，同时抑制排放的有上海、广西、福建、四川、陕西和青海。由此也可知道，上海、广西、福建、四川、陕西和青海 6 个地区在过程控制因子中达到了全方位的减排效果。对于那些工业能源结构效应或清洁利用水平恶化工业 SO₂ 排放的省份来说，应该着力调整工业结构，发展更绿色清洁的产业，努力提高能源清洁转换低排放的技术水平。除云南外，末端治理因子均抑制各地区的工业 SO₂ 排放，减排量排在前两名的的是山东和内蒙古，分别达到了 170.10 万吨和 156.58 万吨，而云南的增排量也仅仅为 0.04 万吨，末端治理在各地区工业 SO₂ 减排上发挥了很大的作用，是抑制工业 SO₂ 排放的主导因素。

2.3 省级聚类分析

由上述分析可知，不同地区各效应对工业 SO₂ 排放的影响程度及驱动方向均有较大的不同，其部分原因是各地区工业结构、能源使用等情况存在不同程度的差异。为进一步探究这些差异，并制定更有针对性的减排政策，有必要进行聚类分析。为此，选取 29 个省份 2008—2016 年的面板数据，以工业比重、高硫能源占比以及能源强度为聚类变量，数据经标准化处理之后，利用 SPSS 软件进行层次聚类，得到地区聚类表(表 3)，表中区域 3、区域 5 及区域 6 各地区因剩余两特征存在不同，故均仅表述了一个特征。

表 3 地区聚类表

类别	包含地区	特征
区域 1	宁夏	工业比重高，高硫能源占比高，能源强度极高
区域 2	海南	工业比重低，高硫能源占比低，能源强度高

区域 3	青海、甘肃、山西、河北、云南、贵州	能源强度高
区域 4	北京	工业比重低，高硫能源占比低，能源强度低
区域 5	重庆、湖北、内蒙古、广西、吉林、四川、辽宁、湖南、安徽、陕西、江西	高硫能源占比高
区域 6	上海、天津、广东、浙江、黑龙江、福建、江苏、河南、山东	工业比重高

如表 3 所示，层次聚类将 29 个省份划分为六大区域，其中宁夏、海南以及北京因工业比重、高硫能源占比以及能源强度和其他地区呈现出截然不同的特征，各被划分为一个区域。宁夏地处我国西北部，自然条件恶劣、水资源贫乏，导致第一产业和第三产业羸弱，资源消耗型重化工业是带动宁夏经济增长的主导产业，故呈现“三高”的特征。而海南地处我国最南端，光温充足、气候宜人，侧重于发展第一产业和第三产业，第二产业尤其是工业占比较低，工业发展后劲不足，因此工业比重和高硫能源占比都比较低，而能源强度高。北京作为我国的首都，经济发达，经过多年的产业结构升级与改造，已形成以现代服务业为代表的、第三产业为主导的产业结构，故而呈现“三低”的特征。在区域 3 包含的地区中，青海、甘肃、云南和贵州都地处我国西南或西北地区，社会经济发展比较落后，工业水平较低，工业发展远未完成结构优化，因此能源强度高。而山西和河北都地处我国华北地区，都是工业大省，各自的特色工业分别是煤炭工业和钢铁工业，产量均为全国第一，能源强度高就不足为奇了。区域 5 包含 11 个地区，特征是能源结构高，说明这些地区消耗高硫能源比重较大，其中吉林和辽宁是老工业基地，对煤炭和石油的需求旺盛。区域 6 包含 9 个地区，特征是工业比重高，其中上海、天津、广东、浙江和江苏都是经济高度发达的地区，工业促进了这 5 个省份的发展，目前还未像北京一样完成产业结构的优化升级。

3 结论与建议

本文基于 2008—2016 年 29 个省份的相关数据，从全过程控制视角出发，利用 LMDI 分解法构建了工业 SO₂ 排放影响因素分解模型，分别考察了国家层面和省级层面的工业 SO₂ 排放特征，并利用层次聚类分析将各地区划分为六大区域，研究不同区域的特征及异同。结果发现：

(1) 全国层面。从累积效应看，源头预防因子皆促进工业 SO₂ 排放，末端治理因子抑制排放，而过程控制因子有双重作用，但总体是抑制排放。具体来说，经济规模是促进排放的主导因素，工业结构对排放的促进作用有限，且有抑制排放的优化空间，工业能源强度是抑制排放的次要因素，工业能源结构抑制排放作用有限。总体来说，能源清洁利用是对工业 SO₂ 排放起正向驱动作用的次要因素，末端治理水平是减排的核心因素。目前，我国在控制工业 SO₂ 排放上，总的来说还是轻源头控制、重末端治理，要转向强化源头预防和过程控制的治理模式，需要适当减缓经济发展速度，重视经济发展带来的环境生态问题，调整和优化产业结构，提高高污染高耗能行业的准入门槛，降低高硫能源的依赖程度，大力发展清洁能源，提高能源的转化效率，同时加大环境的治理力度，才能实现工业绿色和可持续发展。

(2) 省级层面。源头预防因子是促进各地区工业 SO₂ 排放的主导因素，并且其中经济规模效应是增促的最主要因素。工业能源强度效应均抑制各地区工业 SO₂ 的排放，工业能源结构效应以及清洁利用水平效应则在不同地区呈现出截然不同的作用。末端治理是抑制工业 SO₂ 排放的主导因素。因此，政府在制定工业 SO₂ 减排战略时，不能“一刀切”，需要充分考虑各地区的实际情况，充分研析各地区的排放驱动因素，并且及时优化调整以适应不同的发展进程。

(3) 根据层次聚类结果看，六大区域在工业比重、高硫能源占比以及能源强度方面特征不同。为更好地实现工业 SO₂ 减排目标，区域 1 需要对产业结构进行逐步的调整与优化，减少高污染企业比例，降低工业能耗，提高能源使用效率，减少高硫能源的

使用,大力发展清洁能源。区域 2 需要适当地发展工业,提高工业技术水平,进而降低能源强度,提升能源效率。区域 3 各地区同样需要提高工业技术水平、提升能源效率,并且对于河北和山西来说,传统产业污染大、能耗极高,需要积极发展战略性新兴产业,实现产业结构优化升级、实现经济可持续发展。对于区域 4 来说,北京已经实现了产业优化与能源结构的调整,而其经济发达,因此,需要着重注意经济发展的质量,从经济规模效应着手减少工业 SO₂ 排放。区域 5 各地区需要积极下调煤炭和石油等高硫能源的使用比例,发展更绿色清洁的能源,例如内蒙古可以推进风能的使用,吉林可以推进热能的使用。而对于区域 6 来说,需要改变长期以来依靠工业发展的模式,升级改造产业结构,提高第三产业的占比,并且注重经济发展的质量和工业污染的关系,从源头预防,才能实现绿色发展。

参考文献:

- [1]刘艳红,郭朝先.改革开放四十年工业发展的“中国经验”[J].经济与管理,2018(3):1-11.
- [2]李花,赵雪雁,王伟军,等.基于多尺度的中国城市工业污染时空分异及影响因素[J].地理研究,2019(8):1993-2007.
- [3]白雪洁,曾津.空气污染、环境规制与工业发展——来自二氧化硫排放的证据[J].软科学,2019(3):1-4.
- [4]王辉,董直庆,杨洒洒.技术进步对污染物排放会存在选择性偏向吗?——来自环境信息视角的城市层面经验证据[J].苏州大学学报(哲学社会科学版),2020(2):114-122.
- [5]文洁,刘运佳.多维视角下 FDI 对我国二氧化硫排放的影响——基于多层线性模型的实证分析[J].重庆理工大学学报(社会科学),2020(1):43-52.
- [6]索成,赵红艳,王鑫,等.京津冀及周边地区区域贸易隐含二氧化硫排放[J].环境科学学报,2019(11):3916-3923.
- [7]田成诗,刘亚雪,范丛昕.中国大气环境污染与劳动生产率动态关系的实证研究[J].统计与决策,2019(22):89-92.
- [8]金春雨,吴安兵.工业经济结构、经济增长对环境污染的非线性影响[J].中国人口·资源与环境,2017(10):64-73.
- [9]张平淡,朱松,朱艳春.环保投资对中国 SO₂ 减排的影响——基于 LMDI 的分解结果[J].经济理论与经济管理,2012(7):84-94.
- [10]潘成荣,田由洲,易明建,等.基于 LMDI 方法的安徽省工业废气排放量变化的因素分解[J].安徽农业科学,2015(34):106-110.
- [11]王迪,沈叶,聂锐,等.城市大气污染排放区域差异与减排路径研究——以安徽省工业 SO₂ 排放为例[J].安全与环境学报,2019(4):1367-1374.
- [12]Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup, 1989.
- [13]Wang Q W, Wang Y Z, Zhou P, et al. Whole process decomposition of energy-related SO₂ in Jiangsu Province, China[J]. Applied Energy, 2016, 194: 679-687.

-
- [14]张嘉琪,王超然,刘毅.基于 LMDI 的长江中下游城市群污染排放强度分析[J].中国环境管理,2017(5):64-68.
- [15]范长健,李媛,海热提·吐尔逊,等.电力行业 SO₂ 去除量驱动因素分析[J].中国电力,2014(7):144-149.
- [16]Zhao H R,Guo S,Zhao H R.Impacts of GDP,fossil fuel energy consumption,energy consumption intensity,and economic structure on SO₂ emissions:A multi-variate panel data model analysis on selected Chinese provinces[J].Sustainability,2018,10(3):657.
- [17]王艳华,苗长虹,胡志强,等.专业化、多样性与中国省域工业污染排放的关系[J].自然资源学报,2019(3):586-599.
- [18]祝捷,袁新杰,马俊英,等.基于 LMDI 模型的乌鲁木齐工业废气排放影响因素研究[J].中国环境管理,2015(5):77-82.
- [19]韩颖,马萍,刘璐.一种能源消耗强度影响因素分解的新方法[J].数量经济技术经济研究,2010(4):137-147.
- [20]Ang B W,Liu N.Handling zero values in the logarithmic mean Divisia Index decomposition approach[J].Energy Policy,2005,35(1):238-246.
- [21]Ang B W.Decomposition analysis for policy making in energy:Which is the preferred method[J].Energy Policy,2004,32:1131-1139.
- [22]杨建红.基于密度的聚类算法研究[D].长春:长春工业大学,2010.
- [23]He J.What is the role of openness for China's aggregate industrial SO₂ emission:A structural analysis based on the Divisia decomposition method[J].Ecological Economics,2009,69(4):868-886.