1996～2013 年长江经济带工业发展过程中的大气环境污染效应*[1]

夏会会[1] 丁镭[2*] 曾克峰[1] 刘超[1]

(1.中国地质大学(武汉) 公共管理学院，湖北武汉 430074；

2．宁波职业技术学院，浙江宁波 315800)

【摘 要】：大气污染物排放及影响因素研究，是引导区域减排实现可持续发展的重要依据。利用 Tapio 脱钩模型测度了 1996 ～ 2013 年长江经济带 11 个省区工业经济增长与工业废气、工业二氧化硫、工业烟粉尘 3 个指标之间的脱钩程度，并利用 LMDI 分解模型对大气污染物排放变化特征进行了影响因素分解。结果表明：(1) 长江经济带 11 个省(市) 的工业废气排放量呈持续上升的趋势，且工业废气排放量的“热”点区域主要集中在东部地区，工业二氧化硫和烟粉尘两种大气污染物排放量总体呈现“先增加后减少”的趋势，状况有所改善。(2)长江经济带工业废气排放整体经历了从扩张性负脱钩到相对脱钩发展的趋势，表明经济发展的同时带来工业废气排放的污染同步增长。经济发展效应和能源效率效应是促使工业废气排放的主要因素。(3) 长江经济带的工业二氧化硫和烟粉尘排放整体上经历了从相对脱钩向绝对脱钩发展的趋势，经济发展均是造成各地区两种污染物排放量增加的主要原因，技术效应和能源效率是各地区两种污染物减排的重要影响因素。未来，在大气污染物的减排控制过程中，需加强产业结构、能源结构的调整，也需坚定依靠技术进步推动能源使用效率的提高，并且注重各省市间的减排差异和防范污染产业的区域转移。

【关键词】：长江经济带；经济增长；大气环境；脱钩分析模型；LMDI 分解模型

【中图分类号】：F429. 9 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2017) 07-1057-11

DOI：10. 11870 /cjlyzyyhj201707012

长江经济带共计 11 个省(市) ，东起上海，西至云南，横跨我国东中西部，在我国经济发展中具有极其重要的战略地位[1~3]。作为我国国土空间上重要的东西轴线，近年来，其发展建设问题更是上升为新一轮的国家战略。随着 2015 年 1 月 5 日，习近平在重庆参加推动长江经济带发展座谈会时指出，把修复长江生态环境放到压倒性位置，把“生态文明建设的先行示范带”作为其重要战略定位，长江经济带的生态环境问题成为政府和学术界共同关注的热点和焦点。但在已有的研究中，更多的把关

[1] **收稿日期**：2016-10-31； **修回日期**：2017-03-15

基金项目：国家自然科学青年基金项目(41401181) [National Natural Science Foundation of China(41401181)]； 浙江省教育厅一般科研项目(Y201636606) [Scientific Research Projects of Zhejiang Provincal Education Department(Y201636606)]

作者简介：夏会会(1994 ～) ，女，硕士研究生，主要从事区域规划与可持续发展研究. E-mail: 18600320907@163. com

*** 通讯作者 E-mail**：dinglei3616028@163. com

注放在了水污染[4~7]问题上，而较缺乏大气污染物排放研究。

近年来，作为大气污染研究体系重要内容的大气污染排放时空分析和影响因子研究日益受到众多国内外专家学者的关注。从大气污染排放总量的时空分布特征来看，刘满芝等[8]对 2000 ～ 2010 年间全国层面的 SO_2、烟尘排放量的空间差异进行了比较； 刁贝娣等[9]则对 2006～ 2013 年省域工业氮氧化物的排放量时空特征进行了分析； 周侃[10, 11]则以地级市为研究单元，分析了 SO_2污染的时空差异和集聚特征； 这些研究为解析大气环境污染源及排放空间格局做了系统而有益的探索，并为区域大气污染防控提供了宝贵的政策建议。同时，不同学者结合不同的研究手段，对污染物排放的驱动因素进行了深入的探讨。比如，He 等[12]、Fujii[13]等分别从地区层面和行业层面，运用 LMDI 分解方法研究了中国各省份、10 个行业的工业 SO_2排放量变化影响因素； 程钰等[14]则结合脱钩理论和 LMDI 模型，对山东省 1991 ～ 2011 年的 SO_2、粉尘两项指标，分解其受环境规模效应、结构效应、技术效应所带来的影响差异； Xu 等[15]利用 STIRPAT 分解模型研究了 2001 ～ 2012 年中国 PM2．5 排放的驱动因子，并解析了经济发展、城市化、私家车和煤炭消耗对 PM2．5 排放量影响的东中西部区域差异。此外，王菲等[16]针对宁蒙沿黄地带资源型产业密集区基于工业结构特征偏向指数在行业角度解析了 SO_2与粉尘排放强度的变化，主要影响因素包括重工业高速发展、区域工业结构逐渐呈单一化趋势等。

从研究尺度来看，考虑到数据的完整性和连续性，国家或省级尺度开展的大范围比较研究是学者们热衷的一个切入视角； 个别省份的实证研究也不断受到关注，比如程钰等[17, 18]对山东省、傅强等[19]对重庆市、Wu 等[20]对北京市的工业结构调整对大气环境影响的实证研究，但缺少一个在中观尺度(城市群、经济带) 的比较研究。此外，已有研究指出同时从地区空间差异视角和时间纵向比较视角分解比较大气污染物变化及其影响因素的横向空间差异和纵向时间差异的研究较少，而针对大气污染治理效果研究，欠缺结构效应因素[8]。随着长江经济带建设的深入推进，在区域污染物减排和综合防治上的联系也会越来越紧密。长江经济带各省市的主要大气污染物排放量变化及其主要影响因素有哪些，各因素的贡献度如何以及污染物减排效果如何? 都有待研究分析。

伴随着城镇化和工业化的快速发展，空气污染成为危害人类健康[21～ 23]、制约经济和社会发展的重要因素。控制大气污染物排放总量成为引导区域污染减排、制定环境政策、实现可持续发展的必要手段。因此，鉴于上述研究背景，本文以长江经济带 11 个省市大气污染物排放量数据为研究对象，从地理空间视角出发分析排放量的时空分布特征，利用脱钩分析模型判定各地区工业经济增长与大气污染物之间的脱钩程度，并运用 LMDI 分解模型对其排放量的主要驱动因素进行分析，以了解各省大气污染物排放量与工业经济发展水平、产业结构、技术水平、能源效率等驱动因子的相互关系，基于时空格局演变的角度比较分析不同大气污染物不同省份面临的减排驱动主导因素，以期为未来大气污染物的减排政策制定提供依据。

1 数据来源和研究方法

1．1 脱钩分析模型

“脱钩”概念源于物理学，用于分析两大物理量之间相互变化的趋势[24]。之后，引入资源环境学研究领域[25, 26]，用于解释经济增长与物质消耗之间同步关系是否存在。目前，有关经济增长与环境污染脱钩程度的研究，主要参照 Tapio 脱钩状态分析模型[27]。该模型以弹性概念为根本出发点，将脱钩定义为一种小于 1 的弹性值，用于描述经济增长与环境污染之间的状态[28, 29]，提高了使用脱钩模型进行分析的准确性。

本文基于 Tapio 脱钩状态分析模型，构建工业经济增长与大气污染物排放之间脱钩指数的计算方法:

$$E(EA,\ IO) = \frac{\Delta EA'}{\Delta IO'} = \frac{(EA_{t+1} - EA_t)\ /EA_t}{(IO_{t+1} - IO_t)\ /IO_t} \quad (1)$$

式中：$E_{(EA,IO)}$ 为污染物的 IO 弹性，即工业经济增长与大气污染物之间的脱钩指数； ΔEA’为大气污染物指标变化率，ΔIO’为工业增加值的变化率，EA_t 为起始年的污染量，EA_{t+1} 为末端年的污染量，IO_t 为起始年的工业增加值，IO_{t+1} 为末端年的工业增加值。

根据公式的计算结果，对工业经济增长与大气污染的脱钩程度划分作出规定，如表 1 所示。其中，绝对脱钩是最理想的状态，绝对负脱钩是最不理想的状态。

表 1　工业经济增长与大气污染脱钩程度判定标准

Tab. 1　Standard for Judging the Decoupling Degree of Industrial Economic Growth and Air Pollution

趋势	类型	$E_{(EA,IO)}$	ΔEA´	ΔIO´	含义
脱钩	绝对脱钩	<0	<0	>0	最好：经济增长，污染程度下降
	相对脱钩	0~1	>0	>0	经济增长，污染缓慢增长
	衰退性脱钩	>1	<0	<0	经济缓慢衰退，污染大幅下降
负脱钩	绝对负脱钩	<0	>0	<0	最差：经济衰退，污染增长
	衰退负脱钩	0~1	<0	<0	经济衰退，污染缓慢下降
	扩张性负脱钩	>1	>0	>0	经济缓慢增长，污染大幅增长

1. 2 LMDI 分解模型

1998 年，Ang 创立了因素分解法，利用拆分出的影响因子，分析研究对象和各影响因子的相互作用机制[30]，主要包括拉氏指数分解法和迪式指数分解法两种使用形式[31]。LMDI 分解法，也称对数平均迪式分解法即是迪式指数分解法中的一种[32]。由于在分解过程中，LMDI 不容易产生残差项，更适用于对研究对象进行影响因素的分解，因此，现已被广泛应用于能源[33]、环境等相关领域的因素分解研究。

通过大气环境污染物 LMDI 模型的构建，可以分解出各影响因子对大气污染物排放量变化的影响程度。根据 Kaya 恒等式分解法[34]，将大气污染物排放总量 P 分解为:

$$P_i^t = \sum_i G_i^t \cdot \frac{V_i^t}{G_i^t} \cdot \frac{C_i^t}{V_i^t} \cdot \frac{P_i^t}{C_i^t} = \sum_i G_i^t \cdot S_i^t \cdot T_i^t \cdot E_i^t \quad (2)$$

式中：P^t 为 t 时期大气环境污染物排放总量；P_i^t 为 t 时期 i 省的大气环境污染物排放量；G_i^t 为 t 时期 i 省的地区生产总值；V_i^t 为 t 时期 i 省的工业增加值；C_i^t 为 t 时期 i 省的工业煤炭消费量；$S_i^t = V_i^t/G_i^t$ 为 t 时期 i 省工业增加值在地区生产总值中的比重，表征着 t 时期 i 省的产业结构；$T_i^t = C_i^t/V_i^t$ 为 t 时期 i 省单位产值的煤炭消费量，反映工业增加值对煤炭的依赖程度，这一比值越低，工业增加值对煤炭的依赖程度越低，表征着 t 时期 i 省的技术水平；$E_i^t = P_i^t/C_i^t$ 为 t 时期 i 省单位工业煤炭消费的大气污染物排放量，Chen 等[35]认为，煤炭对中国 SO2 和烟粉尘的排放影响分别达到 90%和 70%，是造成大气污染的主要能源，这一比值越低，反映了煤炭的利用效率越高，表征着 t 时期 i 省的能源效率。因此，t 时期内大气污染物排放总量变化可以分解为：

$$\Delta P_{tot} = P^t - P^0 = \Delta P_{eco} + \Delta P_{str} + \Delta P_{tec} + \Delta P_{ene} \quad (3)$$

式中：ΔP_{eco} 、ΔP_{str} 、ΔP_{tec} 、ΔP_{ene} 分别代表经济发展、产业结构、技术进步、能源效率的变动对污染物排放水平的影响。

利用 LMDI-I 型的强度分解公式，获得各因素对大气污染排放强度的贡献度公式如下：

$$\Delta P_{eco} = \sum_i \frac{P_i^t - P_i^0}{\ln P_i^t - \ln P_i^0} \ln\left(\frac{G_i^t}{G_i^0}\right) \quad (4)$$

$$\Delta P_{str} = \sum_i \frac{P_i^t - P_i^0}{\ln P_i^t - \ln P_i^0} \ln\left(\frac{S_i^t}{S_i^0}\right) \quad (5)$$

$$\Delta P_{tec} = \sum_i \frac{P_i^t - P_i^0}{\ln P_i^t - \ln P_i^0} \ln\left(\frac{T_i^t}{T_i^0}\right) \quad (6)$$

$$\Delta P_{ene} = \sum_i \frac{P_i^t - P_i^0}{\ln P_i^t - \ln P_i^0} \ln\left(\frac{E_i^t}{E_i^0}\right) \quad (7)$$

式中：ΔP_{eco} 为经济发展效应的贡献度，ΔP_{str} 为产业结构效应的贡献度，ΔP_{tec} 为技术效应的贡献度，ΔP_{ene} 为能源效率效应的贡献度。

其中，正值表示该指标的变化促进大气污染物排放量的增加，负值则表示该指标是大气污染物减排的驱动力。

1. 3 数据来源

本次研究所需的各省市大气污染物排放量数据来源于 1997 ～ 2014 年《中国环境统计年鉴》，主要选取工业废气、工业 SO_2、工业烟粉尘等 3 类指标。驱动因素分解主要采用《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》、各省历年统计年鉴等相关年份数据，选取各地区生产总值、工业增加值、工业煤炭消费量等指标。各变量的描述性统计结果见表 2。

表 2　各个变量的统计特征

Tab. 2　Statistical Characteristics of Each Variable

变量	单位	数量	均值	标准差	最小值	最大值
工业废气	百亿标 m^3	198	100.23	83.18	16.72	497.97
工业二氧化硫	万 t	198	60.23	24.73	17.29	131.2
工业烟粉尘	万 t	198	49.62	31.79	4.48	213.75
地区生产总值	亿元	198	9 302.07	9 664.07	723.18	59 753.37
工业增加值	亿元	198	3 879.25	4 400.94	225.36	25 503.86
工业煤炭消费量	万 t	198	6 240.02	4 536.88	1 161.00	27 494.00

2 结果分析

2. 1 大气污染物排放量的时空分布特征

利用 ArcGIS 工具将 1996 ～ 2013 年长江经济带 11 个省(市) 的大气污染物排放量，按照自然断裂点划分为从高到低的 6 个等级，基于大气污染物排放量随时间的变化特征，将 1996 ～ 2013 年的数据分为 1996 ～ 2001、2002 ～ 2007、2008 ～2013 年 3 组绘制其总体的空间分布图。

由图 1 可知，(1) 整体来看，1996～2013 年长江经济带 11 个省(市) 的工业废气排放量呈持续上升的趋势。从空间分布特征来看，工业废气排放量的“热”点区域主要集中在经济发达、工业数目较多的东部地区，其中，江苏省各年份的工业排气排放总量均为最高，存在着传统工业比重较大、资源环境约束性日益增强、经济发展与生态环境不协调、产业布局不够优化等问题[36]。空间上，由于产业转移，大气污染逐渐向中部、西部转移，呈现明显的扩张趋势。总之，工业废气存在区域性特征，中西部大气污染日益严重。未来，优化产业布局，控制东部地区污染物的排放并且做好污染向中西部扩散的预防措施尤为重要。(2) 1996 ～ 2013 年各地区工业 SO_2 的排放量以 2007 年为极大值点。1996 ～ 2007 年期间，除上海外，由于工业化的加速推进，各地区的工业 SO_2 持续增加，2007 年后，政府加大环保力度，加快产业结构调整速度、关停小火电机组、化工、钢铁等污染严重产业，树立社会节能减排意识，因此，各地区的 SO_2 排放量呈现出明显的下降趋势。空间分布上，中部地区的工业 SO_2 排放相对较低，东部的江苏省和西部的四川省工业 SO2 排放量较高，SO_2 减排、产业结构调整仍需引起重视。(3) 工业烟粉尘基本呈现“先增加后减少”的趋势，具有显著的空间异质性。1996 ～2013 年，东部地区工业烟粉尘排放总量总体下降，中、西部地区分别以 2007、2001 年为拐点呈现出“先增后减”的趋势。表明，1996 ～ 2007 年，工业烟粉尘排放总量存在东部向中西部转移的趋势，以中部地区为主，工业烟粉尘排放量的增加持续到 2007 年。2007 ～ 2013 年，多数省份的工业烟粉尘排放量开始下降，工业烟粉尘的减排效果显现，反映出政府对工业烟粉尘减排的重视，相关减排措施的实施到位。

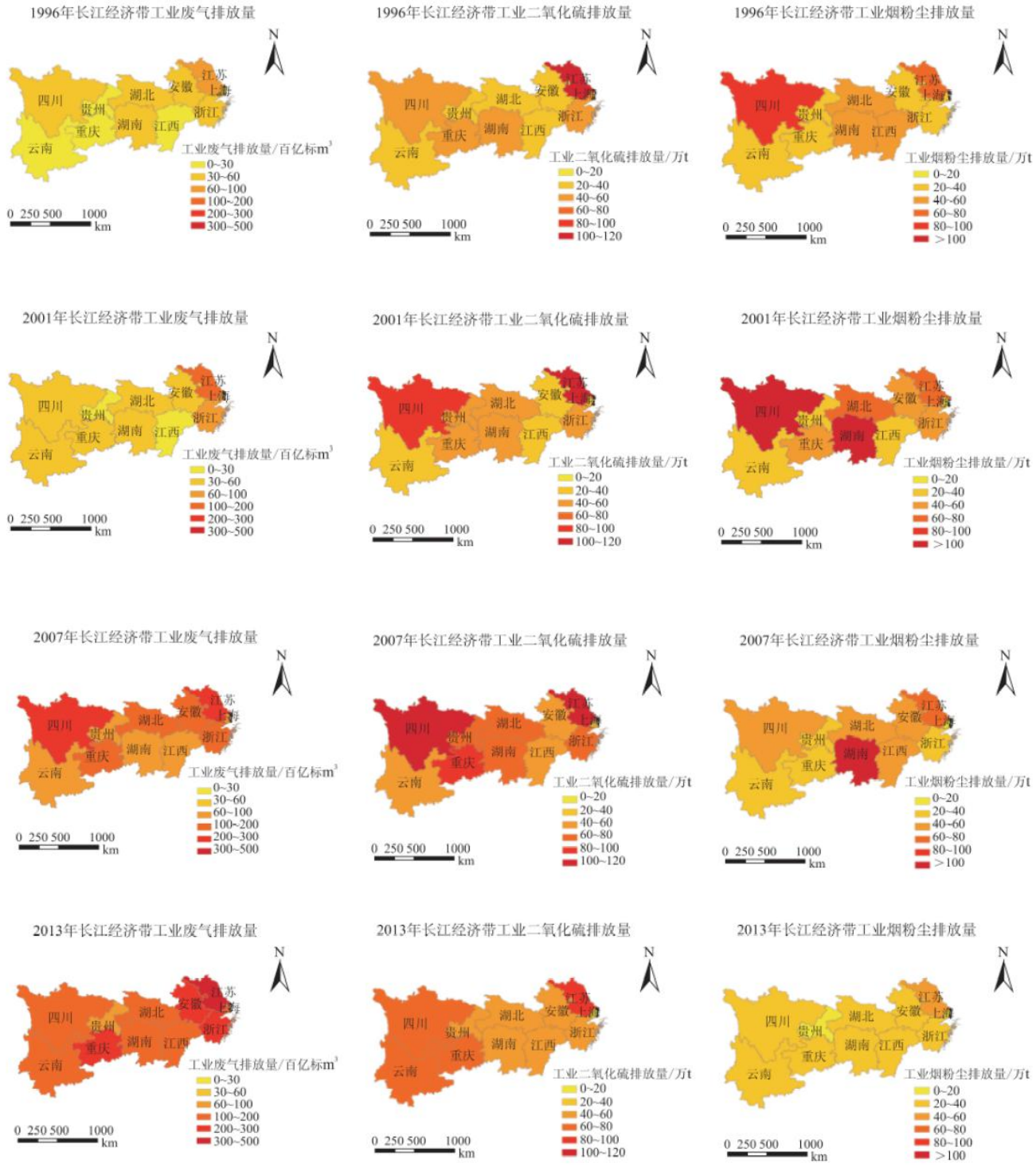


图 1　1996~2013 年长江经济带省域大气污染物排放量空间分布特征

Fig. 1　Spatial Distribution Characteristics of Air Pollutant Emissions from the Yangtze River Economic Belt in Provincial during 1996-2013

2. 2 工业经济增长与大气污染物排放的脱钩程度

1996 ～ 2013 年，长江经济带各地区工业废气、工业 SO_2、工业烟粉尘排放与 GDP 脱钩指数的计算结果如表 3 所示。(1) 从

工业废气排放与工业 GDP 脱钩指数的计算结果来看，长江经济带地区整体经历了从扩张性负脱钩到相对脱钩发展的趋势，表明在此期间，经济发展的同时，工业废气排放带来的污染同步增长。除江西、湖南、贵州的脱钩指数持续上升外，上海、江西、浙江等地的脱钩指数呈先下降后上升的趋势，相比之下，安徽、重庆等地的脱钩指数经历了先上升后下降的发展趋势。其中，上海、江西、湖北、湖南 3 段时期均处于相对脱钩状态，工业废气排放增加率低于经济增长率，经济发展与环境呈良性互动； 云南、贵州 3 段时期均处于扩张性负脱钩状态，工业废气排放的增长速度超过经济增长速度，工业增长持续向高工业废气排放方向发展。2002 ～ 2007 年期间，西部地区重庆、四川、云南、贵州均处于扩张性负脱钩状态，说明这段时期西部地区经济增长对环境的压力增大，环境恶化现象较为严重。(2) 从工业 SO_2 排放与工业 GDP 脱钩指数的计算结果来看，长江经济带地区的脱钩指数整体上经历了从相对脱钩向绝对脱钩发展的趋势，工业 SO_2 排放增加率逐渐低于经济增加率，说明经济发展与环境呈良性互动关系，工业 SO_2 排放开始得到控制和改善。其中，1996～ 2001 年期间除上海、贵州外所有地区以及 2002～ 2007 年期间所有地区均处于相对脱钩状态，虽然工业 SO2 的增加速度未超过经济增长速度，但这些地区的经济增长伴随着污染排放物的增加；2008 ～ 2013 年期间，除云南、贵州外长江经济带所有地区均经历了从相对脱钩到绝对脱钩的发展阶段，其脱钩指数除云南外均呈下降的趋势，表明这些地区经济发展的同时工业 SO_2 排放量在降低。(3) 从工业烟粉尘排放与工业 GDP 脱钩指数的计算结果来看，长江经济带整体上经历了从相对脱钩向绝对脱钩发展的趋势，说明工业经济增长不断向低烟粉尘排放方向发展。其中，上海经历了绝对脱钩到扩张性脱钩的发展阶段，表明工业增长不断向高工业空气废弃物排放方向发展，相比之下，浙江、安徽、湖北、湖南等地经历了从扩张性负脱钩或相对脱钩向绝对脱钩的发展的趋势，工业烟粉尘排放增加率逐渐低于经济的增长速率，经济发展与环境呈良性互动。

表 3　1996~2013 年各地区工业大气污染物排放与 GDP 脱钩指数

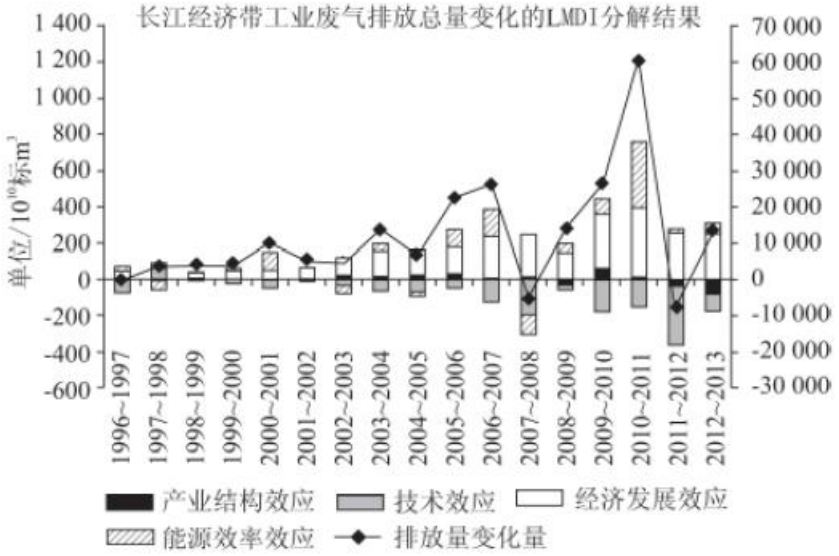
Tab. 3　Decoupling Index of Industrial Air Pollutant Emissions and GDP in Each Area during 1996-2013

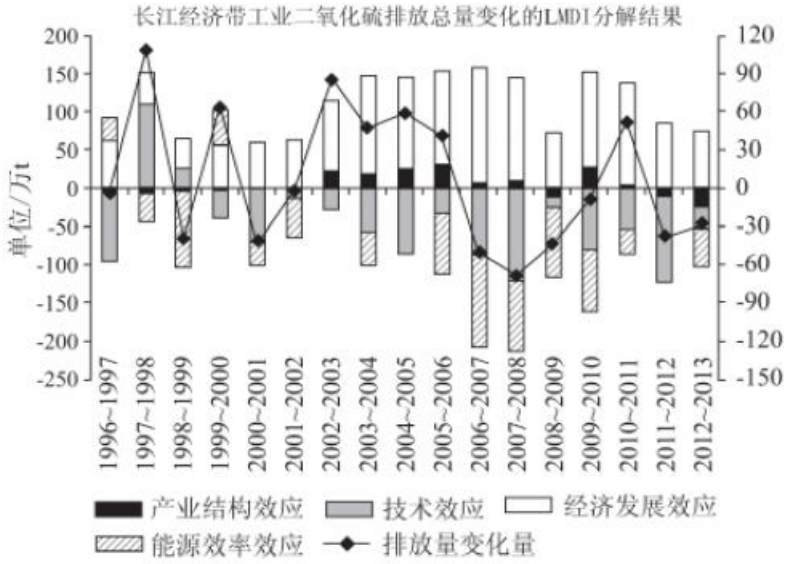
指标	工业废气排放与 GDP 脱钩指数			工业二氧化硫排放与 GDP 脱钩指数			工业烟粉尘排放与 GDP 脱钩指数		
年份	1996~2001	2002~2007	2008~2013	1996~2001	2002~2007	2008~2013	1996~2001	2002~2007	2008~2013
上海	0.94	0.25	0.99	-0.62	0.10	-1.50	-1.22	-0.27	1.36
江苏	1.44	0.39	1.45	0.08	0.06	-0.23	-0.10	0.01	-0.16
浙江	2.65	0.70	0.74	0.64	0.20	-0.36	1.05	-0.18	-0.22
安徽	0.49	1.05	0.52	0.14	0.32	-0.07	0.30	0.17	-0.25
江西	0.02	0.55	0.89	0.00	0.51	0.05	-0.23	0.13	-0.24
湖北	0.49	0.43	0.56	0.36	0.19	-0.05	0.62	-0.14	-0.21
湖南	0.25	0.65	0.66	0.25	0.17	-0.10	1.77	0.03	-0.48
重庆	-0.24	1.85	0.38	1.43	0.15	-0.27	0.79	-0.03	-0.38
四川	0.92	1.16	0.39	2.09	0.05	-0.17	1.13	-0.29	-0.19
云南	4.58	1.05	1.10	0.40	0.45	0.55	0.79	0.33	0.36
贵州	1.26	1.32	2.06	-0.04	0.40	0.04	0.83	-0.22	-0.04
合计	1.01	0.72	0.92	0.30	0.19	-0.11	0.52	-0.08	-0.31

2. 3 基于 LMDI 模型的驱动因素分析

2. 3. 1 长江经济带大气污染物排放总量变化的影响因素分解

图 2 是长江经济带大气污染物排放总量变化的 LMDI 分解结果图。从工业废气排放总量的角度看，1996 ～ 2013 年长江经济带工业废气排放总量增长 1 992. 38×1010 标 m^3，其中产业结构效应 23.29×1010 标 m^3，技术效应－ 1383. 42×1010 标 m^3，经济发展效应 2 589. 51 × 1010 标 m^3，能源效率效应是 763×1010 标 m^3，对工业废气排放量变化的贡献度分别为 1. 17%、－69. 44%、129. 97%、38. 30%。由此可以看出，经济发展效应和能源效率效应(煤炭使用强度) 是促使工业废气排放的主要因素； 未来，长江经济带的工业发展需注重绿色发展和能源结构调整。技术效应是约束工业废气总量增加的主要途径，除个别年份(1997 ～1999 年) 外，与工业废气排放负相关，对工业废气的减排起到了主要作用。产业结构效应对工业废气排放的总体影响较小。


长江经济带工业废气排放总量变化的LMDI分解结果
单位/10^{10}标m^3
1 400
1 200
1 000
800
600
400
200
0
-200
-400
-600
70 000
60 000
50 000
40 000
30 000
20 000
10 000
0
-10 000
-20 000
-30 000
1996~1997
1997~1998
1998~1999
1999~2000
2000~2001
2001~2002
2002~2003
2003~2004
2004~2005
2005~2006
2006~2007
2007~2008
2008~2009
2009~2010
2010~2011
2011~2012
2012~2013
产业结构效应
技术效应
经济发展效应
能源效率效应
排放量变化量


长江经济带工业二氧化硫排放总量变化的LMDI分解结果
单位/万t
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
120
90
60
30
0
-30
-60
-90
-120
-150
1996~1997
1997~1998
1998~1999
1999~2000
2000~2001
2001~2002
2002~2003
2003~2004
2004~2005
2005~2006
2006~2007
2007~2008
2008~2009
2009~2010
2010~2011
2011~2012
2012~2013
产业结构效应
技术效应
经济发展效应
能源效率效应
排放量变化量

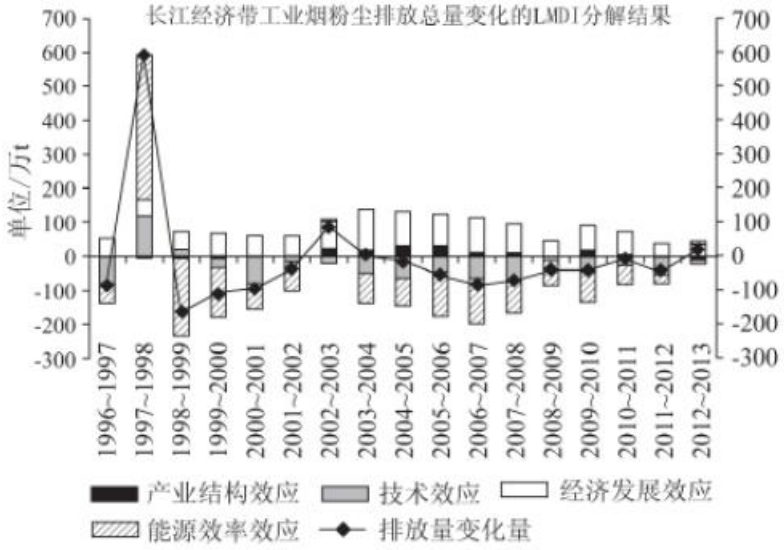


图 2　大气污染物排放变化的影响因素分解

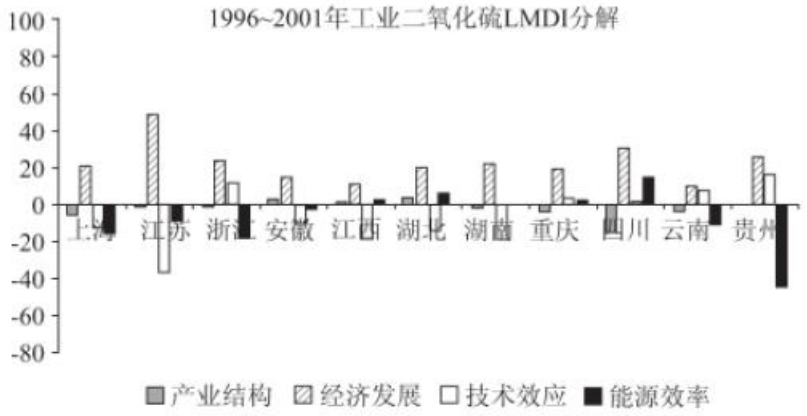
Fig. 2　Decomposition of the Influencing Factors the Change of Atmospheric Pollutant Emission

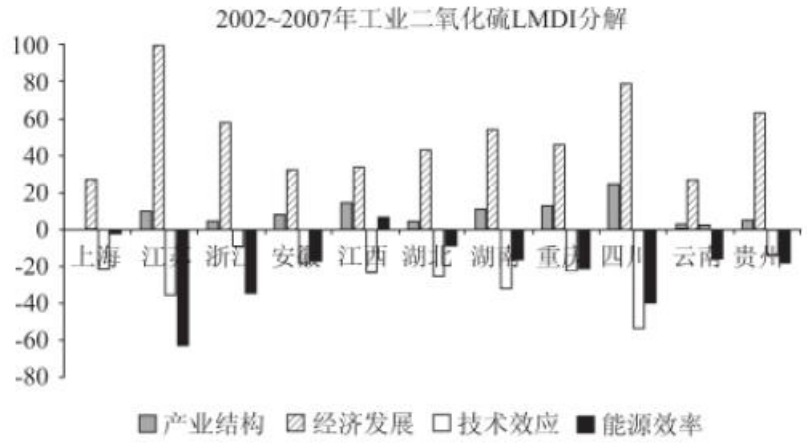
从工业 SO_2 排放总量的角度看，1996 ～ 2013 年长江经济带工业 SO_2 排放总量增加 122. 16 万 t，其中，产业结构效应 75. 75 万 t，技术效应－758. 80 万 t，经济发展效应 1548. 69 万 t，能源效率效应－743. 49 万 t，对工业 SO_2 排放量变化的贡献度分别为 62. 01%、－621. 15%、1267. 76%、－608. 62%，经济发展效应始终是工业 SO_2 排放量增加的主要影响因素； 2002 ～ 2008、2009 ～ 2011 年期间，产业结构效应增加了 SO_2 排放量； 技术效应和能源率效应对工业 SO_2 减排起到重要作用，两者的共同作用在相当程度上抵消了经济发展效应，抑制了工业 SO_2 排放量的增加。

从工业烟粉尘排放总量情况来看，1996 ～2013 年长江经济带工业烟粉尘排放总量减少 169. 15 万 t，其中产业结构效应 89. 17 万 t，技术效应－526. 43 万 t，经济发展效应 1 193. 82 万 t，能源效率效应－925. 71 万 t，对工业烟粉尘排放量变化的贡献度分别为 52. 72%、－ 311. 22%、705. 78%、－547. 27%，工业烟粉尘排放量增加的主要影响因素是经济发展，但近年来，经济发展效应增速有所放缓； 产业结构效应在个别年份(2000 ～ 2001、2002 ～ 2008、2009 ～ 2011 年) ，对工业烟粉尘排放总量的增加起到推动作用； 工业烟粉尘减排的主要驱动力是能源效率效应，但目前，能源效率的减排效应存在减弱的趋势； 除个别年份(1997 ～ 1999 年) 外，技术效应对工业烟粉尘排放总量减排均起到了重要作用。

2. 3. 2 省域大气污染物排放总量变化的影响因素分解

根据工业废气的 LMDI 分解结果，经济发展效应均为正值，是影响各地区工业废气排放总量增加的主要因素，在时间序列上，呈现出持续上升的趋势，说明经济的持续高速发展伴随着工业废气带来的污染加剧； 产业结构效应逐渐成为各地区减排的驱动力，呈现出空间分布差异，东部和西部地区经历了“正—负”交替变化过程，中部地区的产业结构在 3 个时期内均为正向，表明东、西部地区通过产业结构的调整抑制了工业废气排放量的增加，合理的产业结构成为工业废气减排的驱动力，而中部地区的产业结构仍是工业废气排放量增加的影响因素； 技术效应是各地区进行工业废气减排的主要驱动力，大部分地区的技术效应呈持续上升的趋势，反映出随着时代发展，提高技术水平成为工业废气减排的重要方式；图 3 省域工业废气排放变化的影响因素分解能源效率是工业废气排放总量增加的重要影响因素，煤炭燃烧产生大量工业废气，是排放总量增加的重要原因，因此，各行业需加强煤炭技术改进，提高能源利用效率，减少工业废气排放。





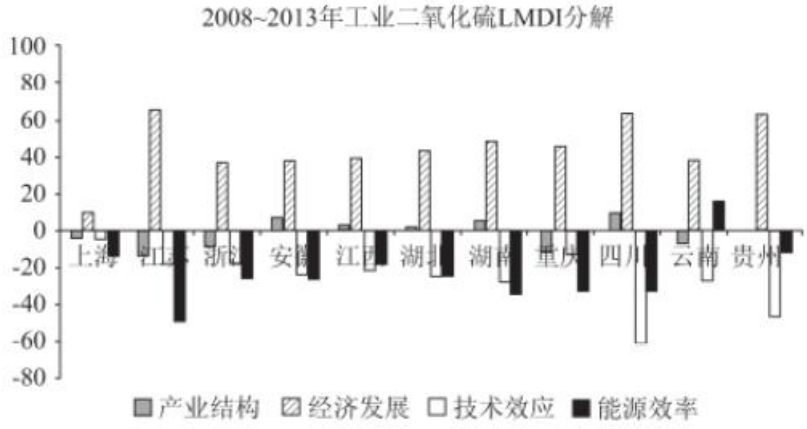
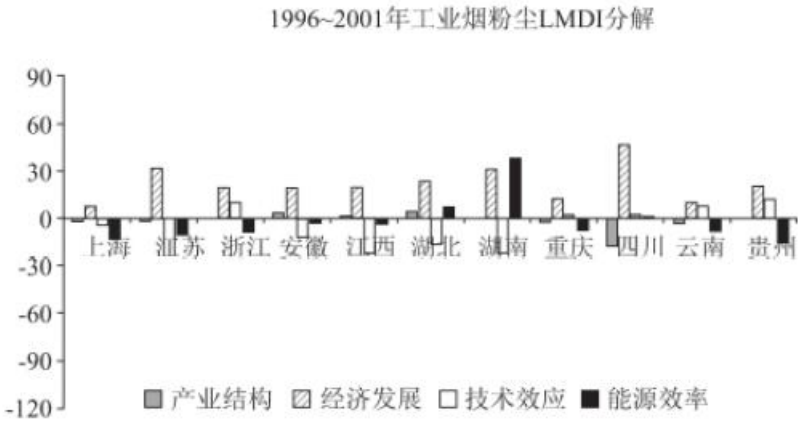
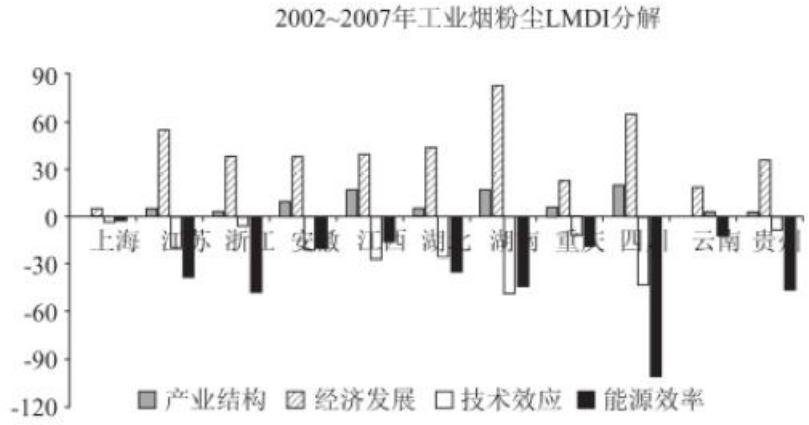


图 4　省域工业 SO_2 排放变化的影响因素分解

Fig. 4　Decomposition of Influencing Factors on the Change of Industrial Sulfur Dioxide Emission in the Province

根据工业 SO_2 的 LMDI 分解结果，经济发展对各地区工业 SO_2 排放量的增加起到主要作用，从单个省份纵向变化来看，安徽、江西、云南、贵州 4 省的经济发展效应持续上升，与之相反，其他地区的经济发展效应呈现出先增后降的发展趋势； 工业 SO_2 的产业结构效应和工业废气的产业结构效应变化趋势基本一致，近年来，减排效应开始凸显，存在东、中、西空间分布差异，东、西部的产业结构促进工业 SO_2 减排，中部地区则相反； 技术效应和能源效率效应是各地区工业 SO_2 减排的 2 个主要驱动力，两者的共同作用，基本抵消经济发展效应带来的工业 SO_2 排放增加量，东部和中部的技术效应在研究期内始终是减排的主要驱动力，西部地区的技术效应则经历了由抑制到推动减排的转化过程； 近年来，能源效率对工业 SO_2 的减排作用日益增强，上海、江苏、浙江、安徽、湖南、重庆的能源效率效应超过技术效应，成为实现区域 SO_2 减排的主要影响因素。





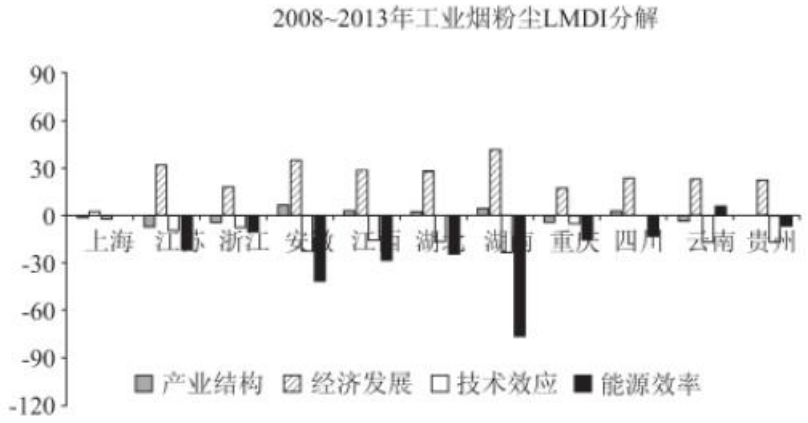


图 5　省域工业烟粉尘排放变化的影响因素分解

Fig. 5　Decomposition of Influencing Factors on the Change of Industrial Smoke Dust Emission in the Province

根据工业烟粉尘的 LMDI 分解结果，11 个省区的经济发展均是造成各地区工业烟粉尘排放量增加的主要原因，随时间的变化，上海的经济发展效应持续下降，与之相反，云南的经济发展效应持续上升，除此之外，其他 9 个省区的经济发展效应均经历了先升后降的过程，反映出长江经济带各省(市) 均加快经济增长方式，推动工业优化升级，加强对工业烟粉尘相关的高污染行业的监控。工业烟粉尘产业结构效应和其他 2 个大气污染指标一样，作用效果较小，呈现出显著的空间分布差异，中部地区的产业结构有待改善。技术效应是烟粉尘减排的重要影响因素，但近年来，除浙江、安徽、云南、贵州 4 省的技术效应减排呈持续上升的趋势外，其他地区的减排效应均呈下降的趋势； 能源效率的提高是各地区实现工业烟粉尘减排的主要驱动力，同样表现出地域差异，东部和西部地区的能源效率效应有所减弱，中部 4 省的能源效率对工业烟粉尘的减排推动持续加强。

3 结论

工业发展与大气环境的相互作用关系研究，不仅是经济与环境协调发展的重要内容，也是引导区域发展和制定环境政策的重要依据。论文利用脱钩分析模型和 LMDI 分解模型，定量分析了 1996 ～ 2013 年长江经济带各地区经济增长与大气环境的协调性及影响因子的时空差异特征，主要结论如下:

(1) 长江经济带 11 个省(市) 的工业废气排放量呈持续上升的趋势，且工业废气排放量的“热”点区域主要集中在东部地区。工业 SO_2 和烟粉尘两种大气污染物排放量总体呈现“先增加后减少”的趋势，状况有所改善。

(2) 长江经济带工业废气排放整体经历了从扩张性负脱钩到相对脱钩发展的趋势，表明在此期间，经济发展的同时，工业废气排放带来的污染同步增长。经济发展效应和能源效率效应(煤炭使用强度) 是促使工业废气排放的主要因素；技术效应是实现工业废气减排的主要途径。未来，长江经济带的工业发展需注重绿色发展和能源结构调整。

(3) 长江经济带的工业 SO_2 排放整体上经历了从相对脱钩向绝对脱钩发展的趋势，说明工业经济增长向低 SO_2 排放方向发展。经济发展对各地区工业 SO_2 排放量的增加起到主要作用，并主要体现在安徽、江西、云南、贵州等 4 省； 技术效应和能源效率效应是各地区工业二氧化硫减排的两个主要驱动力。

(4) 长江经济带的烟粉尘排放整体上经历了从相对脱钩向绝对脱钩发展的趋势，经济发展均是造成各地区工业烟粉尘排放量增加的主要原因。技术效应和能源效率是各地区烟粉尘减排的重要影响因素。

总的来看，长江经济带的工业废气排放总体形势不容乐观，但在两类污染物减排上取得了一定成效。技术效应一直是各地区污染物减排的主要驱动力，减排的效果趋于稳定； 产业结构效应逐渐成为污染物减排的影响因素，但作用效果仍较小，存在明显的空间分布差异； 能源效率效应推动工业废气排放量的增加，对工业 SO_2 的减排作用日益明显，但对工业烟粉尘的减排有所减弱。因此，在未来的发展中，大气污染物的技术效应减排潜力有限，但各区域仍需确保最新清洁技术的使用； 能源效率效应需引起重视，各行业在燃煤技术上的改进有待加强，在燃煤过程中大气污染物排放有待减少，改造火电厂，更新燃煤工业锅炉等，走清洁煤道路实现煤炭的清洁利用； 将产业结构调整提升为减排的重要途径迫在眉睫，根据产业结构效应的东中西部空间分布差异，东部省区作为产业结构升级的前沿战地，应继续调整产业结构，从源头上预防大气污染物的排放，中部和西部省区作为长江经济带产业结构转移的承接地，均需要严格控制转移产业，以期有效控制污染物的排放和避免新的污染热点区出现。

参考文献:

[1] 陆大道. 建设经济带是经济发展布局的最佳选择———长江经济带经济发展的巨大潜力[J]. 地理科学，2014，34(7) :769－772.

【LU D D. Economic belt construction is the best choice of economic development layout: the enormous potential for the Changjian River Economic Belt [J]. Scientia Geographica Sinica，2014，34(7) : 769－772. 】

[2] 虞孝感. 长江产业带的建设与发展研究[M]. 北京: 科学出版社，1997.

【YU X G. Study on the construction and development of the Yangtze River Industrial Belt [M]. Beijing: Science Press，1997. 】

[3] 虞孝感，张维阳. 沿江开发成就卓著环境保护任重道远—热烈祝贺“长江流域资源与环境”创刊二十周年[J]. 长江流域资源与环境，2012，21(7) : 781－785.

【YU X G，ZHANG W Y. Outstanding the achievements of development along the Yangtze River，environmental protection has a long way to go—Warmly celebrate 20th anniversary of Resources and Environment in the Yangtze Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2012，21 (7) : 781 －785. 】

[4] 王露，黄德春，Rauschenbach Thomas，等. “长江经济带”对“世界水谷”建设的战略需求[J]. 水利经济，2016，34(1) : 74－77.

【WANG L，HUANG D C，RAUSCHENBACH THOMAS，et al. Strategic demand of Yangtze River Economic Belt for construction of World Water Valley [J]. Journal of Economics of Water Resources，2016，34(1) : 74－77. 】

[5] 杨倩，胡锋，陈云华，等. 基于水经济学理论的长江经济带绿色发展策略与建议[J]. 环境保护，2016，44(15) :36－40.

【YANG Q，HU F，CHEN Y H，et al. Green Development Strategy and Advices for Yangtze River Economic Belt Based on Water-Economics Theroy [J]. Environmental Protection，2016，44(15) : 36－40. 】

[6] WILLISON J H M，LI R，YUAN X. Conservation and ecofriendly utilization of wetlands associated with the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science & Pollution Research，2013，20(10) : 6907－6916.

[7] WU J, ZENG H, YU H, et al. Water and Sediment Quality in Lakes along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China [J]. Water Resources Management, 2012, 26(12) :3601－3618.

[8] 刘满芝，杨继贤，马丁，等. 基于 LMDI 模型的中国主要大气污染物的空间差异及其影响因素分析 [J]. 资源科学，2015，37(2) : 333－341.

【LIU M Z, YANG J X, MA D, et al. Spatial disparity and factor analysis of major air pollutant emissions in China based on LMDI methods [J]. Resources Science, 2015, 37(2) : 333 －341. 】

[9] 刁贝娣，曾克峰，苏攀达，等. 中国工业氮氧化物排放的时空分布特征及驱动因素分析 [J]. 资源科学，2016，38(9) :1768－1779.

【DIAO B D, ZENG K F, SU P D, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of provincial industrial NOx emissions and driving factors in China from 2006 to 2013 [J]. Resources Science, 2016, 38(9) : 1768－1779.】

[10] 周侃. 中国环境污染的时空差异与集聚特征 [J]. 地理科学，2016，36(7) : 989－997.

【ZHOU K. Spatial-temporal Differences and Cluster Features of Environmental Pollution in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(7) : 989－997. 】

[11] 周侃，樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素———基于 339 个地级行政单元截面数据的实证分析 [J]. 地理学报，2016，71(11) : 1911－1925.

【ZHOU K, FAN J. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: Based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11) : 1911 －1925. 】

[12] HE J. What is the role of openness for China’s aggregate indus trial SO_2 emission? A structural analysis based on the Divisia decomposition method [J]. Ecological Economics, 2010, 69(4) : 868－886.

[13] FUJII H, MANAGI S, KANEKO S. Decomposition analysis of air pollution abatement in China: empirical study for ten industrial sectors from 1998 to 2009 [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 59(18) : 22－31.

[14] 程钰，徐成龙，任建兰，等. 山东省工业结构演变的大气环境效应研究 [J]. 中国人口·资源与环境，2014，24(1) :157－162.

【CHENG Y, XU C L REN J L, et al. Atmospheric Environment Effect of Industrial Structure Evolution in Shandong Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1) : 157－162. 】

[15] XU B, LIN B. Regional differences of pollution emissions in China: contributing factors and mitigation strategies [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 112(4) : 1454－1463.

[16] 王菲，董锁成，毛琦梁，等. 宁蒙沿黄地带产业结构的环境污染特征演变分析[J]. 资源科学，2014，36（3）:620

－631.

【WANG F，DONG S C，MAO Q L，et al. Analysis of the Environment- Pollution Bias of Industrial Structure in Areas Along the Yellow River in Ningxia and Inner Mongolia [J]. Resources Science，2014，36(3) : 620－631. 】

[17] 程钰，徐成龙，刘雷，等. 1991－2011 年山东省工业经济增长的大气污染效应及其时空格局———以 SO2 和粉尘为例 [J]. 地理科学进展，2013，32(11) : 1703－1711.

【CHENG Y，XU C L，LIU L，et al. Effect of industrial growth on atmospheric pollution and its spatio-temporal pattern in Shandong Province during 1991－2011: Tanking SO2 and dust emissions as example [J]. Progress in Geography，2013，32(11) :1703－1711. 】

[18] 徐成龙，程钰. 新常态下山东省环境规制对工业结构调整及其大气环境效应研究 [J]. 自然资源学报，2016，31(10) : 1662－1664.

【XU C L，CHENG Y. The Action of Environmental Regulation on Industrial Structure Adjustment and Atmospheric Environment Effect under the New Normal in Shandong Province [J]. Journal of Natural Resources，2016，31(10) : 1662－1664. 】

[19] 傅强，陈雪娇. 重庆市产业结构演变对大气环境的影响分析 [J]. 中国科技论坛，2011，(8) : 36－41.

【FU Q，CHEN X J. The Influence of Industrial Structure Evolution on Atmospheric Environment-Based on the Panel Data of Industries in Chongqing [J]. China Science and Technology Forum，2011(8) : 36－41. 】

[20] WU L，ZENG W. Research on the Contribution of Structure Adjustment on SO_2，Emissions Reduction-Case Study Shijingshan District，Beijing [J]. Procedia Environmental Sciences，2013，18: 849－855.

[21] HEAL M R，KUMAR P，HARRISON R M. Particles，air quality，policy and health. [J]. Chemical Society Reviews，2012，41(19) : 6606－30.

[22] CHEN Z，WANG J N MA G X，et al. China tackles the health effects of air pollution [J]. The Lancet，2013，382 (9909) :1959－1960.

[23] ZHANG Y，WANG S G，et al. Association of ambient air pollution with emergency room admissions for respiratory and cardiovascular disease in Beijing，China [J]. Biomedical and Environmental Sciences，2015，28(5) : 749－762.

[24] DE BRUYN S M，OPSCHOOR J B. Developments in the throughout-income relationship: Theoretical and empirical observations [J]. Ecological Enonomics，1997，20 (3) : 255 －268.

[25] SIGRID S. Delinking economic growth from environmental degradation? A literature survey on the environmental Kuznets curve hypothesis [J]. Working Papers，1999，13(3) : 96－9.

［26］ 赵兴国，潘玉君，赵波，等. 区域资源环境与经济发展关系的时空分析［J］. 地理科学进展，2011，30(6)：706－714.

【ZHAO X G，PAN Y J，ZHAO B，et al. Temporal-spatial evolution of the relationship between resource environment and economic development in China: A method based on decoupling［J］. Progress in Geography，2011，30(6) : 706－714. 】

［27］ TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland between1970 and 2001［J］. Transport Policy，2005，12 (2) : 137 －151.

［28］ 王君华，李霞. 中国工业行业经济增长与CO_2排放的脱钩效应［J］. 经济地理，2015，35(5) : 106－110.

【WANG J H LI X. The Effect of Sector Decoupling between China′s Industrial Economic Growth and Carbon Dioxide Emissions［J］. Economic Geography，2015，35(5) : 106－110. 】

［29］ 张小平，郭灵巧. 甘肃省经济增长与能源碳排放间的脱钩分析［J］. 地域研究与开发，2013，32(10)：95－104.

【ZHANG X P，GUO L Q. Decoupling Analysis of Economic Growth and Energy Carbon Emissions in Gansu Province［J］. Areal Research and Development，2013，32(10) : 95－104. 】

［30］ ANG B W，CHOI K H. Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined divisia index method［J］. The Energy Journal，1997，18(3) : 59－74.

［31］ ANG B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation［J］. Energy Policy，2015，86: 233－238.

［32］ 柏延臣，冯学智. 空间数据分析与空间模型［J］. 地理研究，1999，18(2) : 185－190.

【BAI Y C，FENG X Z. Spatial data analysis and spatial models［J］. Geographical Research，1999，18(2) : 185－190. 】

［33］ 李国璋，王双. 中国能源强度变动的区域因素分析———基于 LMDI 分解方法［J］. 财经研究，2008，34 (8) : 52 －62.

【LI G Z，WANG S. Regional Factor Decompositions in China’s Energy Intensity change: Based on LMDI Technique［J］. Journal of Finance and Economics，2008，34(8) : 52－62. 】

［34］ GENG Y，WANG M，SARKIS J，et al. Spatial-temporal patterns and driving factors for industrial waste water emission in China［J］. Joural of Cleaner Production，2014，76(4) : 116－124.

［35］ CHEN Y，XU R. Clean coal technology development in China［J］. Energy Policy，2010，38(5) : 2123－2130.

［36］ 仇方道，唐晓丹，张纯敏，等. 江苏省工业转型的时空分异特征与机理［J］. 地理研究，2015，34(4)：787－800.

【QIU F D，TANG X D，ZHANG C M，et al. Characteristics and mechanism of spatial-temporal differentiation in Jiangsu province during the period of industrial transformation［J］. Geographical Research，2015，34(4)：787－800.】