

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元*

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 长江经济带发展强调“不搞大开发, 共抓大保护”战略, 长江生态环境修复成为该地区发展的重要内容, 因此探明长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素具有重要意义。选取 2013 ~ 2017 年长江经济带 102 个城市的工业 SO_2 、工业废水以及工业烟粉尘排放量作为基础数据, 运用空间自相关分析和冷热点分析方法 (Getis-Ord G_i^*), 揭示了长江经济带工业污染排放空间分布格局; 采用对数平均迪氏分解模型 (logarithmic mean Divisia index, LMDI) 对长江经济带工业污染排放的影响因素进行分解。结果表明, 2013 ~ 2017 年长江经济带的工业 SO_2 、工业废水以及工业烟粉尘排放量呈降低趋势, 高排放城市减少, 低排放城市增多; 各工业污染物随时间变化, 空间关联程度增强; 技术改善对工业污染排放有显著抑制作用, 是影响长江经济带工业污染排放的最主要因素。

关键词: 长江经济带; 工业污染; 空间格局; 影响因素; 对数平均迪氏分解模型 (LMDI)

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3820-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011017

Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt

LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan*

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The development of Yangtze River economic belt emphasizes the strategy of "no large-scale development, joint efforts in large-scale protection". The restoration of the Yangtze River environment has become an important part of the development of the region. Therefore, it is important to explore the spatial distribution of industrial pollution emissions and its influencing factors in the Yangtze River economic belt. Using industrial SO_2 , wastewater, and soot emission data from 102 cities in the Yangtze River economic belt, from 2013 to 2017, this study analyzes the spatial distribution of industrial pollution emissions in the Yangtze River economic belt. This was achieved using spatial autocorrelation analysis and Getis-Ord G_i^* methods, and by adopting the logarithmic mean Divisia index model to decompose the influencing factors of industrial pollution emissions in the Yangtze River economic belt. The results show that from 2013 to 2017, the emissions of industrial SO_2 , wastewater, and soot in the Yangtze River economic belt exhibited a downward trend, with a decrease in the number of high-emission cities and an increase in the number of low-emission cities. The spatial correlation of industrial pollutants increased with time, and technological improvements had the most significant inhibitory effect, making it the most important factor affecting industrial pollution emissions in the Yangtze River economic belt.

Key words: Yangtze River economic belt; industrial pollution; spatial pattern; impacting factors; logarithmic mean Divisia index model (LMDI)

2013 年以来, 长江经济带发展成为新时期国家重大发展战略, 为推动该地区经济高质量发展, 国家对其产业布局和生态环境等做出一系列重大战略部署, 对长江经济带工业污染排放产生重大影响。长江经济带横跨我国东中西三大区域, 包括上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州等 11 省/直辖市, 依托长江干支流的生态资源和“黄金水道”的核心优势, 成为我国经济发展最迅速的地区之一, 地区生产总值占全国比重超过 45%^[1]。统计资料显示^[2,3], 全国 47% 的石化产业、53% 的有色金属冶炼、42% 的制革产业布局在长江沿线, 废水排放总量占全国的 40% 以上, 工业 SO_2 和工业烟粉尘排放量占全国的 20% 以上^[3], 引起“化工围江”、“污水入江”和“湿地萎缩”等一系列环境问题。因此在长江经济带“不搞大开发, 共抓大

保护”的背景下, 深入研究长江经济带工业污染排放的空间分布格局及其影响因素对推动该地区绿色发展具有重要意义。

20 世纪 90 年代至今, “库兹涅茨曲线”对于环境质量与经济增长呈倒“U”型关系的假说, 得到大量研究实证^[4~6]。随着经济的快速发展, 环境污染逐渐加剧, 工业污染问题成为国内外学者关注的重点内容。就工业污染排放空间分布格局和影响因素而言, 其研究对象主要集中在 $\text{PM}_{2.5}$ ^[7,8]、 CO_2 ^[9,10] 以及 SO_2 ^[11~13], 研究多聚焦在国家或省级层面, 对地市尺

收稿日期: 2020-11-02; 修订日期: 2021-01-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1800305); 重庆市基础研究及前沿探索专项项目 (cstc2018jcyjAX0320)

作者简介: 李芸邑 (1990 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: liyunyi@cqu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: liuyuan yuan@cqu.edu.cn

度研究相对较少;研究方法涉及空间自相关分析^[14]、重心转移曲线^[14,15]、对数平均迪氏分解模型(logarithmic mean Divisia index model, LMDI)^[7,16]、环境 Kuznets 曲线^[6]、STIRPAT 模型^[17]和偏最小二乘法^[18]等方面,主要围绕不同污染物排放的空间相关性、不同地域间的差异性、污染排放的重心演变过程、影响因素解析以及环境污染与经济增长间相互关系等方面进行。相关研究表明,不同工业污染物在空间分布上存在差异性,排放量的影响因素主要有经济发展、产业结构以及技术进步等方面。目前,长江经济带工业污染排放空间分布格局的研究,主要集中在 11 个省/直辖市层级^[19~21],较少深入地城市/区范畴,无法全面反映该地区工业污染排放的空间分布格局;此外研究内容以经济增长对工业污染的影响为主^[22~24],难以准确反映近年来因大气、水和土壤污染防治攻坚等工作部署实现污染排放降低的效果。

本文以长江经济带作为研究对象,选取 2013~2017 年工业典型污染物 SO₂、废水以及烟粉尘的排放量来表征长江经济带工业污染水平,通过 ArcGIS 软件平台揭示研究区工业污染排放空间分布格局,并运用 LMDI 模型对工业污染排放的影响因素进行解析,量化各因素对工业污染排放的影响程度,以期对长江经济带绿色发展相关政策部署提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

以长江经济带 130 个城市作为研究对象,截取文献[2]中工业 SO₂、工业废水和工业烟粉尘排放量数据来表征长江经济带工业污染水平。同时依据各省市统计年鉴中工业生产总产值、地区生产总值、年末总人口等数据分析工业污染排放的影响因素。其中,两个直辖市(上海和重庆),杭州、南京、武汉和成都等省会城市,以及苏州和宁波等经济发展情况较好的地级市具有详细的数据(总共 102 个)。因此,本研究仅对有详细数据的 102 个城市进行分析。

1.2 研究方法

1.2.1 空间分布格局

(1) 全局自相关分析 全局自相关分析主要用来判断地理事物或属性的分布是否具有集聚现象,因此本研究运用此方法揭示长江经济带的工业 SO₂、工业废水以及工业烟粉尘的空间分布格局,选取 Moran's I 指数来测度不同城市间 3 种工业污染排放量的空间关系,该指数表示为^[20]:

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, I 为全局 Moran's I 指数, n 为研究所涉及的城市数量, x_i 和 x_j 为城市 i 和 j 的某一工业污染的排放量; $\bar{x}$ 为各城市某一工业污染排放量的年平均均值。 W_{ij} 为空间权重矩阵中的邻接矩阵,即空间相邻为 1,不相邻为 0。Moran's I 指数在 -1~1 之间,指数越趋近于 1,工业污染排放量的空间相关性越高,指数越趋近于 -1,工业污染排放量的空间异质性越高。采用标准化 Z 值来检验 Moran's I 指数的显著性^[25],公式如下:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}}$$

式中, $E(I)$ 和 $\text{VAR}(I)$ 分别是 Moran's I 的期望值和方差,当 $Z > 1.960$ 且通过 5% 的显著性水平检验,表明存在显著空间相关性。

(2) 冷热点分析法 冷热点分析方法(Getis-Ord G_i^*)能够识别数据高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类。本研究基于 ArcGIS 空间统计工具,运用冷热点分析法,揭示长江经济带 3 种工业污染排放的局部空间集聚,识别不同工业污染排放量的局部空间集聚(热点区)和低值集聚(冷点区)^[25],公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j}{\sum_{i=1}^n x_i}$$

式中, x_i 和 x_j 为城市 i 和 j 的某一工业污染排放量, W_{ij} 为空间权重矩阵(同上)。同样对 G_i^* 进行 Z 检验。若 $Z(G_i^*)$ 显著为正,说明工业污染排放量高值空间集聚,即为热点区;反之,则为冷点区。利用 Jenks 最佳自然段点法,将 $Z(G_i^*)$ 由高到低分为热点区、次热点区、次冷点区和冷点区 4 类。

1.2.2 影响因素分解

对于工业污染排放的影响因素,已有研究从经济发展、技术进步和产业结构等方面进行解析^[26~29],得到广泛认可。改善生产技术可以增大资源的利用率,降低污染排放;在寻求经济发展的工业化时代,工业结构变化会对污染排放产生影响;根据环境库兹涅茨曲线,环境质量与经济增长呈倒“U”型关系,随着经济的增长,污染水平呈先上升后下降的趋势;人口规模扩大会使生产规模扩张,从而影响工业污染排放。因此本研究选取技术改善效应、产业结构效应、经济发展效应和人口规模效应这 4 个方面,分析各因素对工业污染排放的影响。指标选取如表 1 所示。

表 1 工业污染排放影响因素指标选取及含义

Table 1 Index selection and explanation of factors affecting industrial pollution emissions

影响因素	指标	含义
技术改善效应	工业污染排放量与工业生产总值的比值	单位工业生产的工业污染排放量,反应资源利用率
产业结构效应	工业生产总产值占地区生产总值的比重	反映工业结构变化对工业污染排放的影响
经济发展效应	人口数与地区生产总值的比值	人均生产总值,体现经济发展对工业污染排放的影响
人口规模效应	年末人口数	反映人口规模扩张对工业污染物排放的影响

对数平均迪氏分解 (logarithmic mean Divisia index, LMDI) 是 1998 年在指数分解法 (index decomposition analysis, IDA) 基础上提出的一种因素分解模型^[30], 在因素分解过程中, 该模型不产生残差, 能解决零值问题, 可以测算某一影响因素在任何时期的变化对污染排放的净影响^[31], 被广泛运用于碳排放、能源以及环境等领域^[32~34]. 因此, 本研究选用 LMDI 模型揭示长江经济带工业污染排放的影响因素, 首先依据选取的 4 种影响因素建立 Kaya 恒等式:

$$W^t = \sum_i W_i^t = \sum_i \frac{W_i}{V_i} \cdot \frac{V_i}{G_i} \cdot \frac{G_i}{P_i} \cdot P_i$$
$$= \sum_i W_{tec,i} \cdot W_{str,i} \cdot W_{eco,i} \cdot W_{pop,i}$$

式中, W^t 表示第 t 年工业污染排放量; n 表示研究城市数量; W_i 表示 i 城市第 t 年的工业污染排放量; W_i 代表 i 城市的工业污染排放量; V_i 为 i 城市工业生产总产值; G_i 为 i 城市的地区生产总值; P_i 为 i 城市的年末总人口数. $W_{tec,i}$ 为技术改善效应; $W_{str,i}$ 为产业结构效应; $W_{eco,i}$ 为经济发展效应; $W_{pop,i}$ 为人口规模效应.

基于 LMDI 模型, 分解工业污染排放量的影响因素, 定量分析各因素对工业污染排放变化的影响, 各因素对工业污染排放的贡献量表示如下:

$$\Delta W_{tec,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{tec,i}^t}{W_{tec,i}^0} \right)$$
$$\Delta W_{str,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{str,i}^t}{W_{str,i}^0} \right)$$
$$\Delta W_{eco,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{eco,i}^t}{W_{eco,i}^0} \right)$$
$$\Delta W_{pop,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{pop,i}^t}{W_{pop,i}^0} \right)$$

式中, W_i^0 为基期年 i 城市的工业污染排放量; $\Delta W_{tec,i}$ 为技术改善效应对 i 城市工业污染排放的贡献量; $\Delta W_{str,i}$ 为产业结构效应对 i 城市工业污染排放的贡献量; $\Delta W_{eco,i}$ 为经济发展效应对 i 城市工业污染排放的贡献量; $\Delta W_{pop,i}$ 为人口规模对 i 城市工业污染排放的贡献量. 若贡献量为负, 说明该效应抑

制工业污染排放, 反之, 则促进工业污染排放.

2 结果与讨论

2.1 污染排放时间演变特征

2013 ~ 2017 年长江经济带的工业 SO_2 、工业废水和工业烟粉尘的年排放总量如图 1 所示. 工业 SO_2 年排放总量由 2013 年的 559.91 万 t 下降至 2017 年的 195.97 万 t, 降幅达 65%. 工业烟粉尘排放量在 2014 年达到峰值 361.36 万 t 后逐年降低, 至 2017 年总体下降 39%. 工业废水排放量波动相对较小, 但它的排放量巨大, 5 年间由 88.23 亿 t 降至 53.92 亿 t, 总体下降 39%. 值得注意的是, 2015 ~ 2016 年 3 种工业污染排放量降低速率加快, 分别占总体下降的 67%、53% 和 87%, 这可能与文献 [35, 36] 的颁布相关. 其中加快重点行业脱硫、脱硝和除尘改造工程建设, 推进挥发性有机物污染治理, 淘汰落后产能, 专项整治造纸、焦化、氮肥、有色金属、印染、制革、农药和电镀等行业, 全面推进清洁生产, 大力发展循环经济等措施, 促使长江经济带化工企业重视清洁生产和加大治污强度, 因此工业污染排放显著降低.

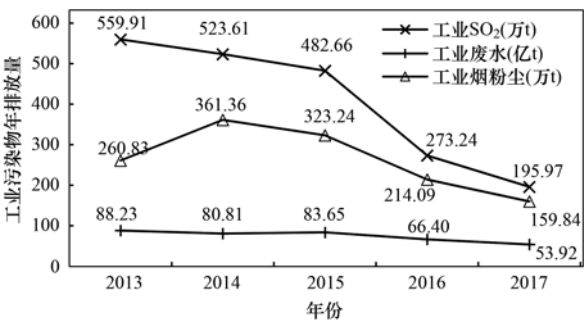


图 1 2013 ~ 2017 年长江经济带 102 个城市工业污染排放总量变化

Fig. 1 Changes in total industrial pollutant emissions of 102 cities in the Yangtze River economic belt from 2013 to 2017

2.2 污染排放空间分布格局

为探讨长江经济带各城市工业污染排放空间分布格局, 利用 ArcGIS 将 2013 年和 2017 年研究区 102 个城市的工业污染排放量按照 Jenks 最佳自然段点法划分为低、中低、中、中高和高这 5 个排放等级^[28], 如图 2 所示. 因为 3 种工业污染排放量存在

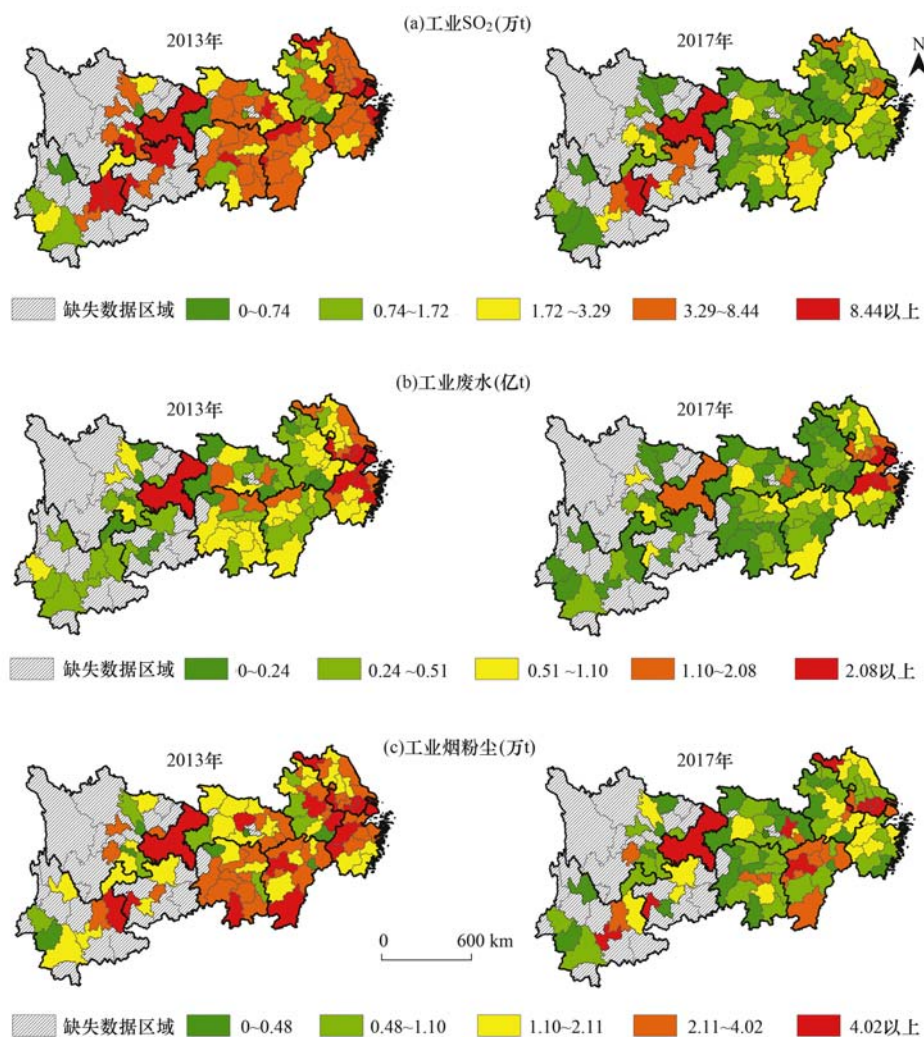


图2 长江经济带102个城市工业污染排放空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution of industrial pollutant emissions from 102 cities in the Yangtze River economic belt

差异,排放等级划分不同。

2013~2017年,工业SO₂高排放城市占比从16%下降至4%,主要分布于上游的重庆、曲靖和六盘水等地,这些城市平均排放量下降显著,降幅达57%;中高排放城市占比从51%下降至20%,以转变为中低和低排放城市为主;低排放城市占比从4%上升至26%,其中湖南省怀化、长沙和张家界排放量降低明显,降幅均达到80%以上。对于工业废水,2017年高排放城市仍出现在上海、苏州和杭州等经济发达地区,但其平均排放量降幅达24%;原高排放城市重庆转为中高排放状态,排放量由3.34亿t下降至1.93亿t;低排放城市占比从12%上升至41%,湖南省同样变化显著,平均排放量由0.69亿t降至0.26亿t,降幅达63%。5年间工业烟粉尘高排放城市变化不明显,占比为16%~17%,主要分布于重庆、苏州、无锡和宜春等地;中高排放城市明显减少,占比从37%下降至15%;低排放和中低排放城市增多,整体占比从25%上升至57%,其中湖

南省和湖北省表现突出,平均排放量降幅达50%。

综上,2013~2017年各工业污染物高排放和中高排放城市减少,低排放和中低排放城市增多;长三角地区大部分高排放和中高排放城市转变为中排放和中低排放,中游地区湖南省3种工业污染排放量下降显著,2017年均表现为低排放和中低排放状态,这可能与湖南省加大污染治理和产业升级转型有关,相关资料显示^[37],2017年湖南省强化重点区域治理、重化企业搬迁退出以及建设省级工业园区污水集中处理设施等;此外,2013~2017年,湖南省产业结构发生转变,第二产业比重由47%下降至41%,第三产业比重由40%上升至48%,对该地区工业污染排放产生影响。

2.3 污染排放空间集聚特征

2.3.1 全局自相关

本研究选取Moran's *I*指数来反映长江经济带2013~2017年3种工业污染排放的空间相关性。Moran's *I*指数及相关检验指标如表2所示。2013~

2017 年,工业 SO₂ 的 Moran's *I* 指数呈先下降后上升趋势, 2015 年降至 -0.004 后迅速上升,至 2017 年上升为 0.231,空间关联程度增强. 工业废水的 Moran's *I* 指数随时间变化呈上升趋势,且通过 1%

的显著性检验,表明研究期间长江经济带工业废水排放量的空间关联程度较高. 工业烟粉尘的 Moran's *I* 指数在 -0.064 ~ 0.113 之间,研究期间指数波动较大,数值总体偏低,说明空间相关性相对较低.

表 2 2013 ~ 2017 长江经济带工业污染全局 Moran's *I* 统计

年份	工业 SO ₂			工业废水			工业烟粉尘		
	<i>I</i>	<i>Z(I)</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>Z(I)</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>Z(I)</i>	<i>P</i>
2013	0.066	1.219	0.118	0.370	5.725	0.001	-0.064	-0.789	0.219
2014	0.045	0.909	0.164	0.346	5.345	0.001	0.025	0.506	0.288
2015	-0.004	0.116	0.405	0.312	4.725	0.001	-0.002	0.117	0.423
2016	0.217	3.486	0.003	0.394	5.875	0.001	0.113	1.636	0.053
2017	0.231	3.719	0.005	0.486	7.221	0.001	0.102	1.563	0.069

2.3.2 冷热点分析

Moran's *I* 指数显示, 2017 年 3 种工业污染物存在空间自相关性,为进一步探究长江经济带工业污染的局域集聚特征,采用冷热点分析方法揭示 2017 年研究区工业污染的热点区和冷点区,如图 3 所示.

工业 SO₂ 热点区分布于研究区上游和下游,主要集中于上游的高排放城市,包括昆明、曲靖、六盘水和贵阳等地,排放量在 5.06 万 t 以上,这些地区经济发展落后,工业生产技术水平相对不高,因此排放量较高;由于工业污染存在空间溢出效应^[38],长三角地区主要受苏州和无锡中高排放城市以及盐城和宁波等中排放城市综合作用呈次热点状态;低排放城市恩施、广安以及遂宁由于与工业 SO₂ 排放量最高的重庆(13.98 万 t)相邻呈现次热点状态. 工业

废水热点区和次热点区集中分布于长三角地区,其中上海、苏州和杭州排放量在 2.45 亿 t 以上,这些城市由于工业发达,工业废水排放较高;中高排放城市重庆由于与低排放城市相邻而表现为次冷点. 工业烟粉尘热点区分布于长三角和云贵地区,其中无锡、常州、六盘水和玉溪等地排放量在 4.02 万 t 以上,次热点主要分布于江西省, 2017 年江西省各城市工业烟粉尘大多以 2.34 万 t 以上的中高排放为主,因此整体呈次热点状态.

综上, 3 种工业污染排放的热点分布存在集聚现象,各工业污染物的热点区均出现在经济较发达的长三角地区,此外,在经济欠发达的云贵地区,工业 SO₂ 和工业烟粉尘排放也呈现热点状态;值得注意的是,工业废水排放的热点区仅出现在长三角地区,空间分异显著.

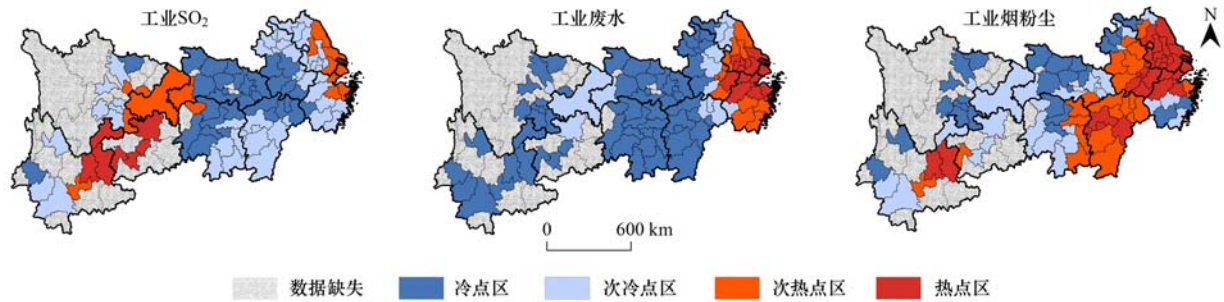


图 3 2017 年长江经济带工业污染热点空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of industrial pollution hotspots in the Yangtze River economic belt (2017)

2.4 影响因素分析

利用 LMDI 模型获取技术改善效应、产业结构效应、经济发展效应和人口规模效应对 3 种工业污染排放的贡献量(图 4 和表 3),探讨各因素对不同工业污染排放的影响.

在各影响因素中,技术改善效应占主导地位, 2013 ~ 2017 年该效应对工业 SO₂、工业废水和工业烟粉尘排放量降低的贡献度分别为 118%、140% 和 140%,其中对工业 SO₂ 的抑制作用表现突出,贡献

量达 -429.16 万 t,说明技术改善效应对工业污染排放具有显著的抑制作用,提高生产技术和污染治理技术能够有效降低工业污染排放. 相关资料显示^[39], 2013 ~ 2017 年国家加大对污染治理技术和生产技术的投资,比如建立工业集聚区污水集中处理设施、淘汰大量燃煤小锅炉、煤电机组脱硫设施实施增容改造和扩大脱硝机组容量等措施对工业污染减排起重要作用. 同时,技术改善效应对 3 种工业污染物的负贡献量最大绝对值均出现在 2015 ~ 2016

年,这与 2.1 节的结论吻合,期间的技术改善效应可能与相关环保行动计划的全面落实有关。

产业结构效应的贡献量均为负值,但对工业污染排放的抑制作用不显著,2016~2017 年,该效应对 3 种工业污染物排放量降低的贡献度均小于 10%,这一时间段,研究区产业结构调整速度下降,2016~2017 年的产业结构升级转型速度仅为 2015~2016 年的 50%,对工业污染排放的抑制作用减弱。经济发展效应对工业污染排放起促进作用,3 种污染物中对工业废水排放量的贡献相对

较大,与现有研究不同的是^[29],2013 年后经济发展对工业废水排放的影响份额较前十年有所降低。人口规模效应对各工业污染物的贡献量均为正,数值整体偏小,2016~2017 年该效应对工业 SO₂、工业烟粉尘和工业废水的贡献量分别为 0.84、0.76 万 t 和 0.31 亿 t,说明人口规模对工业污染排放影响较小。此外,表 3 显示,4 种影响因素对工业污染排放的贡献量随时间变化整体呈减少趋势,这与本研究期间工业污染排放量的不断降低趋势一致^[40]。

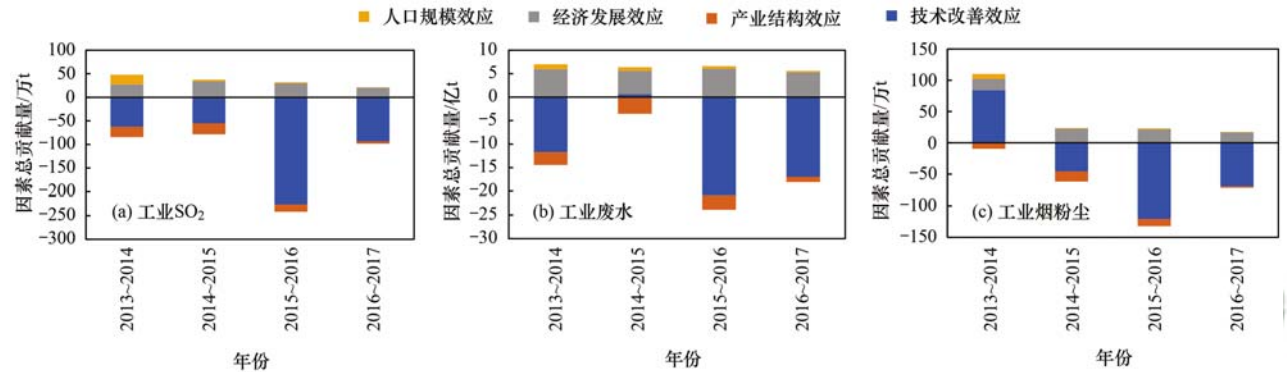


图 4 2013~2017 长江经济带工业污染排放影响因素变化情况

Fig. 4 Change in influencing factors of industrial pollution emissions in the Yangtze River economic belt from 2013 to 2017

表 3 2013~2017 年长江经济带工业污染排放影响因素及贡献度

Table 3 Degree of contribution by factors influencing industrial pollution emissions in the Yangtze River economic belt from 2013 to 2017

工业污染物	年份	排放量变化		技术改善效应		产业结构效应		经济发展效应		人口规模效应	
		绝对值	贡献度/%	绝对值	贡献度/%	绝对值	贡献度/%	绝对值	贡献度/%	绝对值	贡献度/%
工业 SO ₂ /万 t	2013~2014	-36.30	100	-62.60	172	-21.71	60	27.26	-75	20.74	-57
	2014~2015	-40.95	100	-55.29	135	-23.21	57	33.93	-83	3.62	-9
	2015~2016	-209.41	100	-226.05	108	-15.33	7	29.72	-14	2.25	-1
	2016~2017	-77.27	100	-93.93	122	-4.64	6	20.46	-27	0.84	-1
	2013~2017	-363.94	100	-429.16	118	-52.71	14	95.17	-26	22.77	-6
工业废水/亿 t	2013~2014	-7.42	100	-11.71	158	-2.72	37	5.91	-80	1.11	-15
	2014~2015	2.84	100	0.62	22	-3.55	-125	4.99	176	0.79	28
	2015~2016	-17.25	100	-20.91	121	-2.94	17	6.09	-35	0.52	-3
	2016~2017	-12.48	100	-16.98	136	-1.09	9	5.28	-42	0.31	-3
	2013~2017	-34.31	100	-48.00	140	-9.20	27	20.28	-59	2.62	-8
工业烟粉尘/万 t	2013~2014	100.54	100	84.06	84	-9.62	-10	18.06	18	8.04	8
	2014~2015	-38.13	100	-45.71	120	-16.19	43	22.31	-59	1.45	-4
	2015~2016	-109.15	100	-120.75	111	-11.44	11	21.49	-20	1.55	-1
	2016~2017	-54.25	100	-69.53	128	-2.19	4	16.71	-31	0.76	-1
	2013~2017	-100.98	100	-140.96	140	-27.92	-28	58.66	-58	9.23	-9

为深入分析各因素对不同城市工业污染排放的影响,选取研究区主要城市,利用 LMDI 模型获取 2013~2017 年各因素对 3 种工业污染排放的贡献量,如图 5 所示。

技术改善效应方面,长江经济带绝大部分城市工业污染排放随工业技术的提升而受到抑制,在上海、苏州、杭州和重庆等经济发达地区工业污染排放的抑制效果表现突出,其中重庆市工业 SO₂、工业废水和工业烟粉尘排放量在研究期间分别下降 72%、

42%、62%。相关资料显示^[41],重庆市在本研究期间加大工业污染防治,基本实现工业集聚区污水集中处理设施全覆盖,加快推进燃煤机组超低排放改造,实施燃煤锅炉清洁能源改造等,由此说明注重技术改善有助于解决生产过程中造成的环境问题。其他研究通过空间计量经济模型^[38]、动态面板系统^[22]以及 DA^[27]等方法也表明技术改善有助于工业污染减排,与本研究的结论一致。产业结构方面,该效应对各城市 3 种工业污染排放的贡献量均为负,抑制

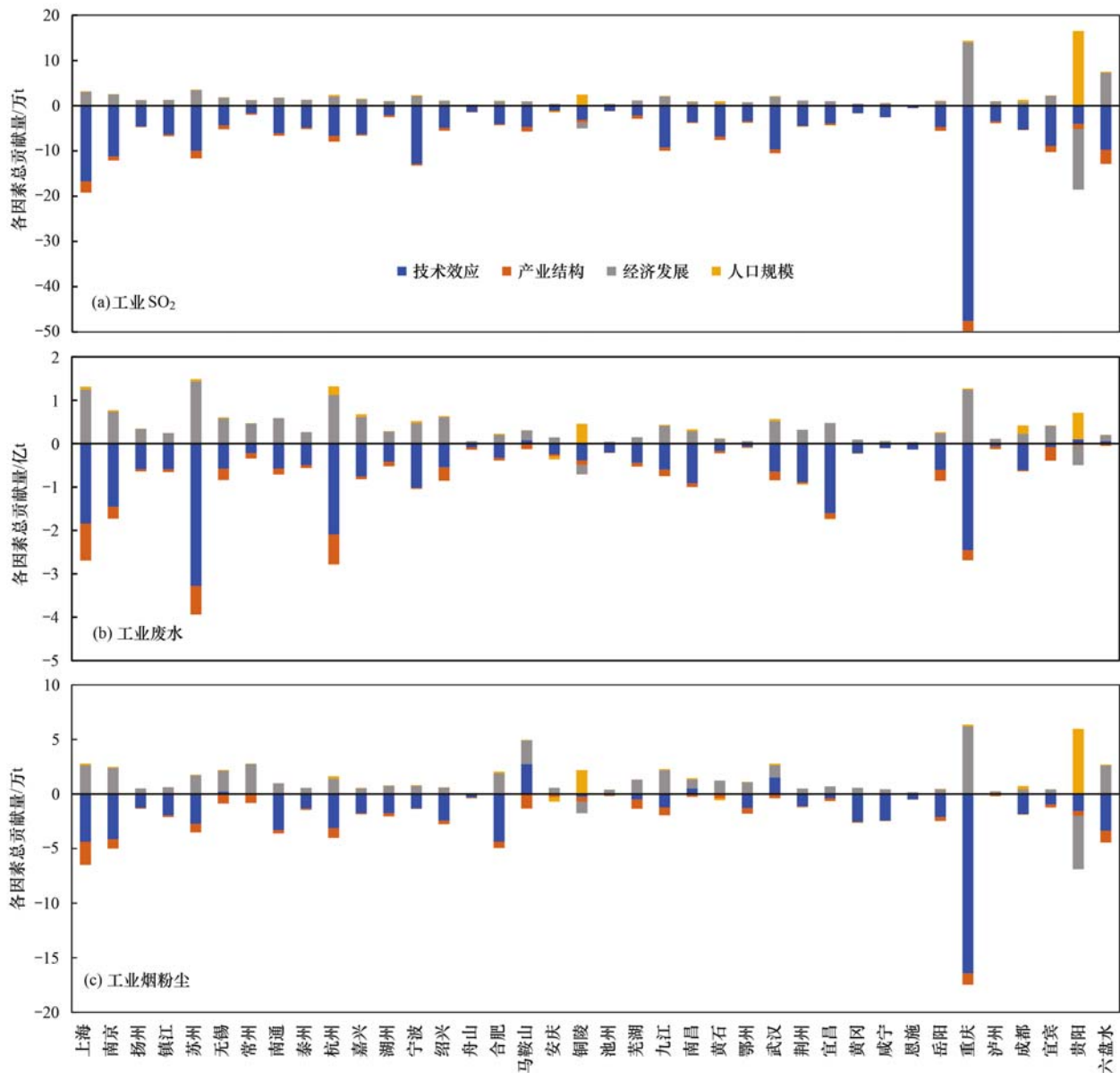


图5 2013~2017年长江经济带主要城市各指标贡献量分布

Fig. 5 Distribution of the contribution amount of each index in the major cities of Yangtze River economic belt from 2013 to 2017

效果相对较小,平智毅等^[24]通过空间杜宾模型进行相关分析,结果与本文一致.此外,产业结构对各城市工业污染排放的影响存在地域差异,上海、苏州和杭州等经济发达地区经济发展模式加速转型,本研究期间这些地区的工业比重不断下降,降幅均大于10%,因此产业结构效应对这些城市工业污染排放的抑制作用相对明显.经济发展效应在各城市主要呈现正贡献量,促进工业污染排放^[38],其中对经济较发达地区上海、南京、苏州、杭州和重庆等地的工业污染排放贡献较大,本研究期间这些地区GDP排前十,经济发展对这些城市工业污染排放的促进作用相对显著;而对舟山、黄冈以及恩施等以发展第三产业为主的地区贡献量较低;此外,经济发展效应在贵阳市表现为负贡献量,贵阳市以生态旅游闻名,经济发展相对落后,2017年第三产业占比57%,

服务业占比较大,因此经济发展未造成该城市工业污染排放的增大.人口规模效应对绝大部分城市的工业污染排放表现为正贡献量,但数值小,作用不明显;仅贵阳和铜陵两地表现相对明显.

整体而言,各影响因素对经济发达地区与经济欠发达地区的贡献量差异显著.重庆、上海、苏州、南京以及杭州等地表现突出,这些地区的人口数量、GDP以及工业产值均是恩施和池州等经济欠发达地区的几倍甚至几十倍,因此各影响因素对工业污染排放的贡献量存在明显的地域差异.

3 结论

(1)工业SO₂、工业废水以及工业烟粉尘的排放量在研究期间整体呈现下降趋势;工业污染高排放城市减少,低排放城市增多,这可能是近些年国家不

断推进长江经济带“不搞大开发,共抓大保护”以及期间相关环保行动计划实施的效果。

(2) 随时间变化,各工业污染物空间关联程度在增强,其中工业废水最为显著。此外,各工业污染物热点区空间分布差异大,工业 SO_2 热点区分布在下游和上游地区;工业废水的热点区则集中出现在长三角地带;工业烟粉尘的热点区分布于长三角、云贵地区和江西省。对此,上游地区仍应加大污染治理投资,提高管控力度;长三角地区在加强污染防治的过程中,应重点关注工业废水的治理。

(3) 基于 LMDI 模型分析得出经济发展是工业污染物排放的主要影响因素,技术改善效应对工业污染排放存在显著抑制作用,因此在长江经济带的发展过程中,应重点关注工业生产技术的提升,增加科技的投资,有助于长江经济带工业污染减排,加快推动长江经济带绿色发展。本研究期间产业结构和人口规模效应对长江经济带工业污染排放的影响相对较小。就不同城市而言,各因素对上海、苏州、杭州等经济发达城市工业污染排放的贡献量显著大于经济欠发达城市。

(4) 建立工业集聚区污水集中处理设施、淘汰大量燃煤小锅炉、煤电机组脱硫设施实施增容改造、扩大脱硝机组容量以及重化企业搬迁退出等措施是长江经济带工业污染急剧减量的最主要原因。

参考文献:

- [1] 习近平. 在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话[J]. 社会主义论坛, 2019, (10): 5-9.
- [2] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014-2018.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [4] Dong K Y, Sun R J, Dong X C. CO_2 emissions, natural gas and renewables, economic growth: assessing the evidence from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **640-641**: 293-302.
- [5] Ding Y T, Zhang M, Chen S, *et al.* The environmental Kuznets curve for $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region of China: a spatial panel data approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **220**: 984-994.
- [6] 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 等. 中国城市工业化发展与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1987-1996.
- Li Y N, Ding Z M, Deng Y J, *et al.* Relationship between urban industrialization and $\text{PM}_{2.5}$ concentration in China and the internal mechanism of EKC [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1987-1996.
- [7] 陆怡雅, 李闻记, 汪艺晗, 等. 基于 LMDI 分解方法的河北省 $\text{PM}_{2.5}$ 排放驱动因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2821-2829.
- Lu Y Y, Li W Q, Wang Y H, *et al.* Drivers of $\text{PM}_{2.5}$ emission in Hebei based on LMDI decomposition analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2821-2829.
- [8] 陈辉, 厉青, 李营, 等. 京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 时空变化特征遥感监测分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 33-43.
- Chen H, Li Q, Li Y, *et al.* Monitoring and analysis of the spatio-temporal change characteristics of the $\text{PM}_{2.5}$ concentration over Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions based on remote sensing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 33-43.
- [9] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 县域尺度的京津冀都市圈 CO_2 排放时空演变特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 385-393.
- Wang H, Chen C C, Pan T, *et al.* County scale characteristics of CO_2 emission's spatial-temporal evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 385-393.
- [10] 马晓君, 陈瑞敏, 董碧滢, 等. 中国工业碳排放的因素分解与脱钩效应 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3549-3557.
- Ma X J, Chen R M, Dong B Y, *et al.* Factor decomposition and decoupling effect of China's industrial carbon emissions [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3549-3557.
- [11] Hang Y, Wang Q W, Wang Y Z, *et al.* Industrial SO_2 emissions treatment in China: a temporal-spatial whole process decomposition analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **243**: 419-434.
- [12] Jiao J L, Han X F, Li F Y, *et al.* Contribution of demand shifts to industrial SO_2 emissions in a transition economy: Evidence from China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **164**: 1455-1466.
- [13] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 2000~2014 年北京市 SO_2 时空分布及一次污染过程分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 3961-3971.
- Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Analysis about spatial and temporal distribution of SO_2 and an ambient SO_2 pollution process in Beijing during 2000-2014 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 3961-3971.
- [14] 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, **38**(8): 1993-2007.
- Li H, Zhao X Y, Wang W J, *et al.* Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban industrial pollution in China based on multi-scales: 2005-2015 [J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(8): 1993-2007.
- [15] 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫. 泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4387-4394.
- Zhao H X, Jiang X W, Cui J X. Shifting path of industrial pollution gravity centers and its driving mechanism in Pan-Yangtze River delta [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4387-4394.
- [16] Xie P J, Gao S S, Sun F H. An analysis of the decoupling relationship between CO_2 emission in power industry and GDP in China based on LMDI method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **211**: 598-606.
- [17] Zhang S C, Zhao T. Identifying major influencing factors of CO_2 emissions in China: Regional disparities analysis based on STIRPAT model from 1996 to 2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **207**: 136-147.
- [18] Wen L, Li Z K. Driving forces of national and regional CO_2 emissions in China combined IPAT-E and PLS-SEM model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 237-247.
- [19] 陈冷璇, 李强. 长江经济带工业污染时序变化及空间分异研究 [J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **32**(3): 81-86.
- Chen L X, Li Q. Study on timing change and spatial

- differentiation of industrial pollution in the Yangtze River economic belt[J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **32**(3): 81-86.
- [20] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带PM_{2.5}分布格局演变及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [21] 夏会会, 丁镭, 曾克峰, 等. 1996~2013年长江经济带工业发展过程中的大气环境污染效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(7): 1057-1067.
- Xia H H, Ding L, Zeng K F, *et al.* Atmospheric pollution effects in the process of industrial development of the Yangtze River economic belt during 1996-2013 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(7): 1057-1067.
- [22] 孙博文, 程志强. 市场一体化的工业污染排放机制: 长江经济带例证[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 868-878.
- Sun B W, Cheng Z Q. Research on industrial pollution discharge mechanism of market integration: Taking the Yangtze River economic belt as an example[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 868-878.
- [23] 周正柱, 刘庆波, 王云云. 经济增长与工业环境污染关系的环境库兹涅茨曲线检验——基于长江经济带省域的面板计量模型[J]. *南京工业大学学报(社会科学版)*, 2020, **19**(2): 64-72.
- Zhou Z Z, Liu Q B, Wang Y Y. Environmental Kuznets curve test of relationship between economic growth and industrial environmental pollution: based on the Yangtze River economic belt provincial panel measurement model[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition)*, 2020, **19**(2): 64-72.
- [24] 平智毅, 吴学兵, 吴雪莲. 长江经济带经济增长对工业污染的影响分析——基于地理距离矩阵的空间杜宾模型[J]. *生态经济*, 2019, **35**(7): 161-167.
- Ping Z Y, Wu X B, Wu X L. Analysis of the impact of economic growth on industrial pollution in the Yangtze River economic belt based on spatial Dubin model of geographic distance matrix[J]. *Ecological Economy*, 2019, **35**(7): 161-167.
- [25] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 长江经济带空气质量的时空分布特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 874-884.
- Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Spatial-temporal distribution of air quality and its influencing factors in the Yangtze River economic belt[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 874-884.
- [26] 文扬, 马中, 吴语晗, 等. 京津冀及周边地区工业大气污染排放因素分解——基于LMDI模型分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4730-4736.
- Wen Y, Ma Z, Wu Y H, *et al.* Factors decomposition of industrial air pollutant emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas based on LMDI model analysis[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4730-4736.
- [27] 周静, 杨桂山. 江苏省工业污染排放特征及其成因分析[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2): 284-288.
- Zhou J, Yang G S. Character of industrial pollution discharge in Jiangsu Province and its cause analysis[J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(2): 284-288.
- [28] 郭政, 陈爽, 董平, 等. 长江三角洲城市群工业污染时空演化及其驱动因素[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 1323-1335.
- Guo Z, Chen S, Dong P, *et al.* Spatio-temporal evolution of industrial pollution in the Yangtze River delta urban agglomeration and its driving factors [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 1323-1335.
- [29] 陈昆仑, 郭宇琪, 刘小琼, 等. 长江经济带工业废水排放的时空格局演化及驱动因素[J]. *地理科学*, 2017, **37**(11): 1668-1677.
- Chen K L, Guo Y Q, Liu X Q, *et al.* Spatial-temporal pattern and driving factors of industrial wastewater discharge in the Yangtze River economic zone[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(11): 1668-1677.
- [30] Ang B W. LMDI decomposition approach: a guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, **86**: 233-238.
- [31] 涂正革, 湛仁俊. 工业化、城镇化的动态边际碳排放量研究——基于LMDI“两层完全分解法”的分析框架[J]. *中国工业经济*, 2013, (9): 31-43.
- Tu Z G, Shen R J. Industrialization's, urbanization's dynamic marginal carbon emissions——The analytical framework based on LMDI “two-level perfect decomposition” method [J]. *China Industrial Economics*, 2013, (9): 31-43.
- [32] Moutinho V, Madaleno M, Inglesi-Lotz R, *et al.* Factors affecting CO₂ emissions in top countries on renewable energies: a LMDI decomposition application[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **90**: 605-622.
- [33] Lin B Q, Long H Y. Emissions reduction in China's chemical industry-based on LMDI[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **53**: 1348-1355.
- [34] 马丽. 基于LMDI的中国工业污染排放变化影响因素分析[J]. *地理研究*, 2016, **35**(10): 1857-1868.
- Ma L. Decomposition of China's industrial environment pollution change based on LMDI[J]. *Geographical Research*, 2016, **35**(10): 1857-1868.
- [35] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm, 2013-09-13.
- [36] 国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm, 2015-4-16.
- [37] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [38] 胡志强, 苗健铭, 苗长虹. 中国地市尺度工业污染的集聚特征与影响因素[J]. *地理研究*, 2016, **35**(8): 1470-1482.
- Hu Z Q, Miao J M, Miao C H. Agglomeration characteristics of industrial pollution and their influencing factors on the scale of cities in China[J]. *Geographical Research*, 2016, **35**(8): 1470-1482.
- [39] 中华人民共和国生态环境部. 中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2013-2017.
- [40] Yang P G, Liang X, Drohan P J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(21): 26495-26501.
- [41] 重庆市生态环境局. 重庆市环境状况公报[R]. 重庆: 重庆市生态环境局, 2017.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)