

基于 PM_{2.5}全面达标的广东省产业结构调整策略研究*

廖程浩^{1,2} 张 晖^{1,2} 李 楠^{1,2} 李敏辉^{1,2} 常树诚^{1,2} 唐喜斌^{1,2} 梁 赛³

(1.广东省环境科学研究院,广东 广州 510045;

2.广东省环境保护大气环境管理与政策模拟重点实验室,广东 广州 510045;

3.北京师范大学环境学院,北京 100875)

摘要 为科学指导广东省进一步开展大气污染综合防治,运用统计分析和空气质量模拟方法,分析广东省实现各城市 PM_{2.5} 浓度全面达标的污染物减排需求,尤其是产业结构调整的需求。结合各行业的污染物排放强度,识别广东省加强产业结构优化调整工作需要关注的重点行业领域,并提出相应政策建议。结果表明,仅依靠既定的末端治理和能源、交通结构调整措施无法实现 2020 年广东省各城市 PM_{2.5} 浓度全面达标的目标,产业结构调整在 SO₂、NO_x、挥发性有机物(VOCs)的减排中至少需发挥 11%~19% 的减排贡献作用,重点应针对区域内的非金属矿物制品、电力热力生产和供应、黑色金属冶炼和压延加工、造纸、纺织印染、化学纤维制造等行业进行调控,主动淘汰落后产能。

关键词 污染减排 产业结构 空气质量 广东省

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.03.024

Strategic studies on the adjustment of industrial structure in Guangdong Province to achieve PM_{2.5} air quality targets LIAO Chenghao^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, LI Nan^{1,2}, LI Minghui^{1,2}, CHANG Shucheng^{1,2}, TANG Xibin^{1,2}, LIANG Sai³. (1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou Guangdong 510045; 2. Guangdong Provincial Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Environment Management and Policy Simulation, Guangzhou Guangdong 510045; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Statistical analysis and air quality model simulation methods were used to analyze the requirements of pollutant emission reductions and more specifically, the requirements of adjusting industrial structure, in order to guide Guangdong Province to carry out further air pollution control measures. Based on pollutant emission intensities in different industries, this study identified major industries that should be focused on to optimize the adjustment of industrial structure and put forward policy suggestions. Results showed that it was impossible to achieve PM_{2.5} air quality targets by only relying on existing policies of end-point treatments and energy, transportation structure adjustment in 2020. Meanwhile, the industrial structure adjustment policies should contribute at least 11%-19% to the SO₂, NO_x and VOCs emission reduction requirements in Guangdong Province. Specifically, adjusting and controlling regulations about industrial sectors such as non-metallic mineral products, electric power, thermal power production and supply, ferrous metal smelting and rolling processing, paper making, textile printing and dyeing, and chemical fiber manufacturing within the region were recommended, and eliminating backward production capacity was also necessary.

Keywords: pollutant reduction; industrial structure; air quality; Guangdong Province

近年来产业结构调整节能减排效应和治理对产业结构调整的影响日渐成为关注的重点^[1-4]。文扬等^[5]利用对数平均迪氏指数(LMDI)分析了京津冀及周边地区工业大气污染排放因素,张同斌等^[6]基于时变参数向量自回归(VAR)模型研究了经济结构、增长方式与环境污染的关联,秦炳涛等^[7]和石磊等^[8]分别采用 VAR 模型分析了上海市和京津冀地区产业结构与大气污染的关系,HUO 等^[9]

和 OU 等^[10]利用投入产出模型分别研究了全国和珠三角地区大气污染的结构问题,其他一些学者也对调整产业结构推动环境质量改善的策略进行了探索^[11-13]。产业结构调整作为促进污染减排的有效手段^[14],已成为 2018 年国家《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中明确提出的一项重点任务。但前期的大气污染防治政策难以明确产业结构优化调整的任务要求,特别是该领域工作需要力争达到的污染减排

第一作者:廖程浩,男,1984 年生,硕士,高级工程师,主要从事大气污染防治政策研究。

* 国家重点研发计划项目(No.2018YFC0213906)。

目标,导致产业结构调整的力度地区间差异很大,污染减排效果未能充分发挥^[15]。基于大气环境质量改善需求和单位产出污染物排放强度研究产业结构调整策略,提出产业结构调整的工作需求和建议,对打好蓝天保卫战具有重要意义。

广东省经济发达、产业门类众多,通过多年治理在国内各重点防控区中率先实现了区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到《国家环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准。但面对全面实现区域和城市空气质量达标,加快对标国际先进水平的更高空气质量改善目标,广东省还需深入推进各领域的污染协同治理,科学推动经济、产业与生态环境协调发展。

本研究以广东省为研究对象,利用空气质量数值模拟计算广东省实现全省各城市空气质量达标的污染减排总需求,通过对污染治理和能源、交通结构调整等既定措施的减排潜力测算和需求差距比较,分析需要通过产业结构调整达到的污染减排需求,并结合各重点行业单位经济产出的污染物排放强度,提出基于区域大气环境质量改善需求和行业污染物排放强度的产业结构调整重点方向和对策建议,以期广东省协调推动产业转型升级和空气质量改善,加快绿色发展提供科学参考和建议。

1 研究方法

1.1 研究思路

根据《广东省“十三五”环境保护规划》和《广东省打好污染防治攻坚战三年行动计划(2018—2020年)》的要求,到2020年广东省各地级以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度应达到 GB 3095—2012 二级标准,即 $\text{PM}_{2.5}$ 年均质量浓度低于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。以此为约束,本研究的技术思路如下:(1)利用空气质量数值模型迭代试算方法计算广东省21个地级市 $\text{PM}_{2.5}$ 低于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的空气质量改善目标约束下的大气环境容量,并对比基准年的大气污染物排放量,将两者之间的差值作为需要达到的污染减排总目标;(2)依据基准年的大气污染物排放清单及既定规划、方案的污染治理、能源结构调整和交通结构调整等产业结构调整以外的政策措施,测算可以实现的最大污染减排潜力;(3)对比产业结构调整以外的政策措施可实现的最大污染减排潜力与污染减排的总需求,其间的差距为负值时,差值即是产业结构调整需要达到的最低减排量贡献,若差距为正值则表示此阶段不一定需要产业结构调整的直接减排贡献;(4)结合广东省主要工业行业的污染排放强度的分析结

果,筛选应优先进行产业结构调整的重点行业并提出产业结构调整的措施建议。

1.2 分析方法

1.2.1 大气环境容量和减排总需求计算方法

本研究采用李敏辉等^[16]以广东省为研究对象建立的基于区域传输矩阵的大气容量计算方法,以《大气污染防治行动计划》实施的最后1年(2017年)为基准年,以广东省21个地级市互为 $\text{PM}_{2.5}$ 的源和汇,模拟分析各地市的相互传输影响贡献,以模型计算的区域内城市间相互传输影响贡献作为每次迭代试算时为改善 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标城市环境空气质量所需的区域各地市减排分摊比例。又以2017年基准情景的全省 $\text{PM}_{2.5}$ 均值模拟结果与监测值的比值作为校正系数,校正基准情景模拟结果的 $\text{PM}_{2.5}$ 、硫酸盐、硝酸盐的浓度作为基准浓度,随后进行多次减排迭代试算并逐次比较各地市模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 、硫酸盐、硝酸盐浓度与标准限值和基准浓度的差距。因每次减排的比例幅度较小,近似认为前体物排放量与对应 $\text{PM}_{2.5}$ 的成分浓度结果接近线性关系。当迭代试算结果显示广东省各城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均达到标准限值要求且硫酸盐、硝酸盐浓度低于基准浓度时,得到的减排情景即为实现各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 全面达标目标约束下的 SO_2 、 NO_x 的大气环境容量。而挥发性有机物(VOCs)的容量则在 NO_x 容量确定后,再进行减排迭代,当模拟结果的臭氧最大8小时质量浓度第90百分位数($\text{O}_3\text{-}8\text{h}_{90\text{th}}$) $\leq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$,即可认为此时的VOCs排放情景为VOCs环境容量。广东省2017年的污染排放基数减去计算得到的大气环境容量,所得结果即为 SO_2 、 NO_x 、VOCs等污染物的减排总需求。

本研究空气质量模拟体系采用三重嵌套网格,投影方式使用兰伯特正形投影,中心经纬度为 114°E 、 28.5°N ,两条真纬线为 15°N 、 40°N 。第1层网格的分辨率为 $27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$,包括整个中国和东南亚等地区,第2层网格的分辨率为 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$,范围囊括华南地区,第3层网格的分辨率为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$,区域包括整个广东省及邻近地区。垂直为23层,本次研究目标取模式底层(近地层),其中心高度约18 m。

气象输入选用气象研究与预报模式(WRF),微物理方案使用 Morrison-2moment,近地面方案使用 Pleim-Xiu,边界层方案使用 ACM2。空气质量模型用区域多尺度空气质量模型系统的综合来源分析模块(CMAQ-ISAM),气相化学机制 CB05,气溶胶化

学机制 AE6。

1.2.2 污染物减排潜力定量表征方法

本研究参考生态环境部发布的《大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)》《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》《生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》等技术指南和排放系数法对能源结构调整和污染治理的减排潜力进行估算。减排潜力的定量表征主要采用基于所需淘汰、替代、治理升级的活动水平和相应排放源的排放系数进行测算。

能源、交通结构调整减排潜力的基本计算公式如式(1)所示:

$$E_{i,j,k,m} = \sum_n A_{j,k,m,n} \times EF_{i,j,k,m} \times (1 - \eta_{i,n}) \quad (1)$$

式中: $E_{i,j,k,m}$ 为 i 种污染物 j 城市 k 类污染源 m 类燃料或原料类型的能源、交通结构调整减排潜力, t ; $A_{j,k,m,n}$ 为 j 城市 k 类污染源 m 类燃料或原料类型 n 类污染控制技术状态下的排放源所需淘汰、替代的活动水平, 如煤炭消耗量(万 t)、天然气消耗量(万 m^3)、产品产量(万 t)、或机动车数量(万辆); $EF_{i,j,k,m}$ 为 i 种污染物 j 城市 k 类污染源 m 类燃料或原料类型的排放系数, $t/万 t$ 或 $t/万辆$; $\eta_{i,n}$ 为 i 种污染物 n 类污染控制技术目前的污染物平均去除效率, %。

SO₂ 减排潜力的估算采用物料衡算法, 计算方式见式(2):

$$E_{SO_2} = \sum_m M_m \times S_m \times \alpha \times (1 - \eta_m) \quad (2)$$

式中: E_{SO_2} 为 SO₂ 减排潜力, t ; M_m 为 m 类燃料或原料类型所需淘汰、替代的消耗量, 万 t ; S_m 为 m 类燃料或原料类型的平均硫分, %; α 为 SO₂ 释放系数, $t/万 t$, 燃煤设备取 1.7 $t/万 t$, 燃油设备取 2.0 $t/万 t$; η_m 为 m 类燃料或原料类型的综合脱硫效率, %。

污染治理减排潜力的基本计算公式见式(3):

$$EG_{i,j,k,m} = \sum_n B_{j,k,m,n} \times EF_{i,j,k,m} \times (\eta_{i,n}^* - \eta_{i,n}) \quad (3)$$

式中: $EG_{i,j,k,m}$ 为 i 种污染物 j 城市 k 类污染源 m 类燃料或原料类型的污染治理减排潜力, t ; $B_{j,k,m,n}$ 为 j 城市 k 类污染源 m 类燃料或原料类型 n 类污染控制技术状态治理提升对应的排放源活动水平, 如产品产量、溶剂等原材料使用量(万 t), 或机动车保有

量(万辆); $\eta_{i,n}^*$ 为 i 种污染物 n 类污染控制技术的最大污染物去除效率, %。

1.2.3 行业污染物排放强度表征方法

为衡量产业经济活动与大气污染物排放的关系, 采用行业的单位增加值污染物排放量作为行业污染物排放强度的表征, 数值越小表明该行业创造单位价值的污染物排放量越小, 经济活动与大气环境的协调性越高, 计算公式见式(4):

$$EP_{i,k} = T_{i,k} / Q_k \quad (4)$$

式中: $EP_{i,k}$ 为 i 种污染物 k 类污染源行业的单位产值污染物排放量, $kg/万元$, 本研究重点针对 SO₂、NO_x、VOCs 3 类大气污染物进行分析; $T_{i,k}$ 为 i 种污染物 k 类污染源行业的污染物年排放量, kg ; Q_k 为 k 类污染源行业的年工业增加值, 万元。

1.3 数据来源

1.3.1 大气污染源排放清单数据

空气质量模型外两层模拟区域所使用大气污染物排放清单输入数据为清华大学研发的中国多尺度排放清单(MEIC)与欧盟联合研究中心开发的全球大气研究排放数据库的大气污染排放半球输送清单(EDGAR-HTAP)构成的耦合清单, 其中中国大陆部分采用 MEIC 清单, 其余部分采用 EDGAR-HTAP 清单。第 3 层使用杨柳林等编制的 2014 年广东省大气污染源清单^[17], 并根据广东省环境统计数据 and 广东省统计年鉴数据将污染源排放信息更新至 2017 年。清单更新调整后, 广东省 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 的排放总量分别约 48.1、142.8、580.8、87.2、37.3、161.7、49.7 万 t 。

1.3.2 其他基础数据

污染治理减排工作和能源结构调整的工作任务依据《广东省环境保护“十三五”规划》《广东省打好污染防治攻坚战三年行动计划(2018—2020 年)》《广东省挥发性有机物整治与减排工作方案(2018—2020 年)》《广东省“十三五”能源结构调整实施方案》等广东省印发的规划方案确定, 其中主要的量化减排措施见表 1。2017 年广东省各行业的工业增加值来源于《广东统计年鉴(2018)》。

2 结果与讨论

2.1 满足城市空气质量全面达标的减排总需求

尽管广东省在 2017 年区域空气质量平均水平已经达标, 但辖区内仍有广州、佛山、韶关等 10 个城市存在 PM_{2.5} 超标现象。通过基于各城市相互传输影响贡献进行减排比例分配的大气环境容量迭代计

表1 2018—2020年广东省污染治理和能源、交通结构调整领域主要措施
Table 1 Major measures for pollution control and energy, transportation structure adjustment in Guangdong Province during 2018-2020

主要措施	措施主要内容
发展清洁能源	到2020年核电、风电、光伏发电机组容量分别达到1600万、650万、500万kW;接收西电规模达到4000万kW
压减燃煤	到2020年全省煤炭消费总量控制在1.65亿t以下,珠三角地区煤炭消费比2015年减少1000万t左右
提高清洁能源供应	到2020年天然气消费比2015年翻一番,约280亿m ³
推广新能源汽车	到2020年珠三角地区各城市实现公交电动化,粤东、西、北地区公交电动化率达到80%
柴油车治理	2018年底前全面供应国VI标准车用柴油,加大联合执法力度,扩大货车限行范围,力争到2020年全程柴油货车颗粒物和NO _x 比2017年减排10%
VOCs防治	到2020年VOCs排放量比2015年下降18%,重点工程减排不低于20.7万t
深化脱硫脱硝治理	推动10万kW及以上自备燃煤发电机组实施超低排放改造;更新替代城市建成区、高污染燃料禁燃区、热力管网覆盖范围内的10t/h以下高污染燃料锅炉;全面完成平板玻璃生产线脱硝设施建设,提高陶瓷、水泥等行业排放标准
面源污染防控	加强扬尘管理,全面禁止露天焚烧

算,以2017年的气象条件为基础的前提下,要确保实现广东省各城市PM_{2.5}浓度全面达标的减排总需求还需要进一步削减区域SO₂、NO_x和VOCs等大气污染物排放约15.0、27.0、32.0万t。

2.2 污染治理和能源、交通领域的减排潜力

按照广东省相关规划方案的任务措施及2017年底相关行业的污染治理水平,能源、交通结构调整及污染深度治理的减排潜力计算结果汇总如表2。到2020年各类污染源的深度治理以及能源、交通领域的结构调整措施最多可以合计减排SO₂、NO_x、VOCs约14.1、21.8、28.6万t。

表2 2018—2020年广东省污染治理和能源、交通结构调整既定措施的减排潜力

Table 2 The emission reduction potential of the proposed major measures for pollution control and energy, transportation structure adjustment in Guangdong Province during 2018-2020

工作领域	减排潜力/万t		
	SO ₂	NO _x	VOCs
能源结构调整	7.5	9.5	3.0
交通结构调整		1.4	0.2
污染深度治理 (固定源、移动源和面源)	6.6	10.9	25.4

2.3 产业结构调整减排需求分析

基于减排总需求和其他领域政策措施的减排潜力测算结果,3年内产业结构调整以外的其他措施最多可满足SO₂、NO_x、VOCs减排总需求的89%、81%和89%(见图1),主要污染物减排量仍无法满足广东省21个地级以上城市PM_{2.5}浓度全面达标的的需求。产业结构调整领域至少还需要贡献SO₂、NO_x、VOCs减排总需求的11%、19%和11%。产业结构调整措施的实施,对推动当前广东省空气质量改善和蓝天保卫战攻坚目标的实现具有不可替代的重要作用。

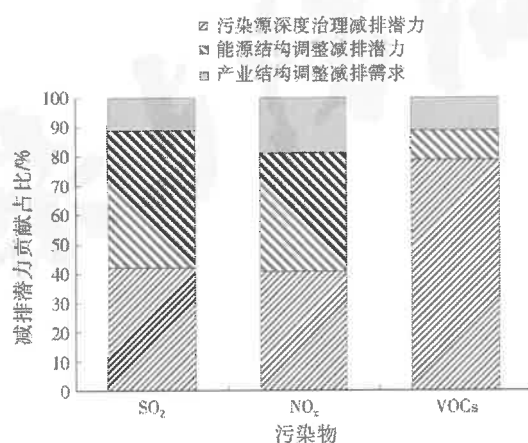


图1 污染治理和能源、产业结构调整减排潜力及其在总减排需求中的贡献占比

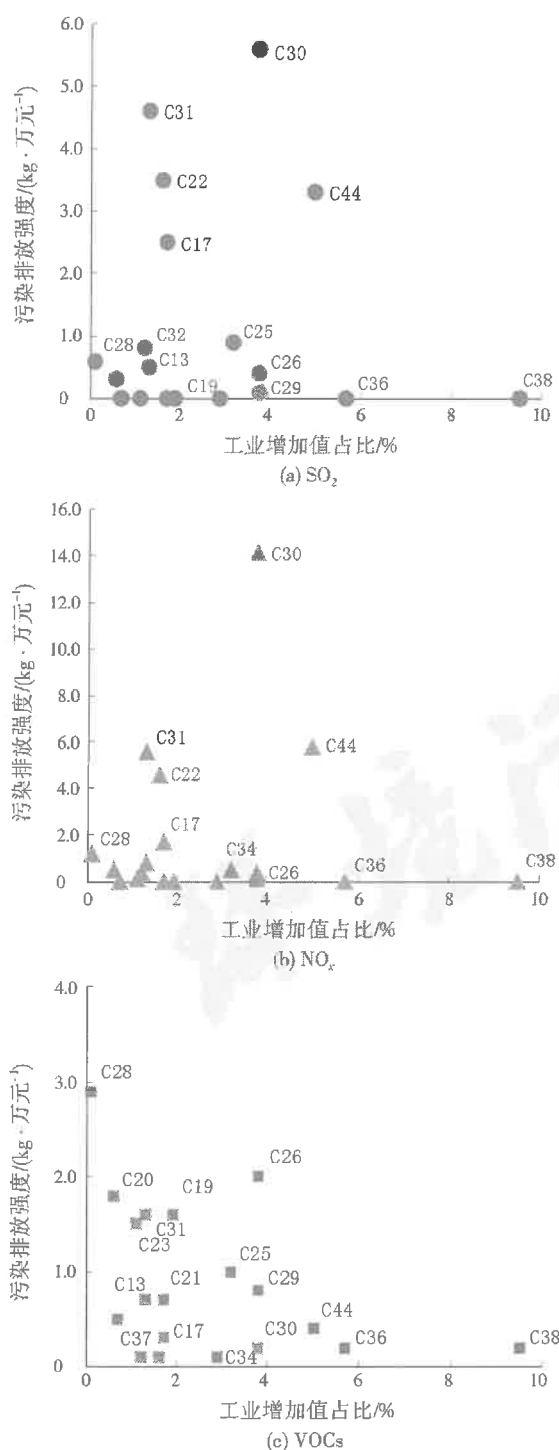
Fig.1 Potential pollutant reduction and contribution proportion of pollution control and energy/industry structure adjustment

2.4 各行业的大气污染物排放强度

以行业在全省工业增加值中的占比为横坐标、行业污染物排放强度为纵坐标,绘制广东省主要工业行业的大气污染物排放强度分布图(见图2),越靠近图形右下角表示该行业经济贡献越高、污染排放强度越低;反之越靠近图形左上角表示该行业经济贡献越低、污染排放强度越高。结果显示,非金属矿物制品、电力热力生产和供应、黑色金属冶炼和压延加工、造纸、纺织印染等行业的SO₂、NO_x排放强度较高,化学纤维制造、化学原料和化学制品制造、木材加工和木竹藤棕草制品、皮革毛皮羽毛及其制品和制鞋、印刷等行业VOCs排放强度较高。而电气机械和器材制造、通用设备制造、汽车制造、运输设备制造等现代加工制造业的污染物排放强度较低。

2.5 产业转型升级的对策措施建议

根据上述分析,考虑打赢蓝天保卫战的现实需



注:图中序号为国民经济行业代码,C13 农副食品加工业,C17 为纺织印染业,C19 为皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业,C20 为木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业,C21 为家具制造业,C22 为造纸业,C23 为印刷和记录媒介复制业,C25 为石油加工、炼焦和核燃料加工业,C26 为化学原料和化学制品制造业,C28 为化学纤维制造业,C29 为橡胶和塑料制造业,C30 为非金属矿物制品业,C31 为黑色金属冶炼和压延加工业,C32 为有色金属冶炼和压延加工业,C34 为通用设备制造业,C36 为汽车制造业,C37 为铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业,C38 为电气机械和器材制造业,C44 为电力生产和供应业。

图2 2017年广东省主要行业单位工业增加值
大气污染物排放强度

Fig.2 Air pollutant emission performance per unit output value of major industries in Guangdong Province in 2017.

求,广东省近期应切实加强产业结构调整,推动污染源头减排,重点考虑以下几个方面:

(1) 全面排查清理“散乱污”企业,积极清理城市建成区等重点地区的非金属矿物制品、黑色金属冶炼和压延加工、造纸、纺织印染、化学纤维制造等排放强度较高的行业企业,通过搬迁、升级等手段,在短期内加快实现城市建成区的污染源头削减。

(2) 加强对非金属矿物制品、电力热力生产和供应、黑色金属冶炼和压延加工、造纸、纺织印染、化学纤维制造等排放强度较高行业的规模总量控制和落后产能淘汰。通过多部门的协同管控,促使环保、能耗不能稳定达标和技术落后的一批水泥、玻璃、陶瓷、钢铁、造纸、印染、化工企业关停退出。同时淘汰服役期满的燃煤火电机组,积极推进老旧煤电机组提前退役。可根据上述行业的企业实际排放水平及减排需求,排查确定淘汰退出或升级改造企业名单。

(3) 以上述排放强度较高的行业为重点,严格控制行业新增产能、提高行业项目准入要求。特别是对于经济相对发达、空气污染问题相对突出的珠三角地区应继续禁止新建燃煤燃油火电机组及企业自备电站,严格限制钢铁、水泥、玻璃、陶瓷、有色金属冶炼、造纸、纺织印染等行业及生产、使用高VOCs含量溶剂性涂料油墨的新建项目。

(4) 从长期来看,还应该重点加快推动电气机械和器材制造、通用设备制造、汽车制造、运输设备制造等清洁高效行业的发展,借助工艺技术进步对非金属矿物制品、黑色金属冶炼和压延加工、造纸、纺织印染、化学纤维制造等行业具有一定规模和技术水平的企业进行技术升级和深度治理,加快推动产业转型升级和污染源头减排。

3 结论

(1) 虽然广东省已经实现区域空气质量平均水平达标,但实现区域内所有城市 PM_{2.5} 浓度全面达标还需要进一步深化污染防治,大幅削减大气污染物排放量。

(2) 当前的大气污染防治和空气质量改善,迫切需要通过推动产业结构调整从源头削减污染排放。广东省要实现 2020 年全省 21 个地级以上市 PM_{2.5} 浓度全面达标的空气质量改善目标,至少需要产业结构调整贡献 11%~19% 的污染物削减量。产业结构调整对推动广东省蓝天保卫战攻坚目标的实现具有不可替代的重要作用。

(3) 从广东省 2017 年的产业结构和行业大气

污染物排放强度来看,近期重点应该以非金属矿物制品、电力热力生产和供应、黑色金属冶炼和压延加工、造纸、纺织印染、化学纤维制造等排放强度较高行业为重点调控对象,严格控制上述行业发展规模,加快推动产业结构调整升级。

参考文献:

- [1] 王明旭,张永波,蒋洪强.珠三角地区治污减排对经济结构调整的影响评估[J].环境科学与技术,2014,37(7):186-192.
- [2] 耿静,任丙南,吕永龙,等.海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价[J].环境科学,2016,37(6):2401-2408.
- [3] 申开丽,刘瑜,王晓艺,等.基于环境约束的浙江省制造业产业结构调整优化研究[J].环境保护科学,2017,43(1):53-58.
- [4] 张国兴,张培德,修静,等.节能减排政策措施对产业结构调整与升级的有效性[J].中国人口·资源与环境,2018,28(2):123-133.
- [5] 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.
- [6] 张同斌,李金凯,程立燕.经济结构、增长方式与环境污染的内在关联研究——基于时变参数向量自回归模型的实证分析[J].中国环境科学,2016,36(7):2230-2240.
- [7] 秦炳涛,陈建熊.上海市经济增长和产业结构以及空气污染的动态关系研究——基于VAR模型的实证分析[J].技术与创新管理,2017,38(6):610-614.
- [8] 石磊,王玥,程荣,等.京津冀产业结构调整对大气污染物排放的影响效应——基于向量自回归(VAR)模型的脉冲响应函数分析[J].科技导报,2018,36(15):24-30.
- [9] HUO H, ZHANG Q, GUAN D, et al. Examining air pollution in China using production- and consumption-based emissions accounting approaches[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(24):14139-14147.
- [10] OU J, MENG J, ZHENG J, et al. Demand-driven air pollutant emissions for a fast-developing region in China[J]. Applied Energy, 2017, 204:131-142.
- [11] 田金平,陈吕军,杜鹏飞,等.基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究[J].环境科学,2013,34(1):336-346.
- [12] LIANG S, ZHANG T Z, JIA X P. Clustering economic sectors in China on a life cycle basis to achieve environmental sustainability[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2013, 7(1):97-108.
- [13] 张恪渝,廖明球,杨军.绿色低碳背景下中国产业结构调整分析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(3):116-122.
- [14] SCHREIFELS J J, FU Y, WILSON E J. Sulfur dioxide control in China: policy evolution during the 10th and 11th Five-year Plans and lessons for the future[J]. Energy Policy, 2012, 48:779-789.
- [15] 武娟妮,程亮,逮元堂,等.中国工业大气污染物排放的影响因素研究[J].环境污染与防治,2018,40(11):1321-1326.
- [16] 李敏辉,廖程浩,杨柳林,等.基于区域传输矩阵和PM_{2.5}达标约束的大气容量计算方法[J].环境科学,2018,39(8):3485-3491.
- [17] 杨柳林,曾武涛,张永波,等.珠江三角洲大气排放源清单与时

空分配模型建立[J].中国环境科学,2015,35(12):3521-3534.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2019-06-10)

(上接第388页)

- [8] 潘竞虎,董磊磊,王娜云,等.兰西城市群热环境格局多尺度研究[J].国土资源遥感,2018,31(2):138-146.
- [9] 王德利,杨青山.中国城市群规模结构的合理性诊断及演变特征[J].中国人口·资源与环境,2018,29(9):123-132.
- [10] 黄金川,刘倩倩,陈明.基于GIS的中国城市群发育格局识别研究[J].城市规划学刊,2014,58(3):37-44.
- [11] 严翔,成长春,贾亦真.中国城镇化进程中产业、空间、人口对能源消费的影响分解[J].资源科学,2018,42(1):216-225.
- [12] 温汝俊.城市垃圾处置系统方案决策及市场动作研究[D].重庆:重庆大学,2003.
- [13] 唐夫凯,齐丹卉,卢琦,等.中国西北地区农林复合经营的保护与发展[J].自然资源学报,2016,31(9):1429-1439.
- [14] 蓝志勇,刘军.中国西北地区城镇化的路径探讨[J].中国行政管理,2015,31(5).
- [15] 李春米,魏玮.中国西北地区环境规制对全要素生产率影响的实证研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):14-19.
- [16] GUAN X, WEI H, LU S, et al. Assessment on the urbanization strategy in China: achievements, challenges and reflections[J]. Habitat International, 2018, 71:97-109.
- [17] 赵丽君.城市生活垃圾减量与资源化管理研究[D].天津:天津大学,2009.
- [18] 梁广生,吴文伟,赵桂瑜,等.北京市2002—2007年生活垃圾产生量预测分析[J].环境科学研究,2003,16(5):48-51.
- [19] ZHENG L, SONG J, LI C, et al. Preferential policies promote municipal solid waste (MSW) to energy in China: current status and prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 36(8):135-148.
- [20] SIPRA A T, GAO N, SARWAR H. Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: a review of effects of MSW components and catalysts[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 175(6):131-147.
- [21] WANG J, WU H, TAM V W Y, et al. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: an empirical study of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206(7):1004-1014.
- [22] XU Q, TIAN Y, KIM H, et al. Comparison of biogas recovery from MSW using different aerobic-anaerobic operation modes[J]. Waste Management, 2016, 56(10):190-195.
- [23] 王海飞.兰州-西宁经济区空间差异及区域分区研究[J].地域研究与开发,2013,32(4):33-38.
- [24] 王海飞.双核结构视角下的区域空间联动模式研究——以兰州-西宁经济区为例[J].城市发展研究,2013,20(3):80-85.
- [25] 张志斌,张新红.兰州-西宁城市整合与协调发展[J].经济地理,2006,26(1):96-99.
- [26] 黄进.兰州市生活垃圾分类收集实施条件研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- [27] 苟剑锋,曾正中,姬爱民,等.兰州市生活垃圾物理成分及含水特性分析[J].环境工程,2012,31(6):101-105.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2019-01-28)