DOI: 10.5846/stxb201904060671

赵秀玲,李伟,王伟民,韩立建,周伟奇.我国典型城市空气质量演变及其调控——以深圳市 2000—2017 年为例.生态学报,2020,40(17):5894-5903.

Zhao X L,Li W,Wang W M,Han L J,Zhou W Q.Evolution and regulation experiences of air quality in China's typical city Shenzhen during 2000—2017. Acta Ecologica Sinica,2020,40(17):5894-5903.

我国典型城市空气质量演变及其调控
——以深圳市 2000—2017 年为例

赵秀玲[1,2],李 伟[3],王伟民[4],韩立建[1,5],周伟奇[1,5,6,*]

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学技术大学生命科学学院, 合肥 230027

3 北京市林业碳汇工作办公室,北京 100013

4 深圳市环境监测中心站, 深圳 518049

5 中国科学院大学, 北京 100049

6 北京城市生态系统研究站, 北京 100085

摘要:目前国内外许多城市面临严重的空气污染问题,严重制约城市发展、影响人体健康。同时,部分城市(如深圳)空气质量已经达到并保持在良好的水平。探究这些城市空气质量演变过程及其调控,可为我国大量仍面临严重空气污染问题的城市提供参考和借鉴。以深圳市为案例,利用环境质量公报数据和统计年鉴数据,通过分析多个社会经济因子与典型污染物的相关关系,探究其空气质量演变特征与调控经验。结果表明,深圳市各类型空气污染物与城市社会经济发展均符合 EKC 模型假说,但不同污染物所处阶段不同。颗粒物、SO_2和 NO_2均处于下降阶段,而 O_3目前处于高水平平稳阶段。总结深圳市空气质量改善历程及调控措施,发现主要有两大方面:宏观上严格把控;微观上精准治理。宏观上,重点放在产业结构和能源结构的快速调整上,对于空气质量的改善起到了非常明显的作用。而在微观精细化的管理上,对于空气污染的治理政策要具有持续性、精准性和及时性。当下,针对首要的 O_3污染问题,深圳市应重点关注城市人为排放 VOCs 和植物释放 VOCs 对 O_3生成的影响,以及城市热环境对 O_3浓度的影响。

关键词:深圳;空气污染;EKC;空气质量调控

Evolution and regulation experiences of air quality in China′s typical city Shenzhen during 2000—2017

ZHAO Xiuling[1,2],LI Wei[3],WANG Weimin[4],HAN Lijian[1,5],ZHOU Weiqi[1,5,6,*]

1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*

2 *School of Life Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*

3 *Beijing Forestry Carbon Administration, Beijing* 100013, *China*

4 *Shenzhen Environmental Monitoring Center, Shenzhen* 518049, *China*

5 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

6 *Beijing Urban Ecosystem Research Station, Beijing* 100085, *China*

Abstract: In recent years, many cities in the developing world are facing serious air pollution, which seriously restrict

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41771203);深圳市生态环境局科研项目 (COBO1709281935F01);深圳市环境监测中心站项目(SZCG2018161442)

收稿日期:2019-04-06; **网络出版日期**:2020-07-10

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wzhou@ rcees.ac.cn

urban development and affect human health. Although, air quality in some cities (e.g. Shenzhen) has met the standard and maintained in fine level. Exploring the evolution and improvement patterns of air quality in these cities is of great importance to cities that still facing heavy air pollution in China to adopt effective alleviation measures. This study takes Shenzhen as a case study, to explore the evolution characteristics of air quality and changes in regulation experiences on it, by analyzing the correlation between several socio-economic factors and typical pollutants using the environmental quality bulletin and statistical yearbook data. The results show that the relationships between the main typical air pollutants and urban development level in Shenzhen conform to the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis fitting the inverted U-shaped curve. However, different types of pollutants are at different stages within the inverted U-shaped curve. Particulate matter, SO_2 and NO_2 are in the decline stage, while O_3 is in the stable stage with high concentration. We found that there were two major directions during the process of improvement and control measures for air quality in Shenzhen: rigid controlling at the macro-scope and precise regulating at the micro-scope. Macroscopically, the focus on the rapid adjustment of industrial structure and energy structure has played a very significant role in air quality improvement. In micro-scope, the air pollution control policy should be sustained, accurate and timely. At present, in order to mitigate the air pollution caused by O_3, Shenzhen should pay more attention to the effects of VOCs released by human and plants on O_3 production, and the impact of urban thermal environment on O_3 concentration.

Key Words: Shenzhen; air pollution; EKC; air quality control

改革开放以来,我国经历了短期但快速的城市化过程,给城市生态环境带来了巨大的压力,尤其是近年来凸显的空气质量问题。如在我国秋冬季节,大部分地区都会遭受雾霾污染问题[1-2]。尤其是随着城市规模、能源消耗等的快速增加,空气污染问题也在迅速地恶化[3-5]。研究表明,我国大部分地区城市的空气质量与城市化质量的协调水平处于中度协调或勉强协调,而在空间上呈现以京津冀地区为圆心的环状分布,且越靠近圆心协调度越差[6]。不同发展水平的城市,空气污染的改善程度也存在差异[7]。因此,城市化速度与环境污染的治理之间如何协调是我国城市发展面临的迫切问题。

社会经济的快速发展往往伴随着环境质量的恶化,但根据环境库兹涅茨曲线模型(EKC 模型)理论:当经济发展达到一定水平之后,也就是到达某个临界点或称“拐点”以后,随着人均收入的进一步增加,环境污染又由高趋低,其环境污染的程度逐渐减缓,环境质量逐渐得到改善[8-11]。该理论已经在很多生态环境污染问题中得以验证,如水环境、碳排放、生态足迹等等[12-16]。研究发现,EKC 模型同样适用于社会经济发展与空气污染问题的关系[17]。目前空气污染问题是我国面临的主要环境问题之一,同一时期下,当大多数城市还在忍受雾霾污染时,深圳市的空气质量已经达到并保持在良好水平,经济快速发展导致的雾霾污染问题已经得到了很好的治理[18-19]。根据环境库兹涅茨曲线理论,目前深圳市雾霾污染问题可能已经越过“拐点”,进入逐渐改善阶段[20]。

深圳市作为我国改革开放政策中最早开放的城市,自 70 年代以来,城市人口和社会经济迅速发展,尤其是 2000 年以来,深圳市的社会经济等方面的发展速度更为迅速。目前,深圳市已经成为我国四个一线城市中的一员。至 2018 年,深圳市城市经济规模居大城市中第三位,人均 GDP 产出位居全国大中城市第 2 位。

随着城市化进程的推进,中国的空气污染问题已经由单一的污染物污染转变成复合污染[21];空气污染物类型多种多样,特性也各异。如同样是作为二次污染物的 PM 和 O_3 虽然有类似的前体物,但是反应机制和污染物本身的特点也有很大差异[22-23]。此外,污染原因也由单纯的环境问题演变为人口社会经济的复合生态系统问题。深入科学的探究深圳市典型污染物的演变特点及其与城市发展的关系,总结深圳市针对空气污染问题的治理经验,不仅为深圳市今后的空气质量继续提升提供思路,也为其他城市在空气质量改善方面提供借鉴。

基于以上背景,本研究以深圳作为典型案例,利用深圳市多年环境质量公报数据和统计年鉴数据, 拟解

决以下几个科学问题:1)深圳市空气质量现状及其演变有何特征?例如,不同类型的污染物其演变特征是否不同?空气质量变化是否存在阶段性特征?现阶段主要污染物的特点是什么?2)深圳市社会经济发展如何影响空气质量?重点研究不同类型污染物的影响因素是否不同。3)深圳市空气污染防控措施的阶段性特征,及其对空气污染问题改善的作用?

1 数据与方法

1.1 深圳市概况

深圳市是中国南部海滨城市,毗邻香港,位于北回归线以南,东经 113°43′至 114°38′,北纬 22°24′至 22°52′之间(图 1)。地处广东省南部,珠江口东岸,东临大亚湾和大鹏湾,西濒珠江口和伶仃洋,南边深圳河与香港相连,北部与东莞、惠州两城市接壤。地势东南高,西北低,多为低丘陵地。全市面积 1997.47km^2。截至 2017 年末,常住人口 1252.83 万人,其中户籍人口 434.72 万人。深圳属亚热带季风气候,降水丰富。常年平均气温 22.4℃,无霜期长达 355d。雨量充沛,每年 4—9 月份为雨季,平均年降雨量 1933.3mm,日照时长 2120.5h。

图 1 研究区位置

Fig.1 Study area and spatial distribution

1.2 数据来源

深圳市典型空气污染物数据来源于《2000—2018 年深圳市环境质量公报》公布的全市年平均浓度。其中,SO_2、NO_2和 PM_{10}统计时段为 2000—2018 年;O_3浓度统计时段为 2006—2018 年。深圳市社会经济数据来源于《2000—2017 年深圳市统计年鉴》。本研究所用社会经济指标类型包括:人口、经济、城市用地、机动车数量、产业结构和能源结构(表 1)。

表 1 社会经济指标

Table 1 Socio-economic indicators

类型 Types	指标 Indicators	类型 Types	指标 Indicators
人口 Population	人口密度	机动车辆 Motor Vehicles	民用机动车数量
经济 Economy	人均 GDP	产业结构 Industrial Structure	二产比重 / 三产比重
城市用地 Urban Land Use	建成区面积	能源结构 Energy Structure	清洁能源 / 非清洁能源

1.3　研究方法

研究利用 SPSS 19.0 中的曲线拟合工具,来分析典型污染与各社会经济指标的相关关系,利用双侧检验来评估拟合曲线的显著性水平。

根据《2000—2018 年深圳市环境质量公报》中针对空气污染的“措施与行动”的表述内容,对每年该内容中污染源管控方向侧重点的不同进行排序;再根据每年的污染源管控方向的排序,分析每个时期(“十五”、“十一五”、“十二五”和“十三五”)的综合污染源排序,以此探究深圳市空气污染防控具体措施的变化与各典型污染变化的关系。

2　结果与分析

本研究首先分析了深圳市空气质量演变特征以及各典型污染物的变化特点。进一步分析了宏观社会经济发展以及具体的空气污染防控措施实施对各典型污染物浓度变化的影响,探究了宏观发展和具体措施对城市空气污染防控的作用。

2.1　深圳市空气质量现状与演变特征

2.1.1　深圳市空气质量现状

2018 年深圳市空气质量基本保持良好水平。2018 年环境质量公报显示,全市前三个季度空气质量达到优良天数占比平均为 95.6%。其中 SO_2浓度基本与上年持平,保持在 7μg/m^{3}左右。NO_2浓度相对于上年同期有微弱下降,平均浓度为 28μg/m^3。PM_{10}浓度相对于上年同期有微弱上升,平均浓度为 41μg/m^3。$PM_{2.5}$浓度基本与上年同期持平,平均浓度为 25μg/m^3。O_3浓度与上年同期相比略有上升,平均浓度为 61μg/m^3。

2.1.2　深圳市空气污染超标情况演变特征

2000—2017 年深圳市二级达标天数整体呈波动下降趋势,二级达标天数维持在 150—250d 之间;“十五”期间平均二级达标天数最高,不同阶段演变趋势也不同。“十五”期间,二级达标天数呈波动上升趋势;“十一五”期间,二级达标天数先基本保持平稳 2008 年之后开始逐渐下降;“十二五”期间,二级达标天数比较波动,整体呈上升趋势;“十三五”初期,二级达标天数又开始呈逐渐下降趋势(图 2)。

2000—2017 年深圳市超标天数呈波动变化的特点,超标天数维持在 1—40d 之间,“十一五”期间平均超标天数最低,不同阶段演变特点也不同。“十五”期间,超标天数先下降,2002 年之后开始大幅上升至 2005 年又降至较低水平;“十一五”期间整体呈逐渐下降趋势至 2010 年有小幅上升;“十二五”期间,前期呈逐渐下降趋势,至 2013 年有大幅上升,之后虽开始逐渐下降但仍维持在相对较高的水平;“十三五”前期,超标天数又开始有上升趋势(图 2)。

2.1.3　深圳市一次污染物演变特征

2000—2017 年深圳市典型一次污染物浓度整体均呈下降趋势,不同阶段演变特点不同。2000—2017 年深圳市 SO_2浓度从 27μg/m^{3}降至 8 μg/m^3;“十五”期间,SO_2浓度先有大幅下降后又小幅上升;“十二五”期间,呈逐渐下降趋势,浓度从 30μg/m^{3}降至 11 μg/m^3,降幅最大;“十二五”期间,SO_2浓度降幅较小,前期基本处于平稳水平,后期开始逐渐下降;“十三五”初期 SO_2浓度趋于平稳,维持在 8 μg/m^3。

2000—2017 年深圳市 NO_2浓度从 55 μg/m^{3}降至 30 μg/m^3;“十五”期间,NO_2浓度先呈上升趋势,至 2005 年有较大幅度降低;“十一五”期间,NO_2浓度先有小幅上升,之后基本呈逐渐下降趋势;“十二五”期间至“十三五”前期基本呈逐渐下降的趋势。

2.1.4　深圳市二次污染物演变特征

深圳市 2000—2017 年典型颗粒物浓度整体呈波动下降趋势,其中 2000—2017 年 PM_{10}浓度从 58 μg/m^{3}降至 45 μg/m^3。“十五”期间,PM_{10}浓度基本呈上升趋势,至 2005 年开始至“十一五”期间基本呈缓慢下降趋势;“十二五”前期仍继续降低,至 2013 年有小幅上升之后又开始逐渐下降,直到 2017 年又开始有小幅的上升。

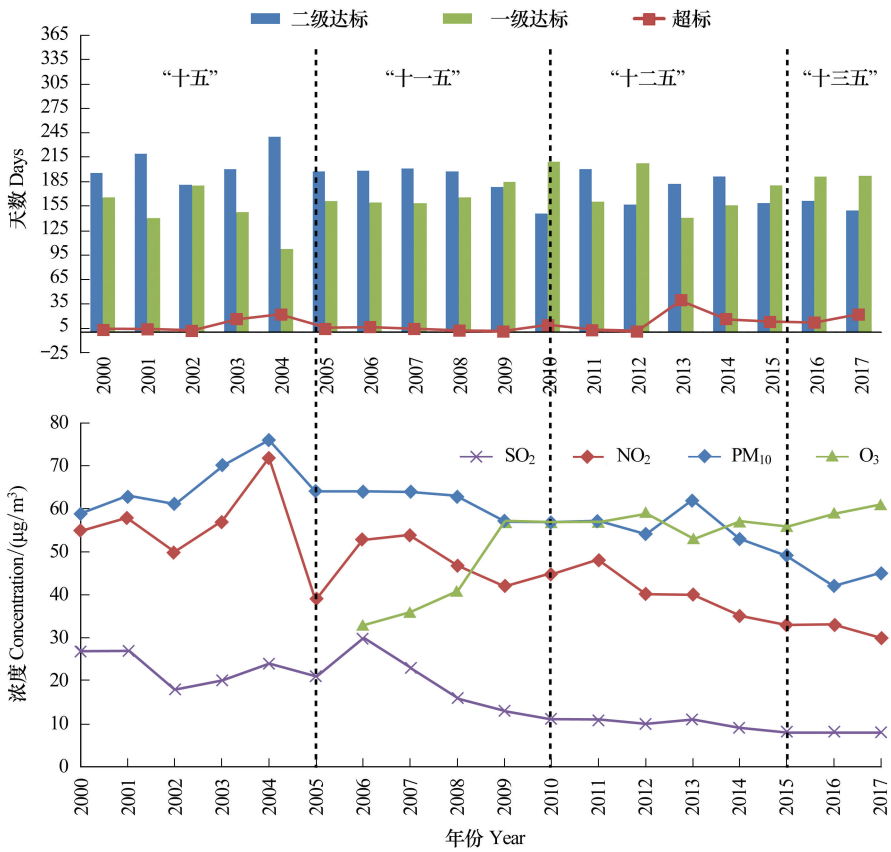

图 2 深圳市空气质量演变特征

Fig.2 Evolutions of air quality in Shenzhen

表 2 深圳市空气质量管控措施演变

Table 2 Evolutions of the control measures for air quality in Shenzhen

	“十五” “The 10th Five-Year”	“十一五” “The 11th Five-Year”	“十二” “The 12th Five-Year”	“十三五” “The 13th Five-Year”
污染源 Sources of pollution	工业	热电厂	热电厂	热电厂
	热电厂	机动车	机动车	机动车
	机动车	工业	家具企业	家具企业
	建筑施工	建筑施工	喷涂企业	汽车维修
	采石场	采石场	汽车维修	汽车制造
	取土场	取土场	建筑装修	自行车制造
	泥头车	泥头车	印刷行业	港口码头
	裸露山体	道路扬尘	扬尘专项	搅拌扬尘
	饮食	VOC 专项	港口码头	裸露地表
		饮食	饮食	饮食
控制组分 Control Components	SO_2	NO_2	NO_2	NO_2
	NO_2	CO	CO	CO
	CO	PM	PM	PM
	PM	VOC	VOC	VOC
		SO_2	SO_2	SO_2
首要污染物 Dominant Pollutants	NO_2	PM_{10}/NO_2	$PM_{2.5}/NO_2$	O_3

2006—2017 年,O_3与 PM_{10}相反,浓度基本呈逐渐上升趋势,从 33 μg/m^{3}上升至 61 μg/m^3,不同阶段上升幅度不同。“十一五”期间,O_3浓度上升幅度最大;“十二五”期间,O_3浓度变化比较波动,至 2015 年之后开始逐渐上升。

2.2　深圳市社会经济发展与空气质量的关系

2.2.1　深圳市经济、人口和城市用地发展与空气质量的关系

本研究首先从经济、人口和建成区用地变化与深圳市典型空气污染物的关系来分析社会经济发展对深圳市空气质量的变化的影响。从各社会经济因子与典型污染物的散点图(图 3),可以看出,对于颗粒物而言,随着深圳市人均 GDP、人口密度和建成区面积的增加,其浓度呈现先增加趋势,至人均 GDP 达到 5 万之后,随着人均 GDP 的继续增加而呈下降的趋势,即符合 EKC 模型假说,拟合曲线均通过了 $P<0.01$ 的检验;并且深圳目前所处阶段为下降阶段。对于典型一次污染物 SO_2和 NO_2而言,随着深圳市人均 GDP、人口密度和建成区面积的增加,其浓度呈下降趋势,也已经处在 EKC 模型的下降阶段,而当深圳市人均 GDP 发展至 16 万之后,深圳市 SO_2和 NO_2浓度基本达到并维持在一级标准以下。与其他污染物不同,深圳市 O_3浓度随着城市人均 GDP、人口密度和建成区面积的增加,呈现先快速增加后趋于平稳的趋势,整体也表现出倒 U 型的 EKC 模型特点,目前处在高浓度的平稳阶段。

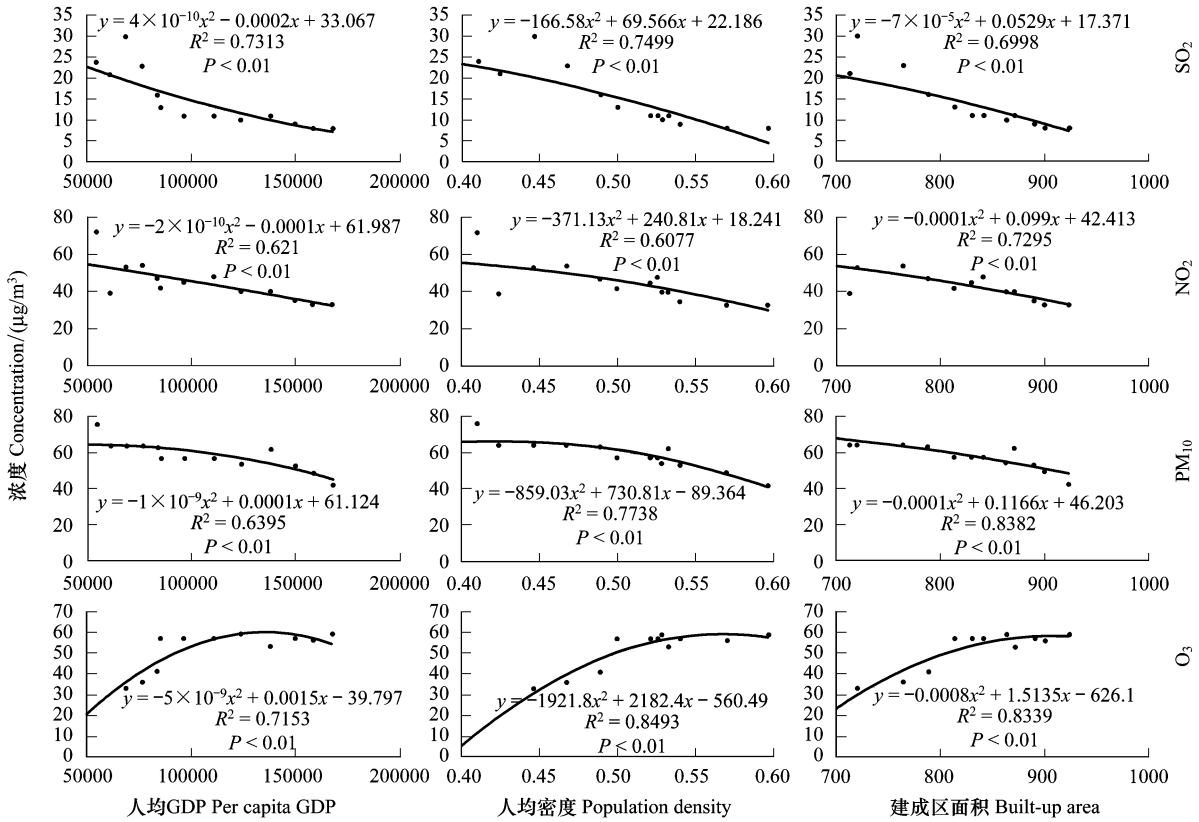

图 3　深圳市典型空气污染物与经济、人口和城市用地发展的关系散点图

Fig.3　Scatter plots of the relationships between typical air pollutants and economy, population and urban land use in Shenzhen

2.2.2　深圳市机动车辆变化与空气质量的关系

以深圳市《统计年鉴》统计的 2000—2017 年民用机动车辆数据代表深圳市机动车辆的变化,通过分析典型污染物与机动车辆的散点图发现(图 4),深圳市民用机动车辆从 2000 至 2016 年增加了 287 万多辆,增加了 9 倍。而随着机动车辆的增加,颗粒物浓度开始虽有小幅的增加,但是机动车辆达到 80 万辆之后均呈下降的趋势。SO_2呈指数下降趋势,NO_2则呈线性下降趋势。而 O_3浓度随机动车的变化则呈先增加,至机动车增至

170 万之后开始趋于平稳的趋势。拟合曲线均通过了 $P<0.01$ 的检验。可以看出,深圳市机动车数量的增加并没有完全导致深圳市空气质量的持续恶化。

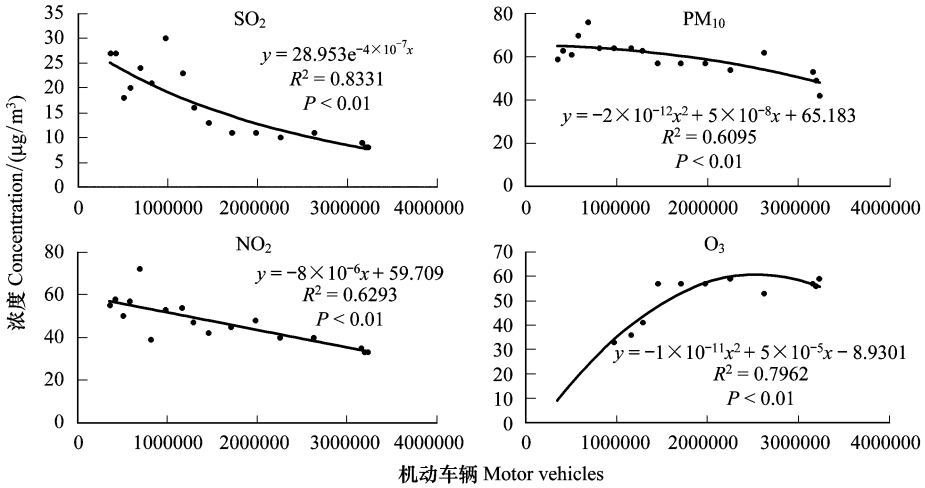

图 4 深圳市典型空气污染物与机动车辆的关系散点图

Fig.4 Scatter plots of the relationships between typical air pollutants and motor vehicles in Shenzhen

2.2.3 深圳市产业结构和能源结构变化与空气质量的关系

由产业结构和能源结构变化与典型空气污染物浓度变化的散点图可知,随着产业结构的不断升级和能源的结构的优化,PM_{10}、SO_2和 NO_2浓度在逐渐降低,但 O_3浓度在逐渐增加,且均呈线性趋势,拟合曲线均通过了 $P<0.05$ 的检验。说明,通过产业结构的升级和能源结构的优化能够显著缓解颗粒物产生的污染问题,但是对 O_3污染问题却起到反作用(图 5)。

2.3 深圳市空气污染防治措施演变特征

在“十五”期间,深圳市首要污染物为 NO_2和 PM_{10}。此时,深圳市主控污染源也是围绕主要污染物进行。如工业和热电厂产生的燃烧排放、机动车尾气排放以及各类扬尘污染问题。对应的主要措施有,工业废气消烟、除尘脱硫处理;集中供热,油品脱硫处理;机动车路检、抽检、车用燃油清洁剂强制使用、低硫清洁柴油的使用等;针对各类扬尘污染源,加大监管和查处力度等。但是,因为此阶段深圳市处于发展的初期,虽然治理具有针对性,但是可能由于治理的力度方向或管理的措施还不够完善,导致此阶段典型污染物,如 SO_2、NO_2、PM_{10}都还是有所上升(图 2、表 2)。

在“十一五”期间,深圳市主控污染源方向持续围绕能产生 NO_2、SO_2等的工业、热电厂燃烧排放和机动车尾气排放以及各类扬尘问题。此阶段对一次污染物如 SO_2和 NO_2治理效果还是比较显著的,尤其是 SO_2污染问题,由于油品脱硫、油改气、集中供热等措施的执行,其浓度基本降低至 10μg/m³左右,同时低 N 燃料器的改造,新能源(电动)机动车的推广和使用、各类限行监管措施的实施,使得 NO_2污染问题也得到了一定程度的改善。但是,对于 PM 污染问题并没有得到很大程度的缓解,O_3浓度甚至在持续上升。为此,除了持续针对传统污染源的防控,在“十一五”后期,开始成立“VOC 专项”,完成排放源清单的调查,开始关注 VOC 排放问题,也即 O_3污染的问题。后期通过对 O_3前体物的防控,可以看到 O_3浓度虽然保持在较高的水平但是没有增加的趋势(图 2、表 2)。

在“十二五”初期,PM_{10}浓度依然维持在较高水平,甚至在前期又开始上升,所以从 2013 年开始,专门成立“扬尘专项”加大扬尘污染的治理,使得后期 PM_{10}浓度持续下降。同时,传统污染源的防控,如热电厂燃烧排放和机动车尾气排放仍然是治理的重点。主要措施如,电厂继续实施脱硫脱硝降 N 处理;机动车继续推广使用新型能源,严格实行排放标准和限行措施等。而在此阶段,NO_2和 SO_2污染问题都持续在改善,其中 SO_2

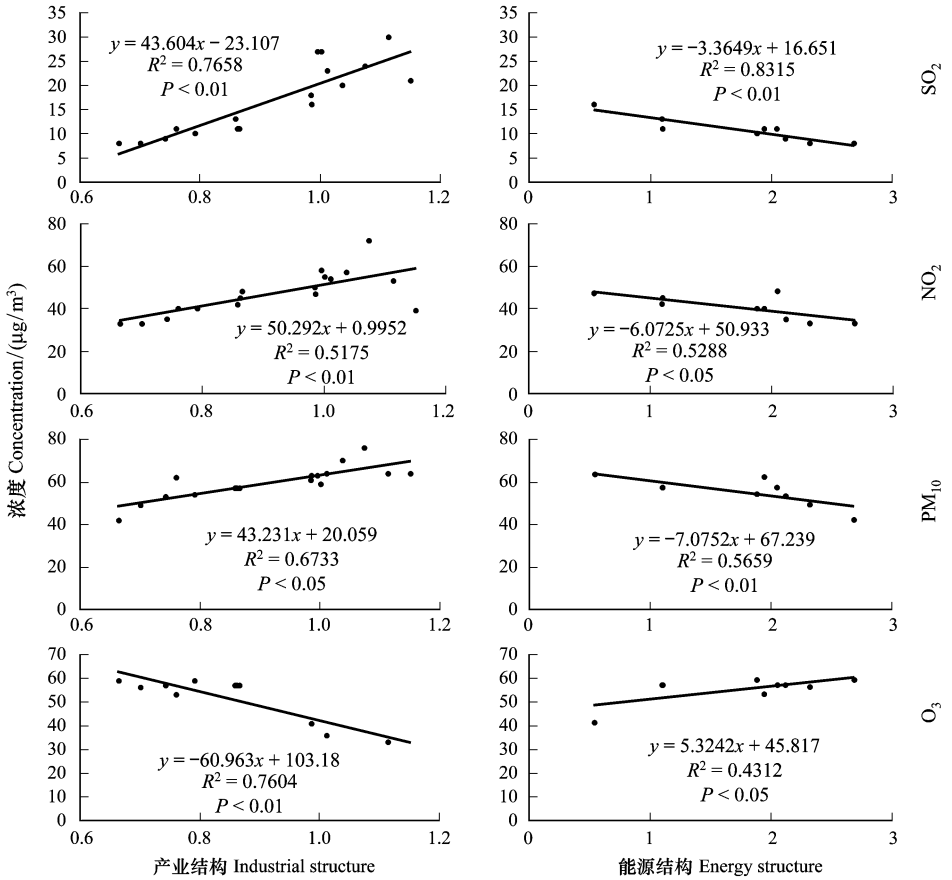

图 5　深圳市典型空气污染物与产业结构和能源结构的关系散点图

Fig.5　Scatter plots of the relationships between typical air pollutants and the industrial structure and energy structure in Shenzhen

浓度甚至降低至 10μg/m³以下。但是,此阶段虽然有针对地对 VOC 污染源进行防控,如家具、喷涂企业,汽车、建筑维修、印刷行业等,使得 O_3浓度维持在了一定的水平,但 O_3污染却依然并没有明显的改善。除此之外,随着粤港澳大湾区城市群发展规划的制定实施,深圳港口船舶运输量大幅增加,船舶燃油排放也成为重点关注的对象之一,主要控制措施如低硫油品的使用,“油改气”、“油改电”等(图 2、表 2)。

在“十三五”前期,热电厂污染已经不再是重点防控的污染源,而机动车尾气排放依然是持续防控的对象,如继续加大机动车的电动化率等措施的实施。同时继续加强港口码头污染以及扬尘污染问题的防控。与以往措施不同的是,针对扬尘污染,增加了裸露地表扬尘问题的治理,如通过绿地覆盖等措施进行防治和污染物尤其是颗粒物等的消减。因此,此时传统的首要污染物均已经得到了控制,如年平均 NO_2和 PM 类污染物均已经达到国家一级标准,SO_2浓度基本维持在 7μg/m³的较低水平,得到了有效治理。但是 O_3污染问题依然严峻,并成为该阶段的首要污染物,虽然针对其前体物的污染源仍在继续防控,但是 O_3浓度却有增加的趋势,是目前重点防控的污染物类型(图 2、表 2)。

3　讨论与结论

3.1　深圳市城市化与空气质量的调控机制、策略与过程

2000—2017 年深圳市不同典型污染物在不同阶段变化特点不同,主要可能是因为不同阶段发展速度和管控的措施和力度具有差异。根据不同污染物的变化特点,可将污染物分为两类。其中,PM_{10}与 SO_2和 NO_2变化特征比较类似,但与 O_3变化特征具有较大差异。主要原因是 SO_2和 NO_2的污染源比较类似,且两者均是

PM_{10}的典型前体物[24]。而对于O_3而言,其主要是由其前体物NO_X和 VOCs 在光照的条件下生成[23]。虽然NO_2(NO_X)浓度在降低,但是因为 NO 对O_3的生成有滴定作用,所以在 VOCs 控制区,当NO_X降低时,对O_3生成的抑制性也会降低,进而会导致O_3浓度增加[25]。同时因为空气中 PM 浓度的减少,大气能见度提高,光照强度变强,使得O_3生成反应可能也在变强。这些结果,也在暗示我们,在雾霾污染逐渐缓解的过程中,可能会导致O_3污染的加剧,因此各城市在进行空气污染的治理时,需要根据各污染物的变化特点和相互之间的关系,不断调整管控的方向。

典型污染物与深圳市社会经济发展指标的关系,表明深圳市整个社会经济快速发展阶段并没有导致典型污染物如 PM、SO_2和NO_2类的污染物的持续恶化,而是很快就越过 EKC 模型的拐点处在下降阶段。主要原因是,深圳市在快速发展的同时也在不断调整产业结构和能源结构。且产业结构和能源结构与PM_{10}的显著线性关系也表明其对 PM 类污染缓解至关重要。而对于O_3而言,虽然随着社会经济的发展,也满足 EKC 的模型假说,但是目前仍处在较高浓度的平稳阶段,并且产业结构和能源结构的优化并不能缓解O_3污染问题。主要原因可能是一方面因为其前体物如NO_X的降低和雾霾污染的缓解对其生成产生了影响;另一方面,研究表明城市热环境的变化对O_3的生成也具有显著影响[26]。而随着深圳市城市化的不断发展,不透水表面不断增加,使得城市热污染问题也越来越严重[27],进而影响O_3的生成与扩散,或许是导致O_3污染难以得到缓解的重要原因。

通过分析机动车辆与典型污染物,尤其是与NO_2的相互关系,发现作为NO_2的主要污染源之一[28],机动车数量的增加并没有导致NO_2的持续恶化。分析可能的原因,一方面是因为,机动车辆与社会经济发展具有很强的协同性,所以该指标反映的还是社会经济的特点。而另一个主要的原因,可能是深圳市持续对机动车辆的管控措施的实施起到了很好的效果。如严格实行排放和油品标准的同时,不断推广和使用新能源,积极提高机动车的电动化率等措施,使得深圳市机动车辆虽然在增加,但是尾气排放的污染问题却不严重,NO_2类污染问题仍然能够得到很好的缓解。

除了宏观上产业结构和能源结构的不断优化,深圳市实施的持续性和针对性的具体措施对于空气质量的改善也起到至关重要的作用。对于控制目标,在持续控制传统污染物的同时,随着首要污染物的变化,及时加入新型污染物的控制。如针对O_3污染加剧的问题,深圳市及时展开对其前体物 VOCs 的防控,并且起到作用,虽然没有显著降低O_3浓度,却使得O_3污染没有再继续加剧。但是,在污染源的控制方面,尤其是在O_3前体物 VOCs 的控制上,主控污染源多关注人为活动排放的 VOCs,而忽略对于生物性 VOCs 的关注和防控。大量研究表明,多数植物能释放 VOCs,参与O_3生成[29-31]。因此,弄清楚深圳市生物性 VOCs 的清单,及其对O_3生成的贡献,进而调整深圳市植被组成对O_3污染问题的缓解也至关重要。在油品使用产生的污染控制方面,深圳市通过不断地调整燃油品质和发展新能源,如,油品脱硫、降 N 燃烧器的使用以及大量使用电力等新能源,最终成功使得相应污染物实现减排,污染问题也得到了有效的缓解。

3.2 结论与建议

深圳市自改革开放以来,在经济快速发展的过程中,虽然也经历了较严重的大气污染问题,如雾霾污染问题,但是目前深圳市的空气质量已经达到并保持在良好的水平。深圳市各类型空气污染物与城市社会经济发展均符合 EKC 模型假说,进一步验证了 EKC 模型在空气污染问题中的应用。其中PM_{10}、NO_2和SO_2均已经很快越过了 EKC 曲线的“拐点”,达到国家空气质量一级标准,进入改善阶段。

目前深圳市的首要污染物为O_3,归结于深圳市的及时防控措施的实施,近几年O_3浓度虽并没有持续严重恶化,但是一直保持在较高水平甚至有上升的趋势。针对O_3污染问题,深圳市今后应重点关注的方向有:城市人为排放 VOCs 和植物释放 VOCs 对O_3生成的相对贡献;城市热环境对O_3浓度的影响等。

深圳市空气污染问题的快速成功治理,离不开深圳市针对空气污染问题的防控措施的实施。研究表明通过有效的治理措施的实施,城市空气污染问题随着城市社会经济发展的变化是可以尽早越过 EKC 模型的拐点,实现持续改善的。

总结深圳市空气质量改善历程和措施,发现主要有两大主要方向:宏观上严格把控;微观上精准治理。宏观上,重点放在产业结构和能源结构的快速调整上。而在微观精细化的管理上,针对空气污染的治理政策一定要具有持续性、精准性和及时性特点。例如,针对 SO_2、NO_2和 PM_{10}的持续性和精准性治理:工业、热电厂、机动车、扬尘污染等的持续管控;针对 O_3污染治理的及时性:摸清污染源之后,成立专项及时进行控制。面对新兴的污染源,如粤港澳大湾区发展带来的港口污染问题也及时的进行防控,以至于没有使空气污染问题得到恶化。等等措施,都为我国其他城市空气污染问题的治理提供了很好的借鉴。

参考文献(References):

[1] Song C B, Wu L, Xie Y C, He J J, Chen X, Wang T, Lin Y C, Jin T S, Wang A X, Liu Y, Dai Q L, Liu B S, Wang Y N, Mao H J. Air pollution in China: status and spatiotemporal variations. Environmental Pollution, 2017, 227: 334-347.

[2] Zhang Y L, Cao F. Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in China at a city level. Scientific Reports, 2015, 5: 14884.

[3] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities. Environmental Pollution, 2014, 194: 163-170.

[4] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate ($PM_{2.5}$) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973-2013. Scientific Reports, 2016, 6: 23604.

[5] 韩立建. 城市化与 $PM_{2.5}$时空格局演变及其影响因素的研究进展. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1011-1021.

[6] 郭施宏, 高明, 孟庆香, 刘曼璐. 空气质量与城镇化质量协调关系研究——基于全国 73 个主要城市的数据. 生态经济, 2015, 31(3): 25-30.

[7] Zhao X L, Zhou W Q, Han L J, Locked D. 2019. Spatiotemporal variation in PM2.5 concentrations and their relationship with socioeconomic factors in China's major cities. Environment International, 2019, 133: 105145

[8] Grossman G M, Krueger A B. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. National Bureau of Economic Research (NBER), Cambridge, 1991.

[9] Shafik N, Bandyopadhyay S. Economic Growth and Environmental Quality: Time Series and Cross-country Evidence. Washington, DC: The World Bank, 1992.

[10] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析. 管理世界, 2009, (4): 27-36.

[11] 罗岚, 邓玲. 我国各省环境库兹涅茨曲线地区分布研究. 统计与决策, 2012, (10): 99-101.

[12] 程曦. 太湖水质变化与经济发展关系研究——基于环境库兹涅茨曲线(EKC)方法. 环境与可持续发展, 2012, 37(5): 73-77.

[13] 赵淑娟, 刘海英. 基于 EKC 曲线的黑龙江省水环境与经济发展关系研究. 国土与自然资源研究, 2013, (2): 56-58.

[14] 丁焕峰, 李佩仪. 中国区域污染影响因素: 基于 EKC 曲线的面板数据分析. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 117-122.

[15] 张丽峰. 北京碳排放与经济增长间关系的实证研究——基于 EKC 和 STIRPAT 模型. 技术经济, 2013, 32(1): 90-95.

[16] 谌伟, 李小平, 孙从军, 程曦, 蔡婧. 1999—2005 年上海市纵向时间序列生态足迹分析. 生态环境, 2008, 17(1): 422-427.

[17] Hao Y, Liu Y M. The influential factors of urban $PM_{2.5}$ concentrations in China: a spatial econometric analysis. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1443-1453.

[18] 严智勇. 深圳市近年来环境空气质量情况及主要影响因素分析研究. 环境科学与管理, 2014, 39(8): 125-129.

[19] 唐喜斌. 深圳大气质量改善经验总结. 绿色科技, 2017, (14): 8-10.

[20] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Qian Y G, Wang W M. Fine particulate ($PM_{2.5}$) dynamics before and after China's "Reform and Opening up" policy in Shenzhen. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, 111: 100-104.

[21] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T A, Li W F, Qian Y G. Multicontaminant air pollution in Chinese cities. Bull World Health Organ, 2018, 96(4): 233-242E.

[22] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, Ho K F, Cao J J, Han Y M, Daellenbach K R, Slowik J G, Platt S M, Canonaco F, Zotter P, Wolf R, Pieber S M, Bruns E A, Crippa M, Ciarelli G, Piazzalunga A, Schwikowski M, Abbaszade G, Schnelle-Kreis J, Zimmermann R, An Z S, Szidat S, Baltensperger U, El Haddad I, Prévôt A S H. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. Nature, 2014, 514(7521): 218-222.

[23] Fishman J, Crutzen P J. The origin of ozone in the troposphere. Nature, 1978, 274(5674): 855-858.

[24] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.

[25] Planning and Technical Support Division, California Air Resources Board. The Ozone Weekend Effect in California. Sacramento: Planning and Technical Support Division, California Air Resources Board, 2003.

[26] Fallmann J, Forkel R, Emeis S. Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality. Atmospheric Environment, 2016, 125: 199-211.

[27] 郭秋萍, 邹振东, 李宏永, 邱国玉. 深圳市城中村的热环境特征与热岛强度分析. 生态环境学报, 2015, 24(3): 427-435.

[28] 张兴赢, 张鹏, 张艳, 李晓静, 邱红. 近 10a 中国对流层 NO_2的变化趋势、时空分布特征及其来源解析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(10): 1409-1416.

[29] 刘益曦, 胡春, 刘培蕾, 朱圣潮. 城市常见植被固碳与 VOC 排放的相关性及其应用潜力. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 97-104, 113-113.

[30] 池彦琪, 谢绍东. 基于蓄积量和产量的中国天然源 VOC 排放清单及时空分布. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(3): 40-41.

[31] 崔凤, 任荣, 熊峰. 植物 VOC 排放. 科技与创新, 2017, (19): 138-139.