

# 深圳地区臭氧污染来源的敏感性分析

梁永贤<sup>1\*</sup>, 尹魁浩<sup>1</sup>, 胡泳涛<sup>2</sup>, 刘宝章<sup>3</sup>, 廖汝娥<sup>4</sup>, 颜敏<sup>1</sup> (1.深圳市环境科学研究院, 广东 深圳 518001; 2.美国佐治亚理工学院土木和环境工程学院, 美国 亚特兰大 GA 30005; 3.北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 4.深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司, 广东 深圳 518001)

**摘要:** 利用美国 EPA 开发的区域多尺度空气质量模式 CMAQ 对 2008 年 8 月发生在深圳地区的臭氧污染过程进行模拟, 运用源敏感性识别工具 DDM-3D 分析深圳本地排放源及周边地区排放源对深圳地区臭氧污染形成的敏感性。研究表明, VOCs 人为源排放对深圳臭氧形成敏感度高, 控制深圳臭氧污染的关键在于控制 VOCs 人为源排放, 控制重点应放在化学品/橡胶/塑胶、印刷、电子产品制造、家具、玩具、制鞋、建筑涂料使用、家用溶剂等方面; 深圳的臭氧污染具有区域特征, 在不利天气条件下, 需与周边城市协调控制才能达到 8h 平均浓度  $120\mu\text{g}/\text{m}^3$  的目标。

**关键词:** 深圳; 臭氧; 敏感性; 源排放

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2014)06-1390-07

**Sensitivity analysis of ozone precursor emission in Shenzhen, China.** LIANG Yong-xian<sup>1\*</sup>, YIN Kui-hao<sup>1</sup>, HU Yong-tao<sup>2</sup>, LIU Bao-zhang<sup>3</sup>, LIAO Ru-e<sup>4</sup>, YAN Min<sup>1</sup> (1.Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, China; 2.School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA 30005, USA; 3.College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 4.IER Environmental Protection Engineering Technology Co., Ltd, Shenzhen 518001, China). *China Environmental Science*, 2014,34(6): 1390~1396

**Abstract:** The Community Multiscale Air Quality Modeling System(CMAQ), a 3-D regional chemical transport model, has been used to simulate a heavy ozone pollution episode in Shenzhen in August, 2008. 3D decoupled direct method (DDM-3D) was applied to investigate the sensitivity of ozone formation to precursor emissions from Shenzhen and other cities in the Pearl River Delta during the episode. The results suggested that anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) had high sensitivity to ozone formation, and the key point to control ozone pollution in Shenzhen was to control the anthropogenic VOCs emissions, such as chemical industries, printing, electronics manufacturing, furniture making, toys making, shoe making, use of architectural coatings, and household solvent. The results also showed that the ozone pollution in Shenzhen was regional in extent, and to achieve the controlling objective of 8-hour average ozone concentration lower than  $120\mu\text{g}/\text{m}^3$  during the adverse weather, jointly control measures should be put into practice in Shenzhen and in other surrounding cities.

**Key words:** Shenzhen; ozone; sensitivity; emission

近年来,随着深圳市及周边珠江三角洲城市经济的快速发展,机动车和人口的持续增长,来自工业、交通和城市面源等排放的大量污染物使得深圳市夏季的臭氧浓度保持较高的水平,2006~2010年深圳市8月份9个常规监测点的资料统计结果表明,光化学烟雾指示物臭氧有逐年升高的趋势<sup>[1]</sup>。高浓度的对流层臭氧会对人体健康、农业生产以及生态系统造成诸多不利影响<sup>[2]</sup>,臭氧

污染正引起深圳环保部门的重视。

由于臭氧是氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和挥发性有机物(VOCs)在大气中通过一系列光化学反应形成的二次污染物,其浓度水平对前体物的排放变化具有非线性的化学响应特征<sup>[3]</sup>,因此,识别臭氧的来源、量

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 深圳市环境科研专项资金资助项目(SZCG2010022552)

\* 责任作者, 高级工程师, yongxianliang@163.com

化各类污染源对臭氧的贡献是比较复杂的。

目前,有关深圳地区臭氧来源,臭氧生成机制,将  $\text{NO}_x$  或者 VOCs 作为优先控制的对象等研究鲜有报道。弄清深圳地区臭氧污染的来源和成因,对制定有效的控制对策,具有重要的意义。

目前用来分析污染源的敏感性的工具主要有 BFM 方法(brute-force Method)和 DDM-3D 方法(三维去耦合直接法)两种。由于 BFM 方法计算效率较低,同时该方法是一种线性计算方法,已不能适应臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$  等二次非线性形成的污染物的源敏感性分析,正逐渐被计算效率高,且是非线性的源敏感性分析方法 DDM-3D 取代。

本文运用区域空气质量模式 CMAQ 对 2008 年 8 月 20~21 日发生在深圳地区的严重臭氧污染进行了模拟,在分析深圳地区臭氧污染特征的基础上,利用 DDM-3D 源敏感性分析工具识别深圳地区臭氧的来源及其贡献,探讨深圳地区臭氧的生成机制,为控制深圳地区臭氧污染提供参考。

## 1 材料与与方法

### 1.1 模拟时段的选取

不利天气条件如台风登陆前外围下沉气流、地面均压区或弱的高压脊控制、冷锋来临前低压控制、准静止锋影响且无有效降水天气、副热带高压持续控制且地面风力微弱等天气,在这些天气下大气中的污染物容易堆积并造成较为严重的空气污染。2008 年的 8 月 20~21 日,深圳地区受中心位于深圳东南、台湾西南、菲律宾西北的洋面上台风“鹦鹉”外围下沉气流影响,深圳地区监测到的臭氧 8h 平均浓度最大值为  $191 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,出现在 20 日 19:00,臭氧污染严重。由于夏季南海洋面热带气旋活动频繁,经常导致深圳地区发生臭氧污染,本文选取 2008 年 8 月 16~24 日作为模拟时段,模拟上述典型臭氧污染过程。

### 1.2 模型介绍

本研究采用美国 EPA 最新发布和推荐的区域空气质量管理模式 CMAQ(版本 4.7.1)进行空气质量模拟和敏感性计算。该版本的 CMAQ 带有美国乔治亚理工学院开发的前向敏感性数值分

析工具 DDM-3D<sup>[4-7]</sup>。选择的模拟范围和模拟网格见图 1,本研究采用三重嵌套网格,其中最外层水平网格为 36km,覆盖整个中国和东亚地区,中层水平网格为 12km,覆盖整个广东省,最内层水平网格为 4km,以深圳市为中心,覆盖珠江三角洲。所有嵌套网格在垂直方向分为 13 层,近地面 1km 以下分为 7 层,其中第一层为 18m,以保证在边界层内有足够的垂直分辨率。

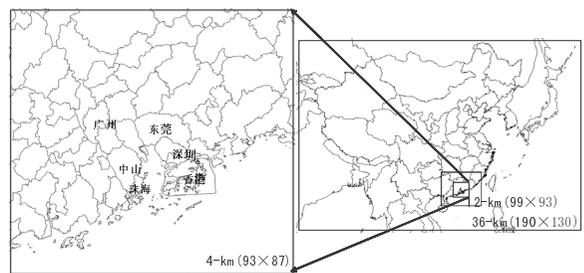


图 1 CMAQ 三重嵌套的模拟范围和模拟网格

Fig.1 Nested domains for CMAQ simulation in resolutions of 36, 12 and 4km

CMAQ 采用 SAPRC99 气相反应机理<sup>[8]</sup>,以及最新的 AERO5 气溶胶模块以及 ACM 云处理模式。36km 以及 12km 网格的空气质量模拟结果为 4km 的目标网格提供边界和初始空气质量条件。对于 36km 以及 12km 网格的人为源排放,采用 INTEX-B 网格化的源数据<sup>[9]</sup>进行空间插值和时间分配得到,同时对细颗粒物按源排放种类做了成分分配。对于 4km 网格则采用 SMOKE 模式<sup>[10]</sup>,利用华南理工大学编制的珠江三角洲 2007 年源排放清单<sup>[1,11-19]</sup>为输入模拟得到。天然源则采用 BEIS3.14 模式<sup>[10]</sup>并利用 MODIS 2006 的植被和土地利用资料模拟得到。

CMAQ 空气质量模式的输入气象场由 WRF(Weather Research and Forecast model)模式的 ARW 3.2 版本模拟得到<sup>[20-21]</sup>。输入的第一猜测气象场为 NCEP Final Analysis(FNL)再分析资料,具有 1 度的空间分辨率和 6h 的时间分辨率。气象模拟采用了 MODIS 2006 的土地利用资料,以准确反映珠江三角洲地区近年的迅猛城市化发展进程带来的土地利用的变化。在 WRF 模拟过程

中,利用 NCEP 搜集的全球地面和探空数据 ADP 资料,通过 3D nudging 和 surface nudging 技术对 36km 以及 12km 网格的 FNL 气象场进行了四维资料同化<sup>[20-21]</sup>.

### 1.3 敏感性分析

利用上述数值模拟系统和输入资料,选取典型不利天气条件的污染时段(2008 年 8 月 16~24 日)进行气象、源排放和空气质量模拟.在气象场以及空气质量场的模拟值与监测值吻合的基础上,利用敏感性分析工具 DDM-3D 计算深圳及周边地区各类污染源排放量对深圳的臭氧浓度的敏感性.

本研究在区域上着重分析深圳和东莞(与深圳接壤且源排放量大)两地源排放对深圳臭氧浓度的影响,同时考虑深莞两地外的珠江三角洲其他城市源排放的影响,因此,将珠江三角洲的源排放划分成深圳、东莞和其他城市三部分.由于机动车源排放是臭氧前体物的重要来源,因此本研究在分析深圳源排放对臭氧浓度影响时,将机动车源排放与其他源分开考虑.基于以上划分原则,得到 8 类源排放参数,分别

为:(1)深圳的机动车 NO<sub>x</sub> 源排放(szmvnox);(2)深圳的机动车 VOCs 源排放(szmvvoc);(3)深圳除机动车外其他源的 NO<sub>x</sub> 源排放(szotnox);(4)深圳除机动车外其他源的 VOCs 源排放(szotvoc);(5)东莞的 NO<sub>x</sub> 源排放(dgnox);(6)东莞的 VOCs 源排放(dgvoc);(7)除深圳和东莞外其他城市的 NO<sub>x</sub> 源排放(otnox);(8)除深圳和东莞外其他城市的 VOCs 源排放(otvoc).

本研究中选取以上 8 类源排放作为排放参数进行 CMAQ-DDM-3D 的模拟,分别计算出臭氧浓度对这 8 类源排放参数的归一化敏感性,即这 8 类源排放参数(100%的源排放量)对模拟臭氧浓度的数量化影响.

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟结果评估

利用专门的气象模拟评估分析工具 METSTAT,对 2008 年 8 月 16~24 日利用 WRF 模拟得到的气象场,分别与实际观测资料进行对比并作模式模拟评估,见表 1.监测资料有深圳市 19 个地面气象站的逐时的风速、风向、温度和湿度等气象要素.

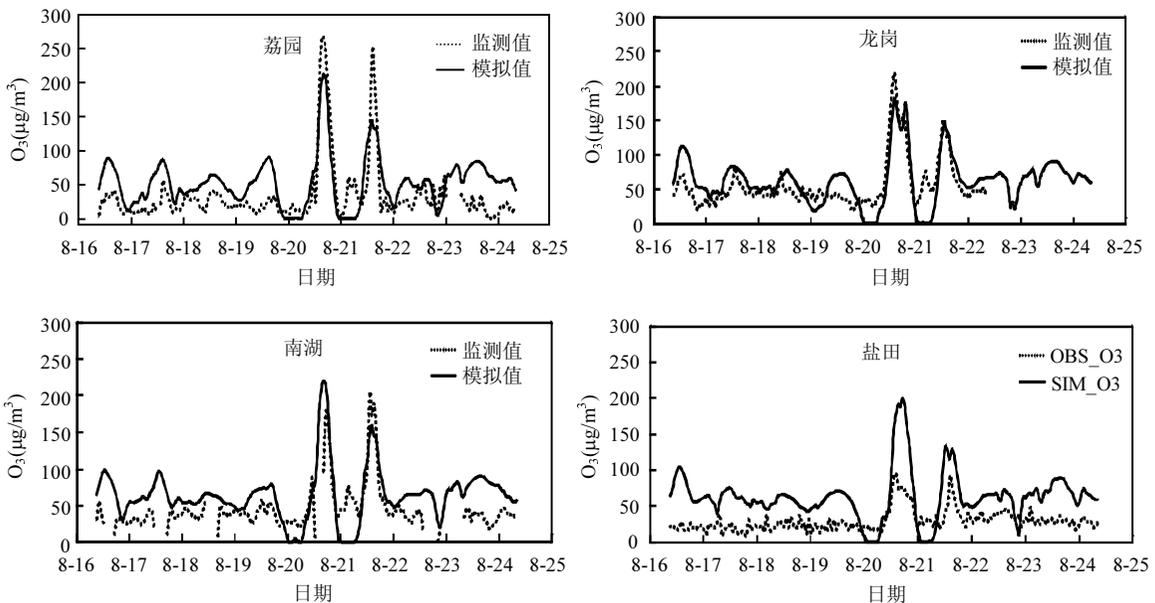


图 2 2008 年 8 月 16~24 日臭氧模拟值与监测值对比

Fig.2 Comparison of simulated and observed ozone during 16-24 August 2008

评估结果表明模拟的气象场基本符合作为空气质量模式输入气象场的要求.模拟值与监测值对比结果与相关文献记载模拟结果差异不大<sup>[22-23]</sup>.

表 1 2008 年 8 月 16~24 日 WRF 模拟气象场与监测对比的统计评估

Table 1 Performance statistics of the WRFs imulated meteorological variables against surface observations during 16~24 August 2008

地面气象要素	$M_0$	$M_f$	$B$	$E$	RMSE
风速(m/s)	3.01	3.58	0.57	0.92	2.01
风向(deg)	151.10	157.09	2.29	17.92	N.A
温度(K)	302.08	302.72	0.64	0.96	1.61
湿度(g/kg)	18.73	18.57	-0.16	1.12	2.13

注: $M_0$ 表示观测值的平均值, $M_f$ 表示模拟值的平均值, $B$ 表示偏差, $E$ 表示误差,RMSE表示均方根误差

表 2 2008 年 8 月 16~24 日模拟结果统计分析

Table 2 CMAQ Performance statistics for the simulated hourly concentrations of surface ozone against observations over Shenzhen during 16~24 August 2008

污染物	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ME( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	MNB(%)	MNE(%)	$R$
$\text{O}_3^*$	9.47	40.51	17	46	0.509

注:MB表示平均偏差,ME表示平均误差,MNB表示平均标准偏差,MNE表示平均标准误差, $R$ 表示相关系数,\*以监测值 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为阈值

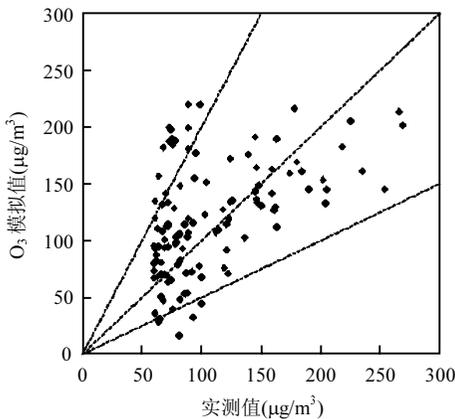


图 3 2008 年 8 月 16~24 日臭氧监测和模拟结果

Fig.3 Scatter plot of observed and simulated ozone during 16~24 August 2008

从臭氧模拟值与监测值的对比曲线分析可知,CMAQ 模型的模拟结果基本能较好的反映深圳的臭氧浓度的水平和变化趋势,臭氧模拟峰值的出现时间与监测值也比较吻合.同时可以看到,在大多数情况下模拟值偏高,这可能与用 2007 年的排放源清单代替 2008 年的源排放情况,造成排放总量有所差别,以及与源清单自身的误差及源分配误差、气象模拟误差等因素有关.

从模拟结果的统计分析和散点图来看,臭氧的模拟值与监测值相关性较好,相关系数为 0.51,平均标准偏差为 17%,平均标准误差为 46%(表 2、图 3).

### 2.2 源排放对臭氧的敏感性空间分布

平均模拟浓度的空间分布见图 4.结合珠江三角洲地面风场变化(图 5),分析这一时刻的敏感性空间分布(图 6)可知, $\text{NO}_x$  源排放对臭氧 8h 平均浓度的敏感性,在源区及附近为负值,即削减  $\text{NO}_x$  源排放会增加这个区域的臭氧 8h 平均浓度,在源区的下风向,贡献为正值,即削减  $\text{NO}_x$  源排放会降低源排放下风向区域的臭氧 8h 平均浓度.同时,可以看出,东莞和其他城市的  $\text{NO}_x$  源排放对深圳的臭氧浓度有很大的负贡献.

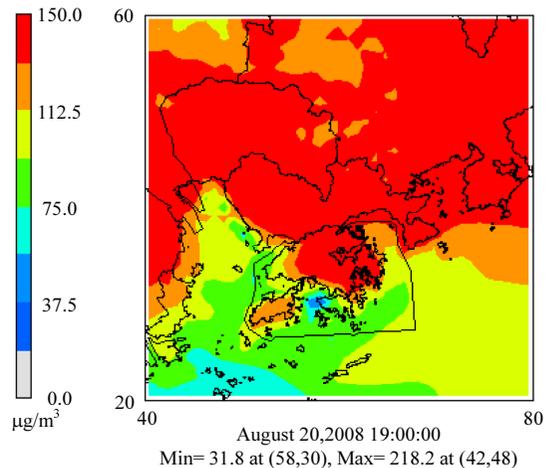


图 4 2008 年 8 月 20 日 19:00 臭氧的 8h 平均模拟浓度的空间分布

Fig.4 Surface distributions of 8-hour average ozone concentration at 19:00LST on August 20, 2008

VOCs 源排放对臭氧 8h 平均浓度的贡献则没有负值出现,即削减 VOCs 源排放总会降低排放源区以及下风向区域的臭氧浓度.同时可以看出,东莞和其他城市的 VOCs 源排放对深圳的臭氧有很大浓度正贡献.

从空间分析可以得到:在发生臭氧高污染时,控制 NO<sub>x</sub> 人为源排放,会使深圳大部分地区的臭氧浓度升高,令污染加重,而削减 VOCs 人为源排放则能较大幅度地降低臭氧污染.

代表性较强,选择荔园作为典型站来分析各类源排放对荔园站的臭氧生成贡献及时间分布(图 7).

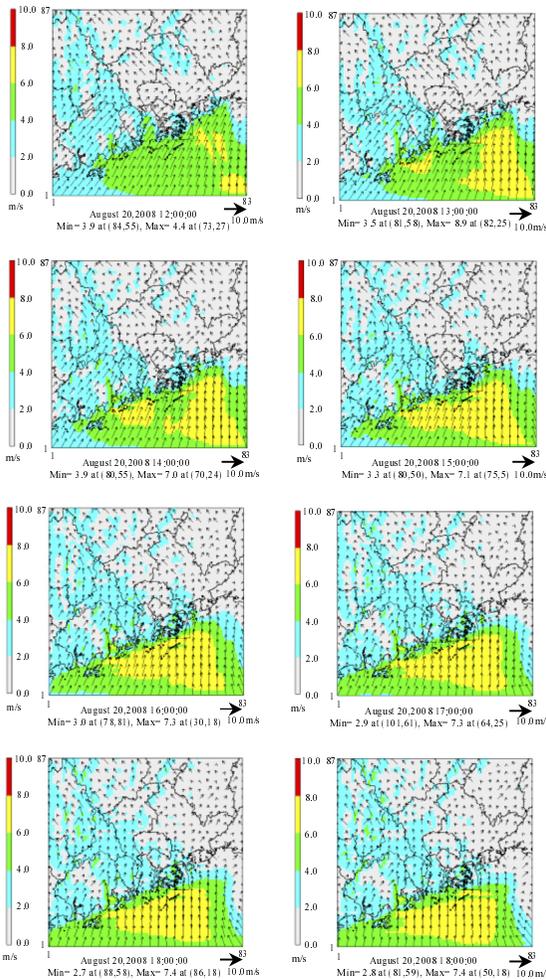


图 5 2008 年 8 月 20 日 12:00~19:00 珠江三角洲风场  
Fig.5 Surface wind field of PRD from 12:00 to 19:00 on August 20, 2008

2.3 源排放对站点的臭氧贡献及其时间分布  
由于荔园站臭氧观测数据质量相对较好,区域

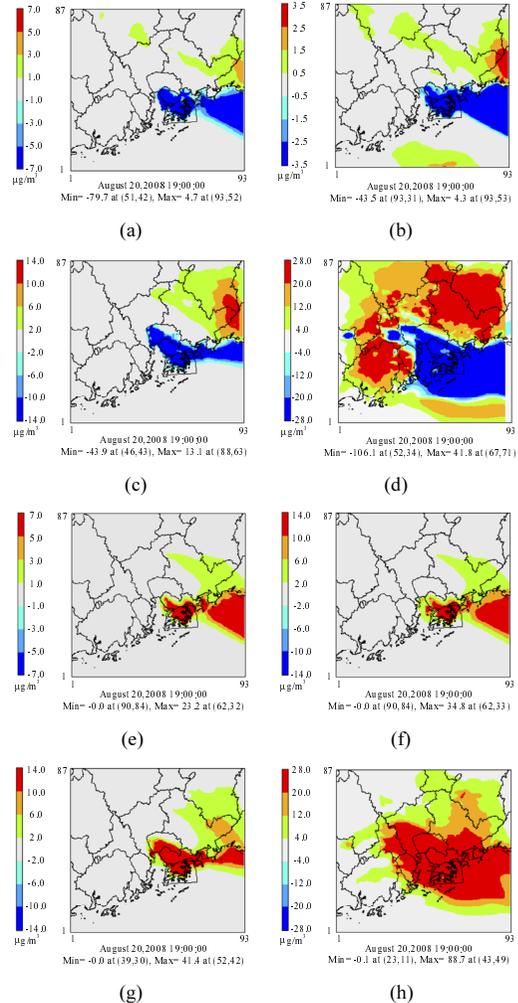


图 6 2008 年 8 月 20 日 19:00 臭氧的 8h 平均模拟浓度对 8 类源排放参数的敏感性的空间分布  
Fig.6 Sensitivity of surface ozone to 8 types of emissions over Shenzhen region at 19:00 on August 20, 2008  
(a)深圳的机动车 NO<sub>x</sub>源排放(szmvnnox);(b)深圳除机动车外其他源的 NO<sub>x</sub>源排放(szotnox);(c)东莞的 NO<sub>x</sub>源排放(dgnnox);(d)除深圳和东莞外其他城市的 NO<sub>x</sub>源排放(otnox);(e)深圳的机动车 VOCs 源排放(szmvvoc);(f)深圳除机动车外其他源的 VOCs 源排放(szotvoc);(g)东莞的 VOCs 源排放(dgvoc);(h)除深圳和东莞外其他城市的 VOCs 源排放(otvoc)

由图 7 可见,在荔园站点,在监测和预测臭氧 8h 平均浓度最高的时刻,即 2008 年 8 月 20 日

19:00,所有 NO<sub>x</sub> 源排放的臭氧 8h 平均浓度贡献均为负值,其中深圳道路移动源的 NO<sub>x</sub> 贡献最大负值(-40μg/m<sup>3</sup>),其他城市的 NO<sub>x</sub> 负值贡献次之(-29μg/m<sup>3</sup>).VOCs 源排放的臭氧贡献为正值,以其他城市 VOCs 贡献最大(39μg/m<sup>3</sup>),东莞 VOCs 贡献次之(32μg/m<sup>3</sup>).时间序列上,VOCs 源排放的臭氧贡献夜间为 0,白天为正.NO<sub>x</sub> 源排放的臭氧贡献多为负值,个别源,比如其他城市的 NO<sub>x</sub> 源排放臭氧贡献,有时在白天出现正值.

从时间序列的分析可以得到:控制 NO<sub>x</sub> 人为源排放,总体来说对控制臭氧污染是不利的,而控制 VOCs 人为源排放是比较有效的.

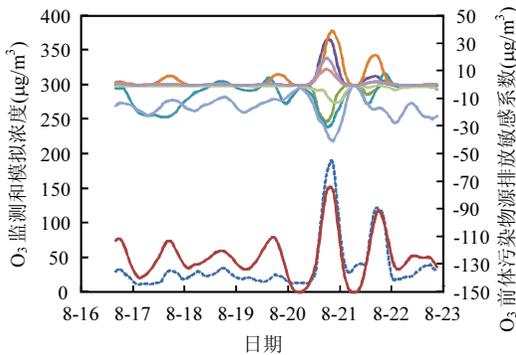
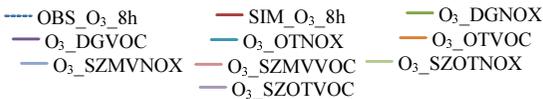


图7 2008年8月16~22日荔园模拟和监测的臭氧8h平均浓度以及8个源排放对臭氧8h平均浓度的敏感性时间序列

Fig.7 Simulated and observed 8-hour average surface O<sub>3</sub> concentration at the Liyuan site during 16-22 August 2008, and the sensitivity of ozone simulation to 8 types of emissions



### 2.4 敏感性分析对控制方案选择的意义

由各类源排放对站点的臭氧贡献分析可知,计算得到的源排放对臭氧浓度的定量贡献可以为制定控制方案提供便利的决策依据.以荔园站2008年8月21日为例,观测到的8h最大浓度为191μg/m<sup>3</sup>,如执行8h臭氧浓度标准为120μg/m<sup>3</sup>[24],那么需要降低71μg/m<sup>3</sup>.模拟得到的8h最大浓度为154μg/m<sup>3</sup>,因此,如果模拟值成比

例减低71×154/191=57μg/m<sup>3</sup>,将使8h浓度达标.根据图7为得到57μg/m<sup>3</sup>的臭氧削减量,可以有若干方案,比如同时削减深圳其他源的VOCs排放和东莞的VOCs排放等.在这里只考量控制深圳其他源VOCs排放,看臭氧是否能达标,从图7可以得到臭氧8h最大浓度为154μg/m<sup>3</sup>时,深圳其他VOCs源的排放的贡献为16μg/m<sup>3</sup>,折合到实际贡献为16×154/191=13μg/m<sup>3</sup>,即在不利于天气条件下,只控制深圳其他VOCs源排放,只能最大8h浓度降到178μg/m<sup>3</sup>.因此,只控制深圳本身的VOCs排放,在不利于天气条件下,要把臭氧8h平均浓度控制在WHO空气质量标准(120μg/m<sup>3</sup>)以下,是很困难的,需要深圳与珠江三角洲周边城市协同控制才可能达到控制目标.

不同方案均可利用以下方程进行优化,对每一个站点的每一个超标浓度均可得到如下方程:

$$\Delta E_1 \times S_1 + \Delta E_2 \times S_2 + \dots + \Delta E_8 \times S_8 = \Delta C_p = (C_0 - C_p) \times C_p / C_0$$

式中:ΔE<sub>1</sub>是第1种源的削减比例;S<sub>1</sub>是臭氧浓度对第1种源排放参数的敏感性;ΔC<sub>p</sub>是目标控制的臭氧预测浓度削减量;C<sub>0</sub>是监测浓度值;C<sub>p</sub>是预测浓度值;C<sub>s</sub>是需要达标的浓度标准.

求解以上方程,可以得到多种保证所有浓度均达标的源排放削减方案.

方程同样可以很便捷的用于评估拟采用的控制方案以检验评估效果,即削减量是否使臭氧浓度达标.

### 3 结论

3.1 运用CMAQ模式对深圳地区的2008年8月份的臭氧进行模拟,将监测值与模拟值进行对比,结果表明,CMAQ模式能较好的重现典型臭氧污染的过程.

3.2 DDM-3D敏感性分析结果可知,NO<sub>x</sub>人为源排放对深圳的臭氧贡献多表现为负值,VOCs人为源排放对深圳臭氧贡献表现为正值,说明在深圳控制臭氧浓度的关键是控制人为VOCs排放源,根据深圳的产业结构和人口规模特征,控制重点应放在化学品/橡胶/塑胶、印刷、电子产品

制造、家具、玩具、制鞋、建筑涂料使用、家用溶剂等方面。

**3.3 深圳市的臭氧污染问题具有区域性特征, 周边城市的排放的污染物和生产的臭氧在一定气象条件下向深圳传输,对深圳市的臭氧浓度水平产生影响。**

**3.4 在不利天气条件下,只控制深圳本身的源是很难达到臭氧 8h 平均浓度  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的目标,需要协同东莞、香港及其他周边城市共同控制。**

#### 参考文献:

- [1] 深圳市环境科学研究院.2011 年第 26 届世界大学生夏季运动会环境空气质量预测预报及保障措施研究 [R]. 深圳:深圳市环境科学研究, 2011.
- [2] 王雪松,李金龙,张远航,等.北京地区臭氧污染的来源分析 [J]. 中国科学(B 辑:化学), 2009,39(6):548-559.
- [3] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [4] Napelenok S L, Cohan D S, Hu Y, et al. Decoupled direct 3D sensitivity analysis for particulate matter (DDM-3D/PM)[J]. Atmospheric Environment, 2006,40(32):6112-6121.
- [5] Napelenok S L, Cohan D S, Odman M T, et al. Extension and evaluation of sensitivity analysis capabilities in a photochemical model [J]. Environmental Modelling and Software, 2008,23(8): 994-999.
- [6] Wang X, Zhang Y, Hu Y, et al. Decoupled direct sensitivity analysis of regional ozone pollution over the Pearl River Delta during the PRIDE-PRD2004campaign [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(28):4941-4949.
- [7] CMAS Center. Operational Guidance for the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System [R]. Chapel Hill, North Carolina: Community Modeling and Analysis System (CMAS) Center at the University of North Carolina at Chapel Hill, 2010.
- [8] Luecken D J, Phillips S, Sarwar G, et al. Effects of using the CB05vs. SAPRC99vs. CB4chemical mechanism on model predictions: Ozone and gas-phase photochemical precursor concentrations [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(23):5805-5820.
- [9] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmos Chem Phys, 2009,9(14):5131-5153.
- [10] The institute for the Environment. SMOKE v2.6User's Manual [R]. Chapel Hill, North Carolina: The institute for the Environment The University of North Carolina at Chapel Hill, 2009.
- [11] 郑君瑜,张礼俊,钟流举,等.珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征 [J]. 中国环境科学, 2009,29(5):455-460.
- [12] 余宇帆,卢清,郑君瑜,等.珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单 [J]. 中国环境科学, 2011,31(2):195-201.
- [13] 张礼俊,郑君瑜,尹沙沙,等.珠江三角洲非道路移动源排放清单开发 [J]. 环境科学, 2010,31(4):886-891.
- [14] 车汶蔚,郑君瑜,钟流举.珠江三角洲机动车污染物排放特征及分担率 [J]. 环境科学研究, 2009,22(4):456-461.
- [15] 尹沙沙,郑君瑜,张礼俊,等.珠江三角洲人为氨源排放清单及特征 [J]. 环境科学, 2010,31(5):1146-1151.
- [16] 郑君瑜,郑卓云,王兆礼,等.珠江三角洲天然源 VOCs 排放量估算及时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 2009,29(4):345-350.
- [17] Zheng J, Swall J L, Cox W M, et al. Interannual variation in meteorologically adjusted ozone levels in the eastern United States: A comparison of two approaches [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(4):705-716.
- [18] Zheng J, Zheng Z, Yu Y, et al. Temporal, spatial characteristics and uncertainty of biogenic VOC emissions in the Pearl River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2010,44(16): 1960-1969.
- [19] Zheng J, Zhang L, Che W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(32):5112-22.
- [20] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 [M]. Boulder, Colorado, USA: Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 2008.
- [21] Mesoscale and Microscale Meteorology Division. ARW Version 3Modeling System User's Guide [M]. Boulder, Colorado, USA: Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 2010.
- [22] Wang X, Zhang Y, Hu Y, et al. Process analysis and sensitivity study of regional ozone formation over the Pearl River Delta, China, during the PRIDE-PRD2004campaign using the Community Multiscale Air Quality modeling system [J]. Atmos Chem Phys, 2010,10(9):4423-4437.
- [23] Emery, C A, Tai E, et al. Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for Two Texas Ozone Episodes, project report prepared for the Texas Natural Resource conservation commission [R]. Texas: the Texas Natural Resource Conservation Commission, 2001.
- [24] World Health Organization. Air quality guideline for Europe [M]. 2nd Edition. Copenhagen: World Health Organization, 2000.

**作者简介:** 梁永贤(1981-),男,广东肇庆人,高级工程师,硕士,主要从事大气环境模拟与大气污染控制研究.发表论文 8 篇.