

光化学烟雾的控制试验*

纪飞** 苏文颖 秦瑜

(北京大学地球物理系, 暴雨监测和预测国家重点实验室, 北京 100871)

提 要

利用 MM5 与 RADM 的耦合模式, 设计了 3 个削减源排放的试验, 用以探讨控制光化学污染的有效途径. 试验结果表明, 在 NMHC/NO_x 比值很大的前提条件下, NO_x 地面源排放的削减对降低大气中 O₃ 含量的作用最显著, 而削减 NMHC 对降低大气中 PAN 含量的作用明显, 同时削减 NMHC 和 NO_x 是降低大气光化学污染强度的最佳途径.

关键词: 光化学烟雾 模式 控制

引 言

最近十几年, 随着经济的发展和城市车辆的增加, 工业污染排放和城市污染排放日益严重, 已经造成了非常严重的后果. 尤其在城市, 由于道路的发展和车辆的增加, 光化学污染已经相当严重. 以北京为例, 在 80 年代车辆总数不足十万, 在夏季城市下风方向曾观测到 160×10^{-9} 的高 O₃ 浓度, 90 年代, 车辆迅速增加, 总数已经超过百万, 光化学污染日趋严重. 今后随着城市道路和车辆的发展, 这种污染现象不仅能得以维持, 而且会向郊区扩展. 光化学烟雾本身具有很强的氧化性, 对人畜的健康有很大的危害, 同时对材料的老化和农作物的生长都有很明显的影 响. 因而光化学污染的治理和控制就显得非常的重要.

在大气光化学污染中, O₃、PAN 的浓度是光化学污染程度的特征反映. 为了给治理污染排放, 改善环境状况提供有力的依据, 模式试验是一种经济可行的方法. 本文作了一些削减源排放的试验, 用以探讨缓解大气光化学污染程度的有效途径.

1 模式介绍

本文采用 MM5 与 RADM 耦合建立的区域光化学模式, 用 MM5 来模拟实际天气过程, 为 RADM 提供逐时的风场、温度场、水汽混合比、地面气压及降水资料. 用 RADM 来实际模拟对流层大气光化学过程的各种成分的浓度分布及其变化.

关于 MM5 详细情况参见文献[1]. 模拟区域中心为 116°E 40°N, 水平网格为 45×31,

* 国家自然科学基金重大项目(49392700)“中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响”课题资助.

** 现在空军第七研究所工作.

1998-12-28 收到, 1999-03-04 收到修改稿.

东西方向为 45 个格点, 南北方向为 31 个格点, 垂直分为 23 层, 格距为 60 km. 模拟的时段为 1997 年 6 月 11 日 00: 00~ 13 日 00: 00(UTC, 下同).

RADM 采用与 MM5 相同的水平网格配置, 垂直方向 15 层. 其中的气相化学反应机理考虑了 36 个物种的 80 个气相化学反应方程, 详细化学反应方程参见文献[2]. 模式中考虑了 15 个物种的源排放. NO_x 、 SO_2 的源排放来源于实际资料的估算, 国内部分来源于白乃彬^[3](1996) 的估算, 国外部分来源于 Kato^[4](1987) 的估算. 其它 13 个物种的源排放采用排放因子的方式计算得到. 图 1 为模拟区域内单位网格平面上 NO_x 、 SO_2 的源排放. 模式的初始场和边界条件经过特殊处理得到. 初始场是用大气本底浓度考虑实际地面源排放, 经过模式预运行计算得到. 而模式边界条件是采用嵌套网格的思想, 事先运行一个网格配置相同, 网格距为 2 倍的模式, 将两个模式重迭的部分作为正式运行模式的边界条件.

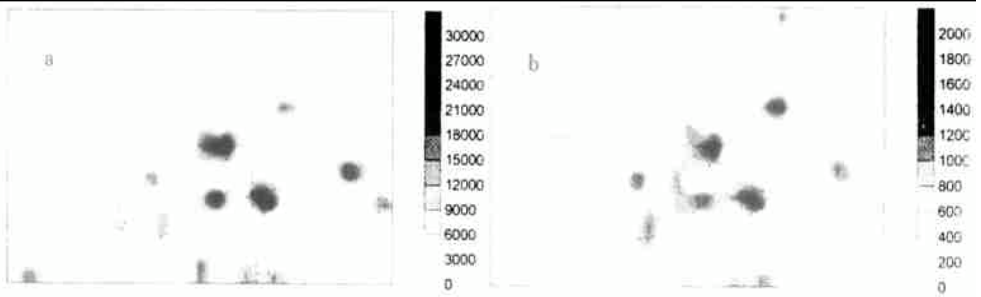
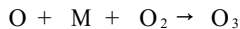
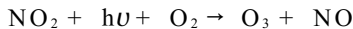


图 1 单位网格面上的 SO_2 (a)、 NO_2 (b) 的源排放(单位: g/s, 下同)

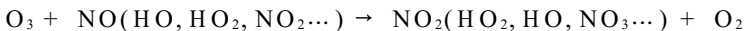
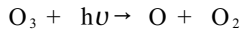
2 机理分析

在本文模式采用的机理中, 关于 O_3 产生和消耗的化学转化过程考虑如下:

O_3 的产生过程:



O_3 的主要清除过程:



在这些清除过程中, 由于 HO 、 HO_2 的浓度较低, 而 O_3 与 NO_2 的反应速度较小, $\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ 则是大气中 O_3 的最重要清除过程, 大气中光化学转化的 O_3 浓度水平取决于以上两个过程净的结果. 在 O_3 的光化学产生过程中, NO_2 的光解是 O_3 产生的关键过程, 大气中 NO_2 的含量是有限的, 如果没有其它源补充, NO_2 在很短的时间内就能光解消耗了. 观测结果表明, NO_2 浓度有明显的日变化, 但总维持在一个范围内, 这说明 NO_2 有其它源补充, 这来源于两个方面, 一是地面源排放补充, 另一个是其它光化学转化产生 NO_2 , 事实上 $\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{HO}$ 是光化学转化产生 NO_2 最主要的过程, 在这个转化过程中 HO_2 起着非常重要的作用, 而 HO_2 来源于 NMHC 与 OH 反应后光解产生, 由光化学产生 O_3 的复杂关系中, 可以发现 NO_x (NO & NO_2) 和 NMHC 是光化学 O_3 产生的两

类重要的前体物.

PAN 是由乙醛氧化产生酰基, 再与 O_2 和 NO_2 反应生成. 可以看出 NO_2 和乙醛是 PAN 的两个前体物. 在大气中 NO_2 的含量相对是较高的, 因此由乙醛氧化产生 PAN 的数量取决于乙醛的含量.

3 控制试验

探讨 O_3 、PAN 随污染源排放减小的变化, 采用标准个例的 O_3 、PAN 值减去同期的试验个例的 O_3 、PAN 的值. 正值反映污染源排放的减小, 造成 O_3 、PAN 也随之减小, 负值反映污染源排放的减小, 造成 O_3 、PAN 增加. 由于光化学反应造成的污染在白天明显, 因此在讨论中重点考虑白天(01: 00~ 11: 00)内的光化学过程, 分析区域内近地面层上 O_3 、PAN 等的变化情况.

3.1 单独削减地面 NO_x 源排放

NO_x 在对流层大气光化学过程中起着非常重要的作用, NO_2 光解产生的 O 与 O_2 反应生成 O_3 , 是大气光化学 O_3 产生的关键过程, 削减 NO_x 的地面源排放对区域内 O_3 的形成和分布有非常显著的影响. 本文首先作一个削减 NO_x 源排放 50% 的试验. 由 NO_x 削减造成的 O_3 浓度变化可以看出(图 2), 在污染比较严重的地区, NO_x 源排放的削减对光化学 O_3 形成的影响显著, 而对比较清洁的地区, 这种影响较小. 从 24 h 平均 O_3 浓度分布可以看出, NO_x 源排放的削减所造成的 O_3 浓度的下降与地面源排放分布有很好的对应, 在污染比较严重的地区, 日平均 O_3 浓度下降 $10 \times 10^{-9} \sim 12 \times 10^{-9}$, 相当于 O_3 浓度下降了 15% 左右. 从太阳辐射比较强烈的中午前后 8 h 平均图上可以看出 O_3 的分布形势与 24 h 平均相似, 但值比 24 h 平均大很多, 在污染严重地区, O_3 浓度平均下降 $16 \times 10^{-9} \sim 18 \times 10^{-9}$, 相当于 O_3 浓度下降了 20% 左右.

削减 NO_x 源排放将造成大气中 PAN 的含量减小, 但这种影响因地而异. 图 3 为 NO_x 源削减后 24 h 平均和 8 h 平均的 PAN 减小量, 由图可以发现与地面源排放有很好的对应, 比较清洁地区影响较小, 污染严重的地区影响较大. 从 24 h 平均的 PAN 分布来看, 污染严重地区 PAN 的含量平均下降 $0.5 \times 10^{-9} \sim 0.6 \times 10^{-9}$. 中午前后 8 h 的平均 PAN 的含量下降比 24 h 平均值明显, 大约为 $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.2 \times 10^{-9}$.

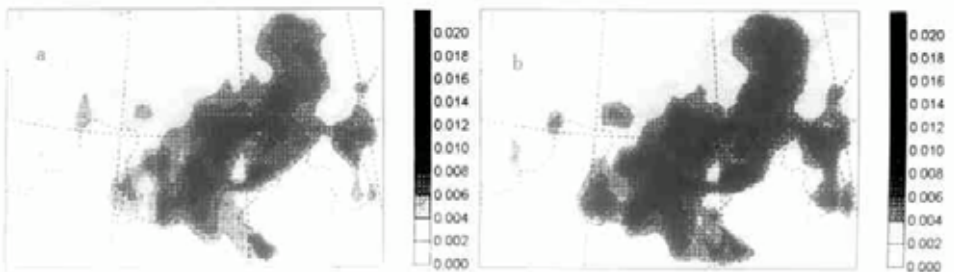


图 2 NO_x 源排放削减后 24 h 平均(a)和 8 h 平均(b)的 O_3 减小量($\times 10^{-6}$)

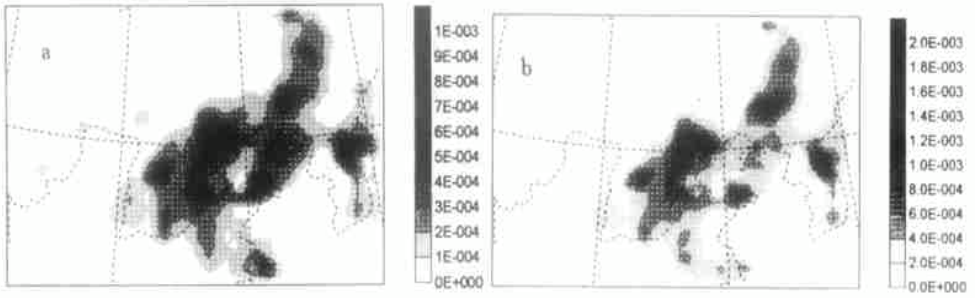


图3 NO_x 源削减后 24 h 平均(a)和 8 h 平均(b)的 PAN 减小量($\times 10^{-6}$)

3.2 单独削减地面 NMHC 源排放

NMHC 在大气光化学过程中起着非常重要的作用. NMHC 的源排放减小, 将通过 HO_2 对大气光化学过程起作用, 影响大气光化学 O_3 形成. 在本试验个例中, 削减了地面源排放 50%, 讨论近地面 O_3 、PAN 的变化情况.

由 O_3 浓度随时间的变化可以看出, 污染源排放削减后, 对区域内近地面 O_3 的浓度水平也有比较明显的影响. 总的趋势, NMHC 削减后, 区域内 O_3 的水平都有所下降, 但对不同的地区、不同的时段, 这种影响不一样. 对 O_3 的浓度影响, 白天比夜间明显, 污染严重的地区比清洁的地区明显.

具体说来, 白天在污染比较严重的地区, 削减 NMHC 源排放之后, 对 O_3 的影响非常明显, 尤其是在太阳辐射比较强烈的时段(03: 00~ 09: 00). 浓度下降最大达到 15×10^{-9} 左右, 相当于 O_3 浓度下降 15%~ 20%, 而比较清洁的地区 NMHC 源排放削减后, 对 O_3 浓度的影响较小, 大概在 3×10^{-9} ~ 5×10^{-9} . 与 NO_x 源排放削减的同期结果相比, 可以看出 NMHC 削减所造成的影响, 比相同比例 NO_x 的削减所造成的影响要小得多, 尤其是在太阳辐射比较强烈的时段, 两者之间的差异比较明显. 说明在 NMHC/ NO_x 比值较大的情况下, NMHC 源排放的削减对大气光化学所造成的影响远不如 NO_x 削减所起的作用有效.

图 4 为 NMHC 源削减后 24 h 和 8 h 平均 O_3 的减少量. 从 24 h 的平均图上, 可以看出日平均变化与以上描述的总体特征非常相似, 污染比较严重的地区日平均 O_3 下降 6×10^{-9} ~ 8×10^{-9} , 相当于 O_3 浓度下降 10% 左右, 比 NO_x 源排放削减所造成的日平均 O_3 浓度下降量要少 5×10^{-9} 左右. 从太阳辐射比较强烈的中午前后 8 h 平均图上, 可以看出

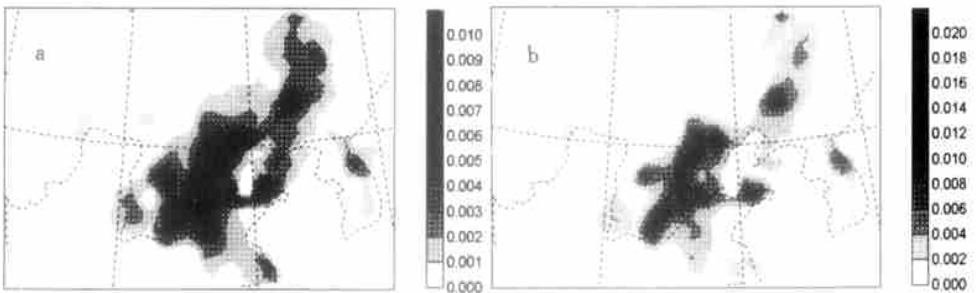


图4 NMHC 源削减后 24 h(a)和 8 h(b)平均的 O_3 减小量($\times 10^{-9}$)

其分布形势与 24 h 平均相似, 但其值却比日平均大得多, 平均在 $10 \times 10^{-9} \sim 12 \times 10^{-9}$, 相当于 O_3 下降 15% 左右, 比相同比例削减 NO_x 源排放造成的 O_3 浓度下降要少 $6 \times 10^{-9} \sim 8 \times 10^{-9}$.

图 5 为 NMHC 源削减后 24 h 和 8 h 平均的 PAN 减少量. 由图中可以看出 NMHC 地面源排放削减后, 对近地面层 PAN 的浓度也有很明显的影 响. 和 O_3 相似, PAN 的浓度变化与地面源排放也有很好的对应, 污染排放削减后, 污染源排放严重的地区对 PAN 的浓度影响大, 而比较清洁地区对 PAN 浓度的变化影响并不明显. NMHC 源排放削减对 PAN 浓度影响在太阳辐射强的时段比太阳辐射弱的时段和夜间明显, 在污染严重地区的中午前后, PAN 的浓度下降 $1.4 \times 10^{-9} \sim 1.6 \times 10^{-9}$, 与相同比例削减 NO_x 对 PAN 浓度的影响相比, NMHC 的削减对 PAN 的浓度影响要大得多, 从 PAN 的日平均图上, 可以看出 PAN 有与 O_3 相似的变化情况, 在污染严重的地区, 平均下降 1×10^{-9} , 而在光化学反应比较强烈阶段, PAN 的平均浓度下降了 1.5×10^{-9} .

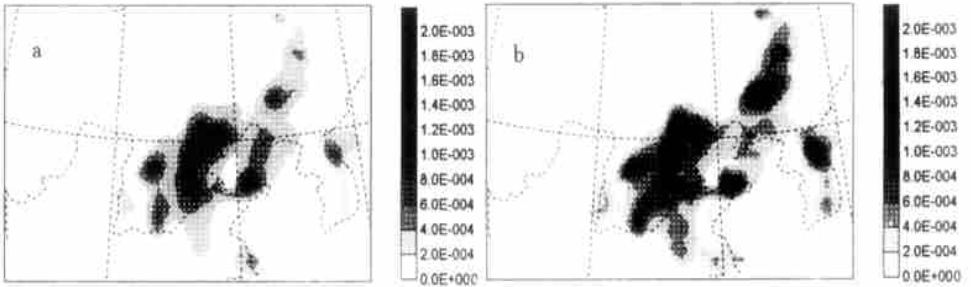


图 5 NMHC 源削减后 24 h(a) 和 8 h(b) 平均的 PAN 减少量($\times 10^{-6}$)

3.3 同时削减 NO_x 、NMHC 源排放

同时削减 NO_x 、NMHC 源排放 50% 所造成的 O_3 减小的分布形势与单独削减 NO_x 或 NMHC 所造成的 O_3 减小的形势相似, 但同时削减 NO_x 、NMHC 源排放造成 O_3 的下降量比单独削减 NO_x 或 NMHC 所造成的 O_3 减小量要大得多, 说明在大气光化学过程中, NMHC 和 NO_x 对光化学 O_3 形成均有重要作用, 这种作用不是 NO_x 和 NMHC 所起作用的简单累加. 图 6 为 NO_x 、NMHC 源削减后 24 h 平均和 8h 平均的 O_3 减小量. 从 24 h 平均图中可以看出同时削减 NMHC、 NO_x 所造成的 O_3 下降平均值达到 15×10^{-9} 左右, 8 h 平均图与 24 h 平均图形势相似, 但 8 h 平均 O_3 下降 $21 \times 10^{-9} \sim 24 \times 10^{-9}$, 相当于 O_3 浓

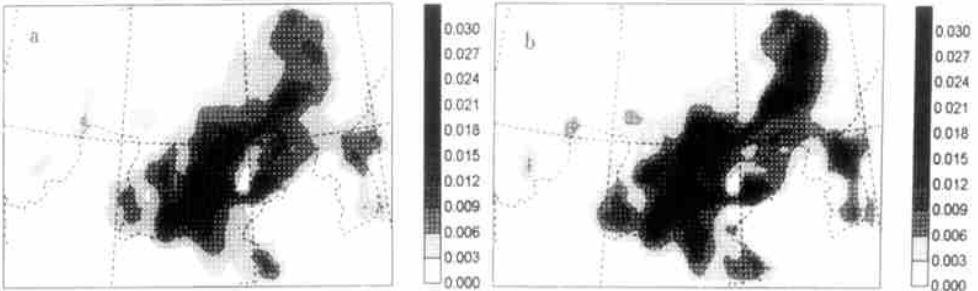


图 6 NO_x 、NMHC 源削减后 24 h 平均(a) 和 8 h 平均(b) 的 O_3 减小量($\times 10^{-6}$)

度下降了 35%.

图 7 为 NO_x 、NMHC 源削减后 24 h 平均和 8 h 平均的 PAN 减小量, 从图上可以看到同时削减 NO_x 、NMHC 对 PAN 浓度的影响与对 O_3 浓度的影响相似, 均比单独削减其中任何一个物种所起的作用都大, 但其中的差距远不如 O_3 那样明显. 同时削减 NO_x 、NMHC 对 PAN 造成的影响比单独削减 NO_x 对 PAN 所造成的影响大, 但与单独削减 NMHC 对 PAN 所造成的影响相比, 两者之间的差异并不明显, 说明大气中 PAN 的含量主要取决于 NMHC 的含量, 对大气中 NO_x 的浓度变化不怎么敏感.

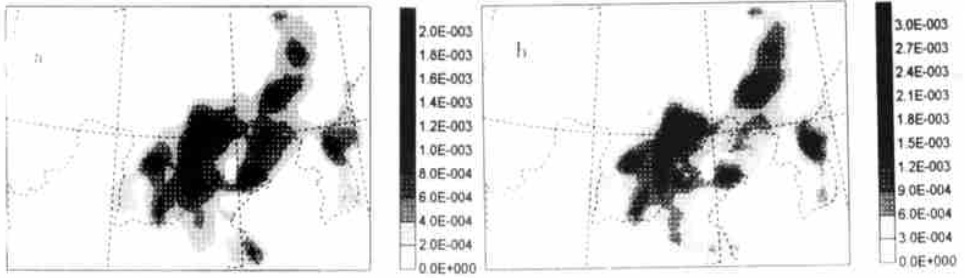


图 7 NO_x 、NMHC 源削减后 24 h 平均(a)和 8 h 平均(b)的 PAN 减小量($\times 10^{-6}$)

4 结 论

(1) 设计了 3 个削减源排放的试验, 考察了这些试验对区域内近地面层 O_3 及 PAN 的影响, 结果说明在 NMHC/ NO_x 比值很大的前提条件下, NO_x 地面源排放的削减对降低大气中 O_3 含量的作用最显著, 而削减 NMHC 对降低大气中 PAN 的含量的作用明显, 同时削减 NMHC 和 NO_x 是降低大气光化学污染强度的有效途径.

(2) 削减地面源排放对大气化学产物的影响有明显的时效性. 地面污染源排放削减后, 白天的影响远大于夜间的影响, 尤其以中午前后太阳辐射强烈时段最为明显.

参 考 文 献

- 1 NCAR/TN-398+ STR. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model. 1994.
- 2 王喜红. 中国地区对流层臭氧变化和分布的数值研究. 气象学报, 1998, 56(3): 333~ 348.
- 3 白乃彬. 中国大陆 CO_2 、 SO_2 和 NO_x $1^\circ \times 1^\circ$ 网格排放估计. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一), 北京: 气象出版社, 1996. 145~ 150.
- 4 Kato N, Akimoto H. Anthropogenic emission of SO_2 and NO_x in Asia, Emission inventories. *Atmos. Environ.*, 1987, 26: 2997~ 3017.

CONTROLLING OF THE PHOTOCHEMICAL SMOG

Ji Fei Su Wenying Qin Yu

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract

Three experiments of emission sources cutting down were carried out to find out the best way for controlling the photochemical pollution by using the coupling model of MM5 and RADM. The results show that when the ratio of NMHC/NO_x is large, the cutting down of surface NO_x source emission is the most efficient way to decrease O₃ in atmosphere while the cutting down of NMHC is the most efficient way to decrease PAN in atmosphere, and cutting down of NMHC and NO_x at the same time is best way to control the atmospheric photochemical pollution.

Key words: Photochemical smog Model Control

第三届全国重大灾害性天气过程总结 和预报技术经验交流会在威海召开

由中国气象局预测减灾司主持召开的第三届全国重大灾害性天气过程总结和预报技术交流会于1999年9月13日至15日在山东省威海市召开,来自各省、市、地(州)气象台和业务处,以及国家气象中心、国家气候中心、国家卫星气象中心、中国气象科学研究院、南京气象学院、北京气象学院的140名代表参加了本届会议。

在大会开幕式上,中国气象局预测减灾司司长肖永生致开幕词,并宣读了李黄副局长的书面重要讲话。

会议共收到论文252篇,会上交流的技术报告共60篇,全面总结了造成1998年汛期长江流域、嫩江、松花江流域特大洪涝的异常气候背景主要由下垫面热力和东亚大气环流异常造成的;对1998年汛期暴雨,尤其是特大暴雨过程从环流背景、影响系统、物理量诊断、中尺度分析及暴雨产生的动力和热力机制等方面进行了分析和探讨。会议还交流了用多普勒雷达、卫星探测的各种信息、雷达与卫星综合用于短时大暴雨预报的思路与方法;交流了以数值预报产品为基础,MICAPS系统为主的人机交互工作站为主要平台,综合利用各种气象信息的预报集成方法,以及新的业务预报流程和业务管理工作方法。

大会还评选了10篇优秀报告奖。