

· 解析评价 ·

doi: 10.3969/j.issn.1674-6732.2012.02.011

基于 Matlab 小波分析的南京北郊大气 O₃ 浓度变化特征研究

苏继峰^{1,2}, 朱彬¹, 高晋徽¹, 肖辉¹, 荆宁³

(1. 南京信息工程大学中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2. 中国人民解放军 94857 部队 61 分队, 安徽 芜湖 241000; 3. 山西省气候中心, 山西 太原 030002)

摘要: 以 2008 年南京北郊大气中 O₃ 质量浓度观测资料和常规观测资料为基础, 利用 Matlab 小波分析工具, 对 O₃ 浓度的年时间序列进行分析, 得出该地区的 O₃ 日均浓度的变化特征: 春、夏季节 O₃ 浓度大于秋、冬季节, 最高浓度出现在春末夏初, 最低浓度出现在冬季; 并且全年共有 5 个突变点; 弱高压的天气系统、较高的温度、较低的湿度和晴朗少云的天气是造成南京北郊 O₃ 浓度突变的主要气象因素。结合 HYSPLIT 气流后向轨迹模拟, 对污染源来源进行追踪, 结果表明: 南京北郊 O₃ 高浓度污染来源主要分为本地局地污染和外来污染物输送两类; 垂直方向上, O₃ 的区域尺度或中尺度的输送主要稳定在混合层的底层。

关键词: O₃ 浓度; 时间序列; 小波分析; 后向轨迹

中图分类号: X823

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2012)-02-0045-05

Observational Study of Ozone Concentrations in Northern Suburb of Nanjing Based on Matlab Wavelet Analysis

SU Ji-feng^{1,2}, ZHU Bin¹, GAO Jin-hui¹, XIAO Hui¹, JING Ning³

(1. Laboratory of Atmospheric Physics and Environment of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. The 61st Squad of 94857 Troops of the Chinese People's Liberation Army, Wuhu, Anhui 241000, China; 3. Shanxi Provincial Climate Centre, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

ABSTRACT: Based on the O₃ and meteorological data observed in northern suburb of Nanjing in 2008, the time series and the variation characteristics of the daily averaged O₃ was analyzed with a Matlab wavelet method. The results indicated that the O₃ concentration in spring and summer were higher than that in autumn and winter. And the daily maximum and minimum values were presented in late spring to early summer and winter respectively. There were five O₃ concentration mutation points during the whole year. The mutational variation of the O₃ concentration was caused by the high-pressure system, high temperature, low humidity and the sunny and cloudless climate. The source of the pollutants was studied with a HYSPLIT pollutant dispersion model. The results showed that the pollution source leaded to the higher level of O₃ concentration was mostly come form the local pollutant and transportation of outer pollutant, and the transportation of the O₃ in regional scale or mesoscale was mainly stabilized at the bottom of mixing layer in the vertical direction.

KEY WORDS: ozone concentrations; time series; wavelet analysis; back-trajectories

0 引言

随着经济的快速发展和城市化水平不断提高, 工业扩张所带来的能源燃烧、工业废气排放以及大量机动车尾气排放的增加, 中国大气污染现象越来越严重。长三角地区是经济发展较快的地区之一, 同时也是大气污染比较严重的地区之一。地表 O₃ 浓度的增加会对人体产生伤害, 同时会导致光化学污染, 使农作物减产^[1]。因此 O₃ 和其他的污染气

体成为当前研究的重点。朱彬等对 O₃ 日变化特征及其前体物关系进行了探讨^[2,3]。李莉等使用 CMAQ 空气质量模型对长江三角洲地区的大气 O₃

收稿日期: 2011-03-23; 修订日期: 2011-04-01

基金项目: 国家“973”项目(2009CB426313); 教育部博士点基金项目(20093228110003)。

作者简介: 苏继峰(1985—), 男, 硕士, 从事大气物理学与大气环境研究。

和 PM₁₀ 区域污染特征进行了模拟分析^[4]。王东东对南京北郊的 SO₂、NO₂ 和 O₃ 进行了观测分析,认为南京江北地区 O₃ 浓度较高,且在春季最高^[5]。张敏研究认为南京北郊 O₃ 浓度受前体物的影响较为明显,O₃ 日变化呈单峰特征,15 时达最大值,静风时 O₃ 浓度最低,降水对 O₃ 的湿清除较不明显^[6]。安俊琳等分析认为 O₃ 日均质量浓度呈现明显的季节变化:春季为 75.2 μg/m³,夏季为 76.1 μg/m³,秋季为 62.5 μg/m³,冬季为 46.3 μg/m³。日照时数和降水量是影响南京大气 O₃ 质量浓度的重要因素^[7]。

笔者利用南京北郊 DOAS 监测的 2008 年 O₃ 监测数据、常规气象观测数据和美国国家海洋大气局(NOAA)再分析资料,使用 Matlab 小波分析工具,对南京北郊 O₃ 质量浓度的变化趋势和突变特征进行分析和讨论。结合天气形势,得出南京出现 O₃ 高浓度污染天气的天气形势,为城市空气质量预报提供一定的理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据介绍

O₃ 监测数据来自安装于南京信息工程大学气象楼顶(32°12'N, 118°42'E, 海拔高度 62 m)瑞典 OPSIS AB 公司生产的 DOAS AQM 系统(AR500)。发射器光源采用高压氙灯,这种类型的氙灯发射出的平稳光谱所覆盖的波长包括紫外波段(200 ~ 400 nm)和可见光波段(400 ~ 700 nm)。在这样的波长范围内包含了很多气体物质(SO₂、NO_x、O₃ 等)的特征吸收光谱,仪器每分钟生成一组数据。在 2008 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日期间对大气 O₃ 质量浓度进行连续观测后,得到 2008 年全年 O₃ 质量浓度观测数据。

HYSPLIT 后向轨迹模式所用气象场数据来自美国 NOAA 的全球资料同化系统(GDAS)资料,该资料的水平分辨率为 1° × 1°,垂直方向从 1 000 ~ 50 hPa 分为 12 个等压面层,时间间隔为 6 h。

1.2 研究方法

1.2.1 时间序列分析原理

时间序列分析是概率统计学科中应用性较强的一个分支,在信号处理、自动化、金融经济、气象水文、数据挖掘等众多领域有着广泛的应用,小波分析是把时间序列分解为低频信息 a1 和高频信息 d1 两部分。在分解中,低频 a1 中失去的信息由高频 d1 捕获。在下一层分解中,又将 a1 分解为低频

a2 和高频 d2 两种,低频 a2 中失去的信息由高频 d2 捕获,以此类推,可以进行更深层的分解^[8]。对污染物浓度时间序列进行小波分解,随着层次的增加,低频部分的高频信息就会被一次次去除,剩下的就是污染物浓度时间序列的年变化规律,即最大的尺度小波变换的低频系数。对小波分解后的最高层低频系数进行重构得到的序列即可判断污染物时间序列的年变化规律。Daubechies 小波具有良好的视频分析功能,因此笔者在小波分析时采用 Daubechies 小波。目前多人研究表明小波分析对 PM₁₀ 时间序列的研究有效可行^[9,10],但是对气体污染物的研究很少,笔者尝试用小波分析的方法对 O₃ 浓度的时间序列进行分析,得出 O₃ 浓度时间序列的年变化规律。

1.2.2 后向轨迹模拟

HYSPLIT 版本 4 是由美国 NOAA 开发的具有处理多种气象输入场,多种物理过程和不同类型排放源的较完整的输送、扩散和沉降的综合模式系统^[11]。这个模式通常用来跟踪气流所携带的粒子或气体移动方向,可以实时预报风场形势,研究轨迹。该模式平流和扩散计算采用 Lagrangian 方法。其平流方程为:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t$$

式中:Δt——可变时间步长,Δt < 0.75 格距/U_{max} (U_{max} 为最大风速),即一个时间步长内气团的移动不超过 0.75 个格距。

坐标采用地形 s 坐标,s 定义为:

$$\sigma = (Z_{top} - Z_{msl}) / (Z_{top} - Z_{gl}) Z$$

式中:Z_{top}——模式顶层高度;Z_{gl}——地面高度;Z_{msl}——要计算的垂直层高度。垂直方向不同层间间隔可以取任意值。模式的水平网格与输入的气象场相同,垂直方向分为 28 层,将气象要素线性内插到各 s 层上^[12]。HYSPLIT 可以通过对气象场的模拟来推断高浓度污染物的来源及其输入路径。

2 结果与讨论

2.1 污染物浓度时间序列分析

2.1.1 数据质量控制

仪器在测量数据时,会由于各种原因导致部分观测数据不准确,因此有必要对所得到的观测数据

进行质量控制。根据维护记录将校准、调光、明显受外界干扰(例如大雾天气等)情况下的数据视为无效数据,剔除上述无效数据,将剩余数据进行日平均,得到 O₃ 质量浓度日变化时间序列。

首先,通过光强与偏差之间的分布关系确定最低允许光强。由于光强与偏差的分布中存在曲线关系,偏差随着光强值的下降而升高,如图 1 所示。分布点下方画一条曲线,曲线自下而上约整个长度的 1/3 处定下一点,该点对应的光强值即为允许的最低光强 L ,偏差记为 D_i 。

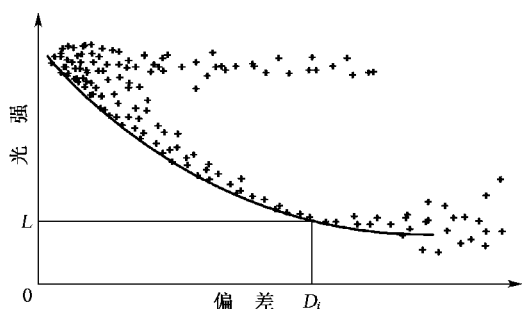


图 1 光强偏差分布关系

其次,在浓度—偏差分布图中(图 2),通过直线拟合来找出一条直线,并将该直线平移至通过 $(D_i, 0)$ 点,以这条直线为界,在直线以下点的数据都将被剔除,同时浓度对应光强小于 L 的数据也将被剔除。

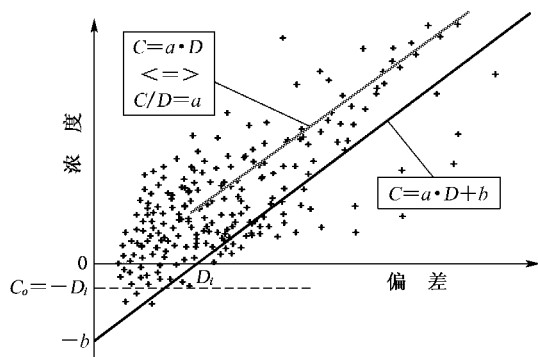


图 2 浓度偏差分布关系

2.1.1.2 O₃ 浓度的年变化规律

采用 db6 小波对 2008 年质量控制后 O₃ 的浓度时间序列进行 4 层小波分解,再利用小波系数重建公式,对第 4 层低频系数进行重构得到的序列即可判断 O₃ 时间序列的年变化规律(图 3)。其中,7 月 1 日至 7 月 11 日由于仪器维修没有观测数据,采用夏季(6—8 月)的平均数值代替。

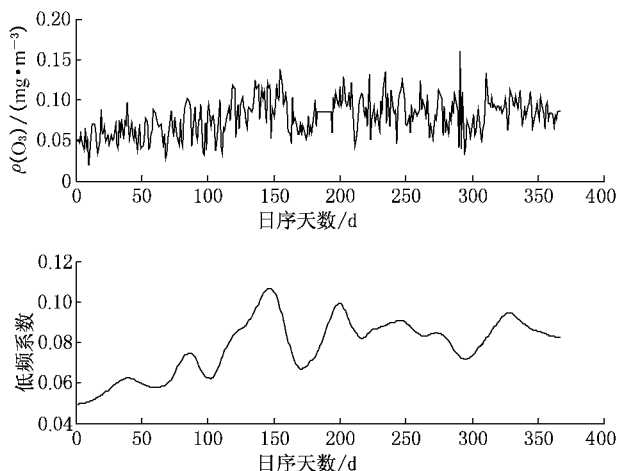


图 3 2008 年南京北郊 O₃ 浓度变化散点和通过小波分解、重构得到的年变化规律

从图 3 可以看出,南京北郊 O₃ 的浓度 1 月最低,并且随时间变化浓度开始上升。在 3 月初达到一个小高值,然后开始下降,4 月上旬跌到谷底,然后急速上升。在 5 月底、6 月初达到全年峰值后开始下降,6 月末出现一个小的谷底,然后开始上升。后半年除了 10 月底的一个谷底外,虽然有小的波动,但是总体较为平稳。

南京北郊的 O₃ 浓度年变化为:春、夏季节 O₃ 浓度大于秋、冬季节 O₃ 的浓度,最高浓度出现在春末夏初,最低浓度出现在冬季。这与王东东和安俊琳 O₃ 的变化特征的结论相同;与张予燕分析的南京 O₃ 浓度每年 5—6 月份和 9—10 月份污染较为严重结论相似^[13];同时与刘明花研究上海地区 O₃ 浓度春夏季最高,秋季过后, O₃ 浓度逐渐回落,到冬季达到最低的结论相同^[14]。因此应用小波分析对 O₃ 浓度时间序列变化规律进行分析是可行的。

2.1.1.3 O₃ 浓度时间序列的突变特性分析

由于 db1 小波具有很好的规律性,因此笔者使用 db1 小波对 2008 年南京北郊 O₃ 浓度时间序列分解 3 次,得到 d1 和 d2 的高频系数的重构系数曲线(图 4)。图 4 清楚地反映了 O₃ 浓度在 2008 年的突变特性,d1 和 d2 高频的重构系数中,系数由很大幅值的位置就是突变点的位置,具体的位置可以通过放大细节图来确定。

从图 2 可知, O₃ 浓度在南京北郊有 5 个比较明显的突变点,分别是第 84, 147, 209, 291 和 311 d, 即 3 月 24 日、5 月 26 日、7 月 27 日、10 月 17 日和

11 月 6 日。3 月 24 日的 O₃ 浓度为 0.101 mg/m³, 5 月 26 日的 O₃ 浓度为 0.118 mg/m³, 7 月 27 日的 O₃ 浓度为 0.122 mg/m³, 10 月 17 日的 O₃ 浓度为 0.171 mg/m³, 11 月 6 日的 O₃ 浓度为 0.134 mg/m³。世界卫生组织 (WHO) 在 2006 年 10 月公布了空气质量新标准, O₃ 的质量浓度为 0.1 mg/m³。按照新标准, 5 个突变点的浓度都超过了 O₃ 的污染标准。

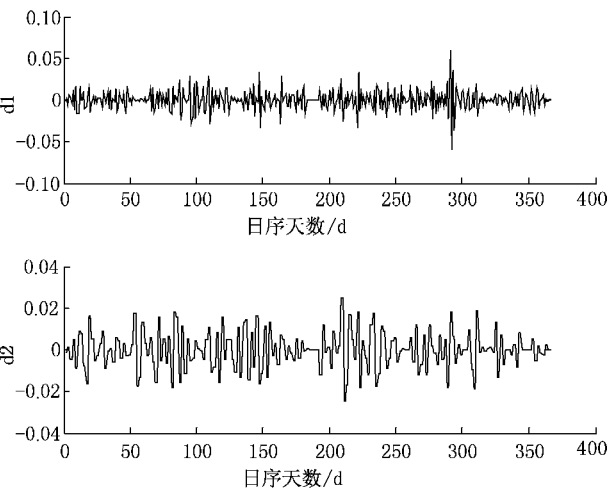


图 4 南京北郊 2008 年 O₃ 浓度突变特性

研究表明, 产生高浓度 O₃ 的气象条件有: 晴空的天气, 较高的温度, 较低的湿度^[6,11,15,16]。总结 5 个突变点天气形势如表 1。

表 1 5 个突变点的气象要素状况

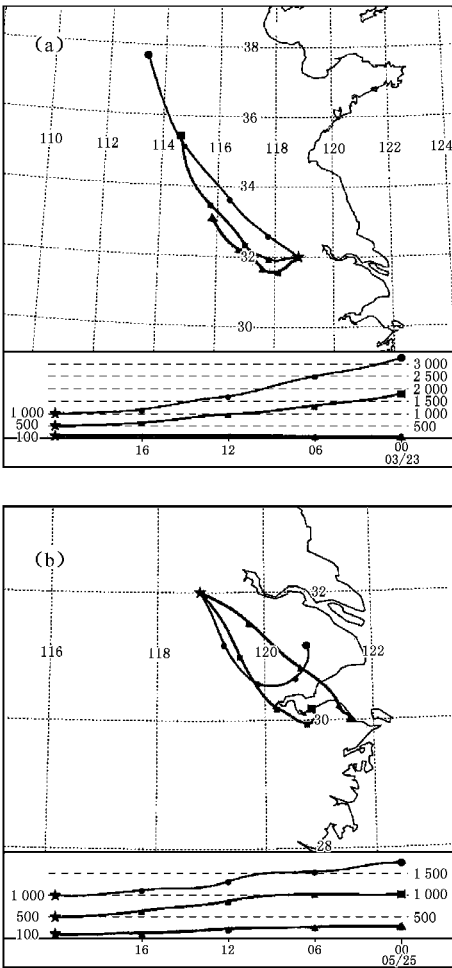
气象要素	3 月 24 日	5 月 26 日	7 月 27 日	10 月 17 日	11 月 6 日
天气状况	无云	少云	少云	阴	小雨
最高气温	21℃	32℃	34℃	26℃	20℃
湿度	30%	50%	45%	48%	88%
天气系统	弱高压	高压外围	弱高压	弱高压	高压底部

从表 1 可以看出, 除了 11 月 6 日是小雨, 10 月 17 日为阴天外, 其他 3 个突变点为晴朗少云的天气; 且 5 个突变点的最高气温都在 20℃ 以上, 除 11 月 6 日外, 其他 4 个突变点的湿度都在 50% 以下; 5 个突变点的天气形势都处于弱高压控制的天气系统下。5 个突变点的气象要素基本上都满足了产生高浓度 O₃ 的条件。此外还可以看出弱高压天气系统的控制范围下容易产生高浓度 O₃。

2.2 后向轨迹模拟结果分析

以南京为轨迹的终点, 设立 3 个终点高度, 分别为 100, 500 和 1 000 m。100 m 代表边界层底层气团的走向, 1 000 m 为模式的最高层。分别模拟 3 月 24 日、5 月 26 日、7 月 27 日、10 月 17 日和 11 月 6 日到达南京的气团来源和过去 24 h 的轨迹路径。

从图 5 的模拟结果可以看出: 造成 7 月 27 日和 11 月 6 日的污染, 主要是南京本地的 O₃ 前体物的排放导致的二次污染生成的高浓度 O₃; 造成 3 月 24 日、5 月 26 日和 10 月 17 日的污染主要源于外地污染物的输送。3 月 24 日的 O₃ 主要来自安徽北部的宿州、蚌埠以及合肥一带; 5 月 26 日的 O₃ 主要来自杭州、嘉兴和苏州一带; 10 月 17 日的 O₃ 主要来自苏州、上海和南通一带。中纬度陆地的混合层典型高度为 1~2 km, 污染物后向轨迹模拟的垂直方向除 3 月 24 日外, 轨迹最高层一直在 1 000 m 左右, 都处于混合层高度范围, 说明污染物的输送一直稳定在大气混合层底层。



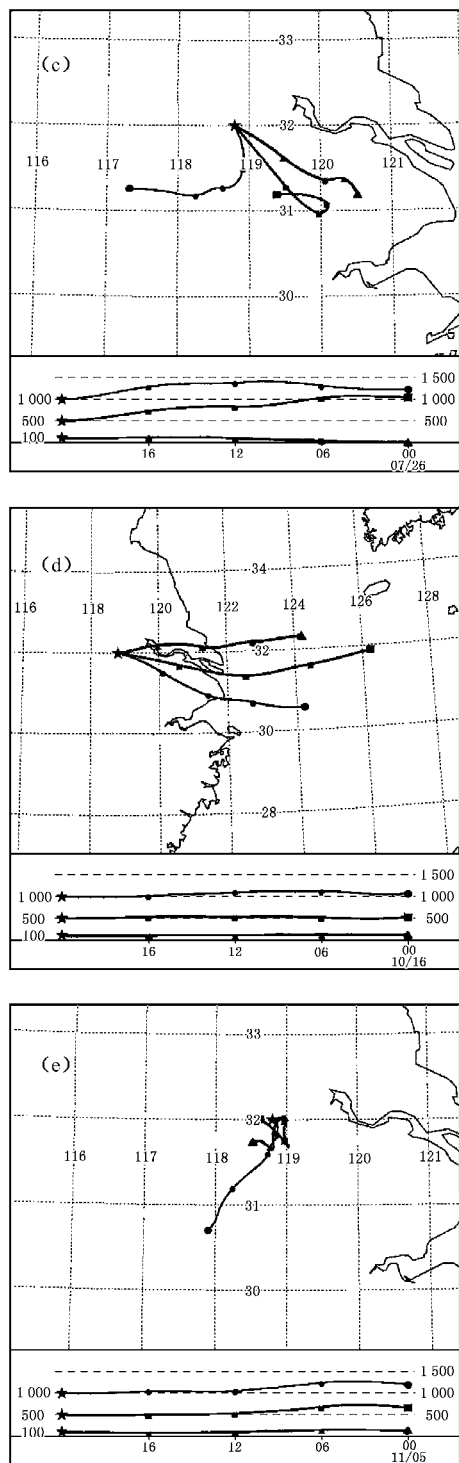


图5 各污染日到达南京后向轨迹模拟
(a)3月24日;(b)5月26日;
(c)7月27日;(d)10月17日;
(e)11月6日

3 结论

笔者根据2008年南京北郊DOAS观测O₃日均质量浓度数据,利用Matlab小波分析工具分析了O₃日均浓度变化特征,同时使用HYSPLIT后向轨迹模式对污染物来源进行模拟分析。具体结论如下:

(1) 南京北郊2008年O₃浓度的年季变化规律为:春、夏季节O₃浓度大于秋、冬季节O₃的浓度,最高浓度出现在夏初,最低浓度出现在冬季;且全年有5个突变点。

(2) 弱高压的天气系统、较高的温度、较低的湿度和晴朗少云的天气是造成南京北郊O₃浓度突变的主要气象因素。

(3) HYSPLIT后向轨迹模拟表明,造成南京北郊O₃高浓度污染的主要原因为本地局地污染和外来污染物输送;垂直方向上,O₃的区域尺度或中尺度的输送主要稳定在混合层的底层。

[参考文献]

- [1] 王春己. 臭氧对农作物的影响研究[J]. 应用气象学报, 1995,6(3):343-349.
- [2] 朱彬,安俊岭,王自发,等. 光化学臭氧日变化特征与其前体物关系的探讨[J]. 南京气象学院学报,2006,29(6):744-749.
- [3] ZHU B, AKIMOTO H, WANG Z, et al. Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan [J]. Geophys Res Lett,2004,31.
- [4] 李莉,陈长虹,黄成,等. 长江三角洲地区大气O₃和PM₁₀的区域污染特征模拟[J]. 环境科学,2008,29(1):237-245.
- [5] 王东东,朱彬,王静. 利用差分吸收光谱系统对O₃,SO₂和NO₂的监测分析[J]. 环境科学研究,2009,22(6):650-655.
- [6] 张敏,朱彬,王东东. 南京北郊冬季大气SO₂,NO₂和O₃的变化特征[J]. 大气科学学报,2009,32(5):695-702.
- [7] 安俊琳,杭一纤,朱彬,等. 南京北郊大气臭氧浓度变化特征[J]. 生态环境学报,2010,19(6):1383-1386.
- [8] 张善文,雷英杰,冯有前. MATLAB在时间序列分析中的应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:204-205.
- [9] 任永建,周锁铨,石顺吉. 2005年南京市PM₁₀浓度时间序列分析[J]. 气象科学,2009,29(3):375-380.
- [10] 孙杰,高庆先,周锁铨. 2002年北京PM₁₀时间序列及其成因分析[J]. 环境科学研究,2007,20(6):83-86.
- [11] DRAXLER R R, HESS G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system [J]. NOAA Technical memorandum ERL ARL,1997,224.
- [12] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition[J]. Aust Met Mag,1998,47(2).
- [13] 张予燕,张群,薛光璞. 南京地区空气NO₂和O₃污染分析[J]. 江苏环境科技,2007,20(增刊2):20-22.
- [14] 刘明花. 上海市地面臭氧浓度分析及多元非线性预报模式研究[D]. 上海:华东师范大学,2009.
- [15] 陆晓波,许建华. 一次典型灰霾天气过程及成因分析[J]. 环境监控与预警,2009,1(1):10-13.
- [16] 洪盛茂,焦荔,何曦,等. 杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响[J]. 应用气象学报,2009,20(5):602-611.

(本栏目编辑 陆敏)