

# 临安地区地面 $\text{SO}_2$ 变化规律及其源地分析\*

颜 鹏 房秀梅 李兴生

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

Roland R. Draxler

(NOAA ARL, 1315 East West HWY, Silver Spring, MD20910, USA)

## 提 要

利用后向轨迹的簇分析方法,研究了1994年9、10月份不同流场条件时,临安地面  $\text{SO}_2$  的变化规律.采用 Lagrangian 传输、扩散、沉降模式计算了中国大陆以及东部较发达的几个区域对临安地面  $\text{SO}_2$  的贡献.与实际观测资料对比表明,模式能够较好地模拟出临安地面  $\text{SO}_2$  的浓度量级和变化趋势.同时,模式结果也表明,作为区域污染背景监测站,临安站观测的  $\text{SO}_2$  浓度大小及变化趋势能反映中国东部发达地区  $\text{SO}_2$  的浓度水平.

关键词:地面  $\text{SO}_2$  后向轨迹 簇分析 扩散模式 源地

## 引 言

随着中国东部沿海地区经济的高速发展,人为活动排放的大量污染物会造成环境的严重恶化.  $\text{SO}_2$  作为人类活动排放的一种重要污染气体,是大气酸化和酸雨的主要来源.研究  $\text{SO}_2$  的源地及其长距离输送、沉降规律,对控制  $\text{SO}_2$  的排放有重要意义.同时,由于测站附近乡村工业的发展,局地污染也会降低测站观测数据的代表性.研究区域观测站点周围不同排放源对测点污染物的贡献,有助于加深了解测站的代表性.本文利用后向轨迹的簇分析方法和 Lagrangian 传输、扩散模式,研究临安地面  $\text{SO}_2$  浓度的变化规律,以及不同的排放源对观测点  $\text{SO}_2$  浓度的影响.

## 1 研究方法

污染物在空间的浓度变化可归因于污染物排放源强和气象条件的变化(本文暂不考虑化学作用),用 Lagrangian 方法研究气象条件对污染物的输送和清除是一种简单而有效的方法.因资料原因本文只计算了1994年9、10月份,  $\text{SO}_2$  浓度资料采用1994年9、10月临安的观测数据<sup>[1]</sup>.

\* 国家自然科学基金重大项目(49392700)资助.

1998-04-28收到,1998-11-16收到修改稿.

### 1.1 簇分析方法

轨迹方法是分析采样点空气污染浓度和污染源、天气形势关系的一种最直接和简单的方法,它是按照轨迹路径最接近的原则把许多条轨迹分组考虑,如本文使用的簇分析方法<sup>[2]</sup>.假设有  $N$  条轨迹,每条轨迹在起始时刻分别定义为空间方差为零,且各自独立的一个簇(定义每个簇的空间方差为簇内每条轨迹与簇平均轨迹对应点的距离平方和),算出所有可能组合的两个簇的空间方差,选择两个簇合并为一个新簇,以使得合并后所有簇的空间方差之和( $TSV$ )比合并前增加最小.这种过程一直进行到所有轨迹合并成为一个簇.研究表明<sup>[2]</sup>,最初几步  $TSV$  迅速增加,然后  $TSV$  增加缓慢,但到分成一定数量的簇后,再进一步合并,则  $TSV$  又迅速增大,说明此时将要合并的两个簇已经很不相似.把  $TSV$  再次迅速增大的点作为分簇过程的结束点.在  $TSV$  迅速增大之前分出的各个簇即为所得到的最终的簇.算出这几个簇的平均轨迹.这些平均轨迹则代表了该采样点在这一时期中的几种主要气流类型.

后向轨迹是用 Draxler 的 HYSPLIT 轨迹模式算出的<sup>[3,4,5]</sup>.用簇方法分别分析了 1994 年 9 月和 10 月各 100 多条轨迹,每条轨迹持续时间 3 天.簇平均  $SO_2$  浓度由下式计算:

$$[SO_2](\text{簇平均}) = \sum [SO_2]_i / n \quad (1)$$

式中,  $i$  表示簇内轨迹序数,  $n$  为该簇包含的轨迹总数,  $[SO_2]_i$  表示第  $i$  条轨迹对应时刻观测的  $SO_2$  小时平均浓度.

### 1.2 扩散模式方法

用 HYSPLIT-4 扩散模式,利用格点排放源资料,考虑污染物的扩散、干湿沉降等物理过程,计算固定点上的污染物浓度.

### 1.3 气象场和排放源

气象场采用美国 NMC 为中期预报模式(MRF)提供的初始场资料.一天有 4 个时次,分别为 00:00、06:00、12:00、18:00 UTC,水平分辨率为 381 km,垂直方向共 13 层,从地面到 50 hPa,要素场包括温、压、湿、高度、地面降水以及水平和垂直风速场等.轨迹模式每天计算 4 个时次,起始点高度取地面向上 500 m.

$SO_2$  排放源强采用白乃彬 1992 年的  $1^\circ \times 1^\circ$  排放源资料<sup>[6]</sup>,范围覆盖中国大陆地区.

## 2 模式简介

本文扩散计算采用的是 HYSPLIT-4 传输、扩散模式<sup>[5]</sup>,它是一种欧拉和拉格朗日型混合的计算模式.其平流和扩散的处理采用拉格朗日方法,而浓度计算则采用欧拉方法.模式采用地形  $\sigma$  坐标,  $\sigma = 1 - z/Z_{\text{top}}$ ,  $z$  为距离地面高度,  $Z_{\text{top}}$  为模式顶高.水平网格与输入的气象场相同,垂直向分为 28 层,气象要素场线性内插到各  $\sigma$  层上.关于模式的详细介绍参见文献<sup>[5]</sup>.

计算轨迹时,气团位置由下式计算:

$$P(t + \Delta t_h) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t_h)]\Delta t_h \quad (2)$$

$$P'(t + \Delta t_h) = P(t) + V(P, t)\Delta t_h \quad (3)$$

$\Delta t_n$  为可变时间步长,根据一个时间步长内气团移动不超过半个气象格距大小决定.

水平和垂直方向烟团的扩散是由湍流场决定的.计算时,假定每个气团具有一定的分布(如 Top-hat 型),这种分布随时间的变化是由风场形变决定的.垂直向扩散根据垂直向湍流速度场得到.污染物浓度场可由落在空间格点内所有空气团对该点的质量贡献累积得到.

### 3 计算结果分析

#### 3.1 簇分析结果

我们计算了 1994 年 9、10 月各簇的平均 SO<sub>2</sub> 体积混合比(表 1),并绘制了 1994 年 9、10 月临安 SO<sub>2</sub> 的平均轨迹(图 1,图 2).

表 1 1994 年 9、10 月各个簇的平均 SO<sub>2</sub> 体积混合比

1994 年 9 月			1994 年 10 月		
簇 号	轨迹数	体积混合比( $\times 10^{-9}$ )	簇 号	轨迹数	体积混合比( $\times 10^{-9}$ )
1	40	9.89	1	11	11.73
2	25	14.16	2	16	14.51
3	23	13.23	3	22	15.72
4	20	14.48	4	12	10.51
5	—	—	5	10	3.31
6	—	—	6	21	13.76
7	—	—	7	4	7.19
8	—	—	8	16	12.65
9	—	—	9	12	19.31

注:簇号相同,来向在不同月份并不相同.

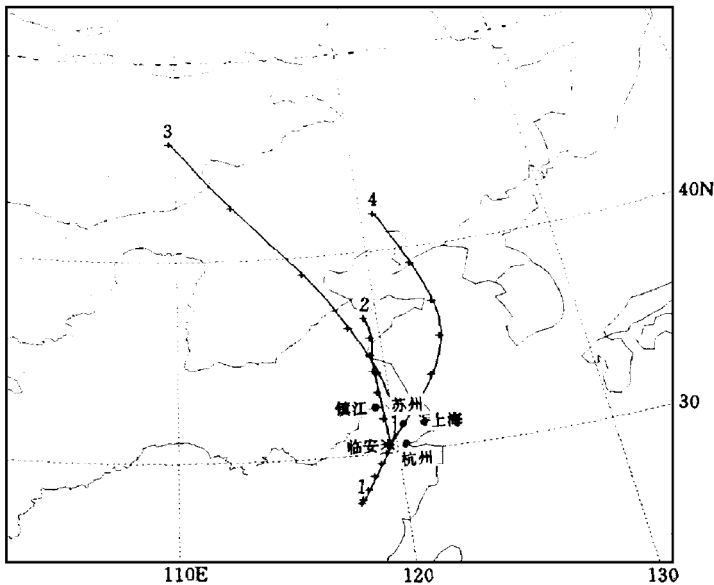


图 1 1994 年 9 月临安 SO<sub>2</sub> 的平均轨迹

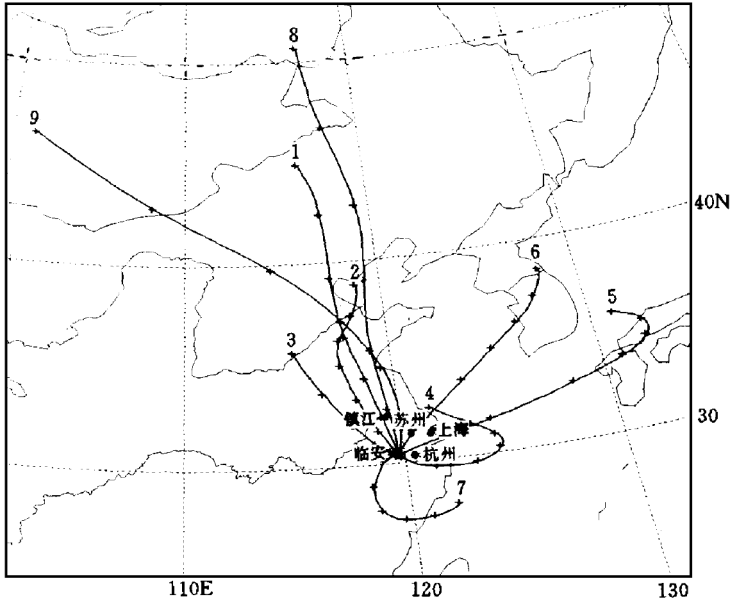


图2 1994年10月临安SO<sub>2</sub>的平均轨迹

从图1可见,在9月临安的全部108条轨迹中,第1簇有40条,主要以SW气流为主,且风速较小.其余轨迹主要为偏北方向.在细节上,第3、4簇气流有弯曲,且风速较大,第2簇来自正北方向,风速较小.从与各簇对应的SO<sub>2</sub>浓度场看,除第1簇SO<sub>2</sub>体积混合比明显较低外(约 $10 \times 10^{-9}$ ),其它3簇SO<sub>2</sub>比较接近,均超过 $13 \times 10^{-9}$ ,其中东北偏北来向的第4簇在所有簇中浓度最高,体积混合比约 $14.5 \times 10^{-9}$ .反映了临安站测得的高浓度地面SO<sub>2</sub>主要受北和东北方向排放源的影响.而来自西南方向的浓度相对较低.这可以从临安的地理位置和周围主要排放源的分布解释.临安位于浙江省西北部,其西部与安徽交界,主要为山区;在临安以北和东北方向约几百公里范围内,都是人口密度大,工业发展较快的地区,主要城市有南京、常州、无锡、苏州、上海、湖州、嘉兴、杭州等.当气流为北—东北来向时,气团经过上述高污染排放区,造成临安较高的SO<sub>2</sub>浓度.而在临安的西南部,没有较大的工业源,当气流为该来向时,由于风速较小,临安观测的地面SO<sub>2</sub>浓度较低.

10月份簇的个数比9月份多(图2),增多了东北偏东方向的第5簇以及气团打转的第4簇.说明10月份天气形势比9月份变化复杂,但从对应的SO<sub>2</sub>浓度分布看,两个月仍比较相似.临安的SO<sub>2</sub>浓度仍然是偏北和东北来向时较高(如第2、3、6、9簇),且浓度大小与9月份相当,SO<sub>2</sub>体积混合比均为 $14 \times 10^{-9}$ 以上,其中第9簇浓度最大,体积混合比为 $19.3 \times 10^{-9}$ (原因可能与降水清除有关,10月份该簇轨迹对应的日期全无降水,而与9月份第3簇相比,二者来向虽相似,9月份第3簇轨迹对应时间内却有许多降水,湿清除使得9月份第3簇浓度比10月份第9簇低).轨迹为偏南来向时SO<sub>2</sub>浓度较低(第7簇),体积混合比约 $7.2 \times 10^{-9}$ ;与9月份不同的是,当有偏东海洋来向的气流时(第5簇),临安

的 SO<sub>2</sub> 浓度最低, 体积混合比仅  $3.3 \times 10^{-9}$ . 这一方面因为来自海洋的空气较清洁, 另外因偏东气流往往与降水天气关系密切(第 5 簇对应的时间均为降水日), 湿清除作用也使观测的 SO<sub>2</sub> 浓度降低. 第 4 簇的轨迹来向虽然介于第 5 簇与第 7 簇之间, 但从轨迹走向看, 该簇气团仍来自临安东北部的高污染区, 故浓度较第 5 簇与第 7 簇高.

### 3.2 扩散模式计算结果

簇分析方法虽然能够定性地了解不同来向气流时污染物输送的特点, 但由于轨迹方法只表示水平方向的输送, 垂直向的湍流扩散会在很大程度上改变上述特点. 如晴天自由对流旺盛时期, 虽然上游带来大量污染物, 但由于垂直向的扩散稀释, 地面监测到的浓度并不太高. 同时, 降水清除作用也会改变簇浓度. 用上述轨迹的簇分析方法显然不能够对此给予满意的解释. 作为对轨迹模式的补充, 采用 Lagrangian 型的污染扩散模式对观测的 SO<sub>2</sub> 浓度变化做了进一步的分析. 模式考虑了 SO<sub>2</sub> 的干、湿清除作用.

质量方程:

$$dM/dt = -(\beta_{dry} + \beta_{wet} + \beta_{chem})M \quad (4)$$

式中,  $M$  为气团内污染物质量,  $\beta_{dry}$ 、 $\beta_{wet}$  分别为干、湿沉降系数,  $\beta_{chem}$  为化学转化时间常数. 本文取 SO<sub>2</sub> 的化学转化率为每小时 1%.

当气团位于模式最底层时, 考虑 SO<sub>2</sub> 的干沉降. 干沉降速率由计算得到, 它与太阳辐射强度、地表状况和近地层湍流性质有关<sup>[7]</sup>.

$$V_d = [R_a + R_b + R_c]^{-1} \quad (5)$$

式中,  $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  分别代表大气、粘滞次层和地面的阻尼系数.

$$\beta_{dry} = V_d Z_p^{-1} \quad (6)$$

式中,  $Z_p$  为模式最底层的厚度.

湿清除速率:

$$V_{gas} = H R T P \quad (7)$$

$R$  为普适气体常数,  $T$  为温度,  $H$  为有效亨利常数(根据临安和杭州等地降水 pH 值大小, 本文取平均有效亨利常数  $H = 6.0 \times 10^2$  mol/L),  $P$  为降水量.

因此湿清除系数为:

$$\beta_{wet} = V_{gas} \Delta Z^{-1} \quad (8)$$

模式计算的临安地面 SO<sub>2</sub> 浓度与观测浓度对比可从图 3 看出. 其中每个月开始的 5 天为模式初始调整时期. 从结果看, 计算的浓度与观测浓度及其变化趋势和量级较接近, 模式计算的浓度变化基本反映了实际观测的变化趋势, 对 9、10 月份临安出现的高地面 SO<sub>2</sub> 浓度的时段都能够较好地模拟出来, 但比实测值偏低. 从两个月平均的 SO<sub>2</sub> 看(表 2), 临安两个月实测的平均 SO<sub>2</sub> 体积混合比是  $12.7 \times 10^{-9}$ , 而模式计算的地面 SO<sub>2</sub> 体积混合比为  $10.0 \times 10^{-9}$ , 约比实测值小 21%. 这一方面由于模式没有考虑局地源以及大陆以外排放源的影响, 另一方面由于模式使用的排放源是由 1992 年统计资料算出的, 经过 2 年多的发展, 该地区的排放增加了.

由于湿清除作用与降水云的大小及降水 pH 值有关, 对湿清除的处理存在较大的不确定性. 在本模式计算中采用的有效亨利常数为  $6.0 \times 10^2$  mol/L, 是根据临安、杭州两地 9、10 月份的平均 pH 值约为 4.3 算出的, 而实际上, 在 9、10 月份临安、杭州两地的降水

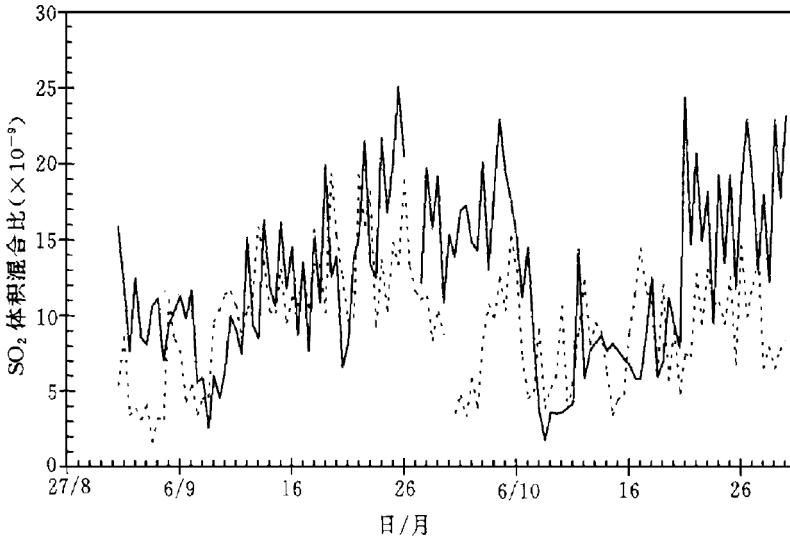


图3 模式计算与实际观测的地面  $\text{SO}_2$  体积混合比  
(实线:观测值,点线:计算值)

pH 值变化还是很大的,同时临安站地面  $\text{SO}_2$  浓度还受上游大范围污染源的影响,因此有效亨利常数取  $6.0 \times 10^2 \text{ mol/L}$  也不尽合理.

表2 1994年9、10月份临安站的  $\text{SO}_2$  总平均体积混合比

	临安站的 观测值	计算值(所有 源对临安站的 贡献)	浙江省源对临 安站的贡献	江苏省源对临 安站的贡献	安徽省源对临 安站的贡献	$>0.1 \times 10^6 \text{ t/a}$ 格点对临安站的 贡献
体积混合比 ( $\times 10^{-9}$ )	12.7	10.03	5.88	2.35	0.74	3.12
与所有源贡献 的比值		100%	58.6%	23.4%	7.4%	31.1%

注:江、浙地区  $1^\circ \times 1^\circ$  排放源强超过  $0.1 \times 10^6 \text{ t/a}$  的区域分别为苏州、无锡、常州、上海、镇江、杭州等,约4个网格大小.

为研究测点周围几个大的排放源区对临安的影响,分别计算了浙江、江苏和安徽三省排放源对测点的贡献.结果见图4、图5.从图可见,对临安地面  $\text{SO}_2$  贡献较大的地区主要是浙江和江苏(包括上海),安徽只占很少的比例.这与上面簇分析的结果一致.因9、10月份临安气流主要来自北和东北方向,江苏和浙江东北部的排放对测点的影响较大;而来自偏西方向安徽省的贡献,因受测点西部山区地形阻挡作用影响较小.由表2可见,三省累积对临安站贡献的  $\text{SO}_2$  体积混合比约为  $8.9 \times 10^{-9}$ ,约占中国大陆所有排放源贡献的89.4%,其中江苏占23.4%,浙江58.6%,安徽约7.4%.

图6为江、浙地区  $1^\circ \times 1^\circ$  排放源强超过  $0.1 \times 10^6 \text{ t/a}$  的区域对临安地面  $\text{SO}_2$  的贡献.这些排放源强超过  $0.1 \times 10^6 \text{ t/a}$  的地区分别为苏州、无锡、常州、上海、镇江、杭州等,约4个网格大小.由图6可见,上述地区对临安站的地面  $\text{SO}_2$  贡献还是相当大的,9、10月份总平均贡献达到整个江、浙地区排放源对测点贡献的1/3左右(表2).尤其在9月下旬和10

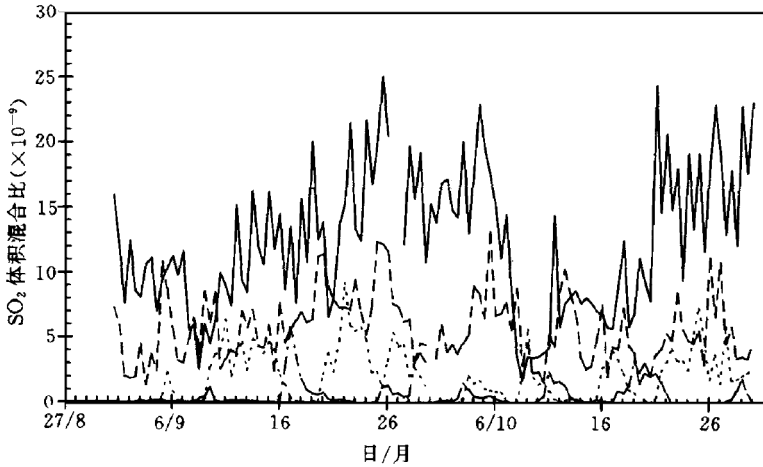


图 4 江苏、浙江、安徽三省排放对临安地面 SO<sub>2</sub> 的贡献  
(实线:观测值,断线:浙江,点线:江苏,点断线:安徽)

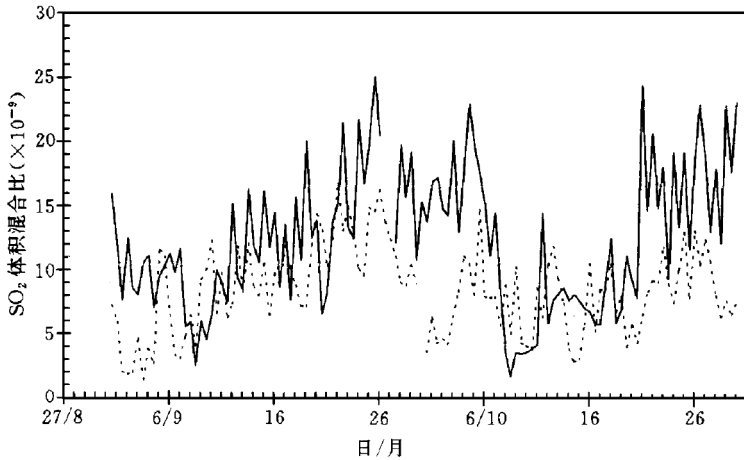


图 5 浙江、江苏、安徽三省排放的累积贡献  
(实线:观测值,点线:三省累积贡献)

月下旬,临安地面出现的高 SO<sub>2</sub> 浓度,是与气流经过上述地区,带来较高 SO<sub>2</sub> 的贡献分不开的。

通过以上分析可见,虽然模式使用的是大尺度气象场及排放源资料,模拟的 SO<sub>2</sub> 浓度变化趋势体现的是大尺度的变化特征,但在临安仍取得了较好的一致.表明临安的 SO<sub>2</sub> 浓度除当地排放源的贡献外,其上游地区大范围的排放源对临安地面 SO<sub>2</sub> 的变化影响很大,这也从一个侧面说明,临安监测的地面 SO<sub>2</sub> 水平及其变化趋势在一定程度上反映了中国东部地区 SO<sub>2</sub> 的污染水平。

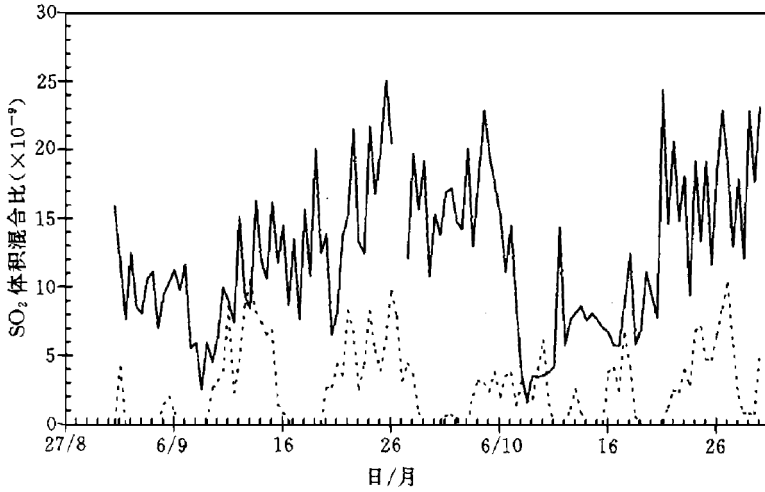


图6 江、浙两省排放源强大于  $0.1 \times 10^6$  t/a 的地区对测点  $\text{SO}_2$  的贡献(实线:观测值,点线: $>0.1 \times 10^6$  t/a)

## 4 结 论

(1) 轨迹方法能够定性分析特定观测点的污染物来向和源地,对观测的浓度变化能够给出较合理的解释.但由于气象资料分辨率的限制,以及在簇分析中对降水清除的考虑不够,不能反映不同轨迹间的更细的差别.同时由于轨迹方法只是单纯的分析气流的平均作用,它不能分辨出由湍流扩散、干湿沉降等引起的差异.而扩散模式方法作为轨迹方法的补充,能够更全面地考虑较复杂的物理过程,定量分析不同排放源对观测点浓度贡献的大小.

(2) 对扩散模式计算的  $\text{SO}_2$  浓度变化可见,该期间临安的  $\text{SO}_2$  浓度受上游方向大尺度污染排放源的影响较大.高浓度地面  $\text{SO}_2$  主要受其北和东北方向的工业城市排放影响.对不同排放源在临安造成的地面  $\text{SO}_2$  浓度的分析表明,临安的  $\text{SO}_2$  大部分由浙江、江苏的排放所致.

(3) 临安站监测的  $\text{SO}_2$  浓度变化基本体现了江、浙地区污染排放的大尺度传输、扩散的特点,这从另一方面说明,临安作为区域污染背景监测站,其资料仍具有一定的代表性.

## 参 考 文 献

- 1 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 我国地面  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  背景值的观测研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 53~61.
- 2 Stunder B J B. An assessment of quality of forecast trajectories. *J. Appl. Meteor.* 1996, 35: 1313~1331.
- 3 Draxler R R. Trajectory optimization for balloon flight tracking. *Wea. Forecasting.* 1996, 11: 111~114.
- 4 Draxler R R. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HY-SPLIT); Version 3.0-User's Guide and Model Description, NOAA Technical Memo ERL ARL-195. 1992.
- 5 Draxler R R. Description of the HYSPLIT-4 modeling system. NOAA Technical Memo. ERL ARL-224. 1997.



- 6 白乃彬. 中国大陆 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 1°×1°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.
- 7 Wesely M L. Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regionalscale numerical models. *Atmos. Environ.*, 1989, **23**:1293~1304.

## ANALYSIS OF THE SOURCE REGION AND VARIATION OF SURFACE SO<sub>2</sub> AT LIN'AN STATION

Yan Peng Fang Xiumei Li Xingsheng

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

R. R. Draxler

(*NOAA ARL, 1315 East West HWY, Silver Spring, MD20910, USA*)

### Abstract

Backward trajectory cluster analysis is used to determine the source regions and variation of surface SO<sub>2</sub> at Lin'an regional background station under different weather conditions in Sep. and Oct. 1994. Furthermore, by using Lagrangian transport, dispersion and deposition model, the contributions from different areas to surface SO<sub>2</sub> concentrations at Lin'an station are calculated. In comparison with the observations, it is shown that the model could be well to simulate the variations of surface SO<sub>2</sub> at Lin'an. Meanwhile, it is also shown that the concentrations and variations of surface SO<sub>2</sub> observed at Lin'an station could reflect those of eastern China.

**Key words:** Backward trajectory Cluster analysis Dispersion model Source region