

程真, 陈长虹, 黄成, 等. 2011. 长三角区域城市间一次污染跨界影响 [J]. 环境科学学报, 31(4): 686-694

Cheng Z, Chen C H, Huang C, et al. 2011. Trans-boundary primary air pollution between cities in the Yangtze River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(4): 686-694

## 长三角区域城市间一次污染跨界影响

程真, 陈长虹\*, 黄成, 黄海英, 李莉, 王红丽

上海市环境科学研究院, 上海 200233

收稿日期: 2010-07-14 修回日期: 2010-09-08 录用日期: 2010-09-14

**摘要:** 长三角城市群作为我国三大经济圈之一, 高强度的能源消耗致使区域大气污染问题十分突出. 为了定量弄清城市之间一次污染传输情况, 以长三角 15 个城市的污染排放清单、MM5 气象场为基础, 利用 CALPUFF 空气质量模型, 模拟测算了长三角区域内城市间一次污染跨界输送影响. 结果显示, 环太湖地区的上海、苏州、无锡和常州等地由于自身排放强度大而成为长三角一次污染最严重的地区, 在以西北风为主的 1 月, 浙北的嘉兴、湖州、杭州和绍兴等城市易受该地区污染南下传输影响; 而在以偏南风为主的 7 月, 该地区的污染物又会北上影响苏中的扬州、泰州和南通等城市. 各城市一次污染来源分担结果显示, 上海、南京、杭州等城市  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  的本地贡献率分别在 61%、80% 和 76% 以上; 在 1 月, 受外来影响较大的城市有舟山、镇江、嘉兴和绍兴, 外来影响的总比例  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  分别在 56%、40% 和 44% 以上; 在 7 月, 舟山、南通、扬州、泰州和湖州受外来一次污染较大,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  外来影响的总比例分别为 66%、46% 和 53% 以上. 综合上述结果, 目前长三角城市间一次污染跨界传输已十分显著, 这也为区域二次污染的形成与加重提供了条件, 区域尺度的大气污染协同控制显得十分必要和紧迫.

**关键词:** 长江三角洲; 大气污染跨界输送; 城市间相互影响; CALPUFF 模型

文章编号: 0253-2468(2011)04-686-09 中图分类号: X511 文献标识码: A

## Trans-boundary primary air pollution between cities in the Yangtze River Delta

CHENG Zhen, CHEN Changhong\*, HUANG Cheng, HUANG Haiying, LI Li, WANG Hongli

Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233

Received 14 July 2010; received in revised form 8 September 2010; accepted 14 September 2010

**Abstract:** As one of the three largest economic hubs in China, the Yangtze River Delta (YRD) experiences serious air pollution due to the huge energy consumption and large emissions. In order to quantify the primary air pollution transport among cities in the YRD region, the Calpuff model, together with the regional emissions inventory of 15 cities and MM5 meteorological simulation, were applied to calculate the primary air pollution transport among cities in the YRD. Shanghai, Suzhou, Wuxi and Changzhou, which are all located along Taihu Lake, comprise the most severely polluted area in the region due to local emissions. In January, with the prevailing wind direction from the northwest, the cities of Jiaxing, Huzhou, Hangzhou and Shaoxing in northern Zhejiang province will be influenced by emissions from the northern cities. On the other hand, in July, with the prevailing wind direction from the south, the cities of Yangzhou, Taizhou and Nantong in central Jiangsu province will be affected by emissions from the southern cities. The results also show that local emissions are a major contributor to the primary pollution of a city, with  $\text{SO}_2$  61%,  $\text{NO}_x$  80% and  $\text{PM}_{10}$  76% in cities like Shanghai, Nanjing and Hangzhou. In January, cities with heavy influence of outside emissions include Zhoushan, Zhenjiang, Jiaxing and Shaoxing, with the total transport contribution rate of  $\text{SO}_2 > 56\%$ ,  $\text{NO}_x > 40\%$  and  $\text{PM}_{10} > 44\%$ . In July, cities like Zhoushan, Nantong, Yangzhou, Taizhou and Huzhou will be greatly influenced by outside emissions, with the total external contribution rate of  $\text{SO}_2 > 66\%$ ,  $\text{NO}_x > 46\%$  and  $\text{PM}_{10} > 53\%$ . In summary, the transboundary primary air pollution in the YRD is quite significant, which provides conditions for the formation and aggravation of the secondary air pollution. Synergistic control of air pollution at the regional scale is urgently needed.

**Keywords:** Yangtze River Delta; transboundary air pollution; interaction between cities; Calpuff model

### 1 引言 (Introduction)

长江三角洲(简称“长三角”)是我国目前经济

发展速度最快、经济总量规模最大、最具有发展潜力的经济圈,对中国的经济影响举足轻重.同时,也是我国人口密集、能源消耗和污染排放强度高、区

基金项目: 国家科技支撑计划项目(No. 2009BAK43B33); 国家高技术研究发展计划(863)项目(No. 2007AA06Z409)

Supported by the Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program in the “Eleventh Five-year” Plan Period(No. 2009BAK43B33) and the National High-Tech Research and Development Program of China(No. 2007AA06Z409)

作者简介: 程真(1983—), 男, 工程师, E-mail: stephen.cheng@163.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: chench@saes.sh.cn

Biography: CHENG Zhen (1983—), male, engineer, E-mail: stephen.cheng@163.com; \* Corresponding author, E-mail: chench@saes.sh.cn

域性复合型大气污染较为突出的地区之一(Li *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2001). 由于城市紧邻,地势平坦,以及气象条件的影响,长三角区域跨城市大气污染传输较为明显,各城市之间大气污染相互输送显著,但对长三角各城市之间的污染传输影响大小的测算研究从文献报道来说并不多见.

在国外,针对长距离传输引起的跨界污染开展了不少研究.如 Kaldellis 等计算了欧盟各国家输出到其它国家以及由其它国家输入的  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  的量(Kaldellis *et al.*, 2007), Moussiopoulos 等利用 TRAPPA 模型研究了欧洲东南部  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  的跨界污染问题(Moussiopoulos *et al.*, 2004), Chulkyu Lee 等利用模型和监测数据研究了亚洲国家尤其中国对韩国空气中  $\text{SO}_2$  的传输影响(Lee *et al.*, 2008), Weinroth 等利用 RAMS 和 CAMx 模型研究了中东地区的臭氧跨界传输情况(Weinroth *et al.*, 2008).

我国类似长三角的城市聚集群还有京津冀和珠江三角洲地区,不少学者对这两大区域内的大气污染跨界输送开展了研究,如 David G. Streets 等用 MODEL-3/CMAQ 模拟了 2008 年北京奥运会期间周围省市对北京的大气污染浓度贡献(Streets *et al.*, 2007),模拟结果显示在稳定的南风作用下,河北省污染排放对北京市的大气中  $\text{PM}_{2.5}$  和臭氧的浓度贡献分别达到 50%~70% 和 20%~30%;程水源等利用 MM5 + CMAQ 模拟研究了 2002 年周边省份对北京的  $\text{PM}_{10}$  的浓度贡献(Chen *et al.*, 2007),结果显示北京的空气质量改善也需要周边省份的污染控制;张志刚等利用二维欧拉统计模式模拟了北京、天津、河北省城市之间的污染传输(张志刚等,2004),结果表明北京大气环境中 20% 的  $\text{PM}_{10}$  和 23% 左右的  $\text{SO}_2$  来自北京周边地区;王淑兰等利用 CALPUFF 模型模拟了珠江三角洲城市群的大气污染传输(王淑兰等,2005),研究结果表明珠三角城市间污染相互作用显著,其中广州是最典型的与周边发生显著相互作用的城市之一.

本研究利用长三角地区的大气污染排放清单和美国中尺度模型 MM5 模拟的气象场资料,借助美国 CALPUFF 空气质量模型,定量测算了长三角区域城市间  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$  3 种一次污染物的相互输送影响,既为长三角区域污染的协同控制提供决策支持([http://www.gov.cn/zw/gk/2010-05/13/content\\_1605605.htm](http://www.gov.cn/zw/gk/2010-05/13/content_1605605.htm)),也为更加深入了解二次污染物如

臭氧和细颗粒的跨界形成与输送过程奠定基础.

## 2 数据与方法 (Data and method)

### 2.1 研究区域

研究区域包括江浙沪两省一市的上海、南京、苏州、无锡、常州、扬州、南通、镇江、泰州、杭州、宁波、嘉兴、绍兴、湖州、舟山共 15 个城市,模拟区域的网格精度为  $4\text{km} \times 4\text{km}$ ,中心位置地理坐标为  $120^\circ\text{E}$ ,  $31^\circ\text{N}$ ,东西长 544km,南北宽 472km,总面积约 26 万  $\text{km}^2$ .

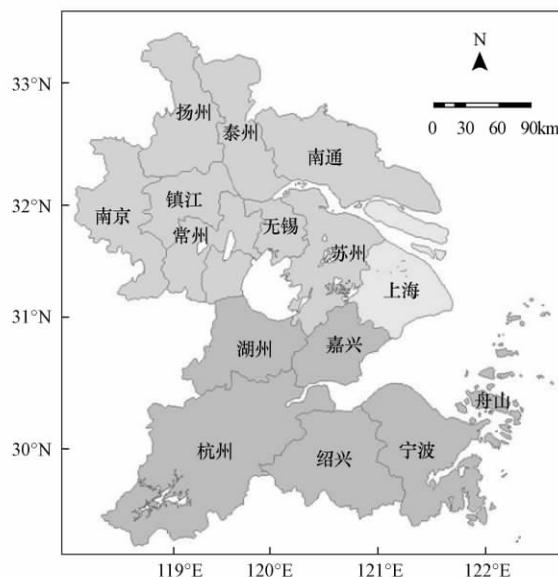


图 1 模拟计算网格区域

Fig. 1 The grid domain for simulation

### 2.2 排放清单

大气污染排放清单的基准年为 2004 年,根据长三角地区大气污染源环境统计资料,采用自下而上的方法,将研究区域内的污染源划分为火电厂、工业源、机动车流动源和生活源,同时调查各类污染源的排放系数及活动水平调研,开展各污染因子的排放量计算,结合污染源活动水平,完成了污染物排放的时空分解,并进行网格化处理,最终建立长三角大气污染排放清单(陈长虹等,2007).表 1 为长三角各城市  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$  的年排放量,从城市看,上海 3 项污染物的年排放量都最大,苏州、宁波其次;从图 2 所示的空间分布看,各城市 3 种污染物的排放都和能源消耗密切相关,主要集中于各城市市区中心及重点工业密集区域.

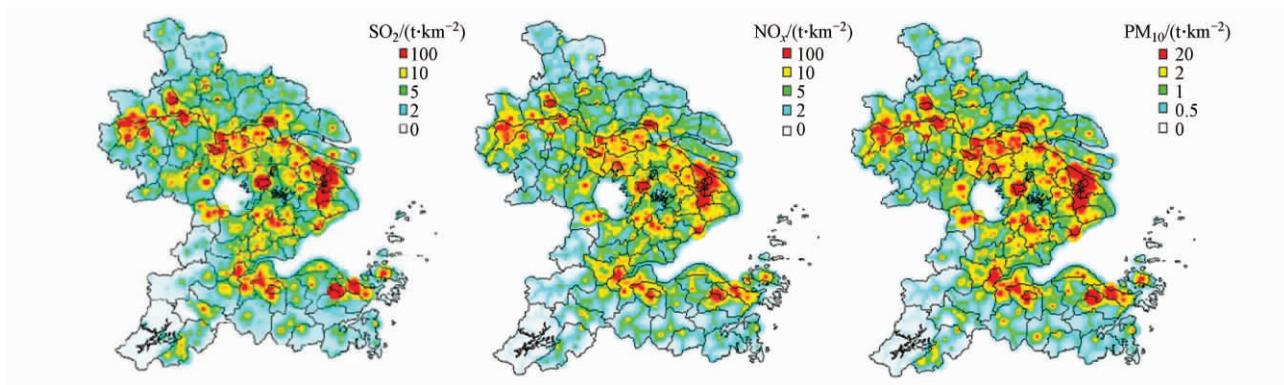


图 2 长三角污染物排放强度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of emission intensity in the Yangtze River Delta

表 1 15 城市主要大气污染物排放量

Table 1 Emission amount of primary pollutants in 15 cities

编号	城市	SO <sub>2</sub> / (kt·a <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> / (kt·a <sup>-1</sup> )	PM <sub>10</sub> / (kt·a <sup>-1</sup> )
1	上海	487.08	497.42	189.08
2	苏州	240.20	236.55	136.27
3	宁波	217.77	176.57	97.02
4	南京	147.66	150.88	119.71
5	无锡	134.48	147.78	99.39
6	杭州	133.01	111.58	157.37
7	镇江	106.49	99.36	52.30
8	南通	102.29	98.42	66.20
9	常州	82.69	62.56	64.92
10	嘉兴	82.43	60.20	80.91
11	绍兴	81.29	72.19	69.39
12	扬州	78.87	73.92	28.81
13	湖州	72.23	45.42	111.45
14	泰州	33.52	31.99	49.52
15	舟山	23.98	13.96	7.25
	总计	2023.98	1878.79	1329.59

2.3 气象资料

气象资料来自美国 NCAR/Penn State 的第五代有限区域中尺度模式 (MM5) 的模拟结果 (陈长虹等, 2007)。该模式基于美国 NCEP 的 1° × 1° 再分析资料, 采用非静力平衡动力框架, 三重嵌套, 预报区域中心为 (34° N, 110° E), 水平分辨率分别为 36km、12km 和 4km。最内层网格的水平格距 4km, 南北向取 124 个格点, 东西向取 142 个格点, 以长三角城市为主的区域; 垂直方向为 σ 坐标, 取 14 层。时间积分步长取 108s, 高度从 29m 直至 15000m。主要物理过程为: Dudhia 简单冰显式降水预报和 GRELL 积云对流参数化方案, MRF 行星边界层方案, Dudhia 云辐射方案, 采用张弛流入流出侧边界。侧边界条件采用美国 NCEP 的 1° × 1° 再分析资料。

本研究选用 MM5 模拟的最内层网格 2004 年 1 月和 7 月的逐时气象场作为污染传输动力场。图 3

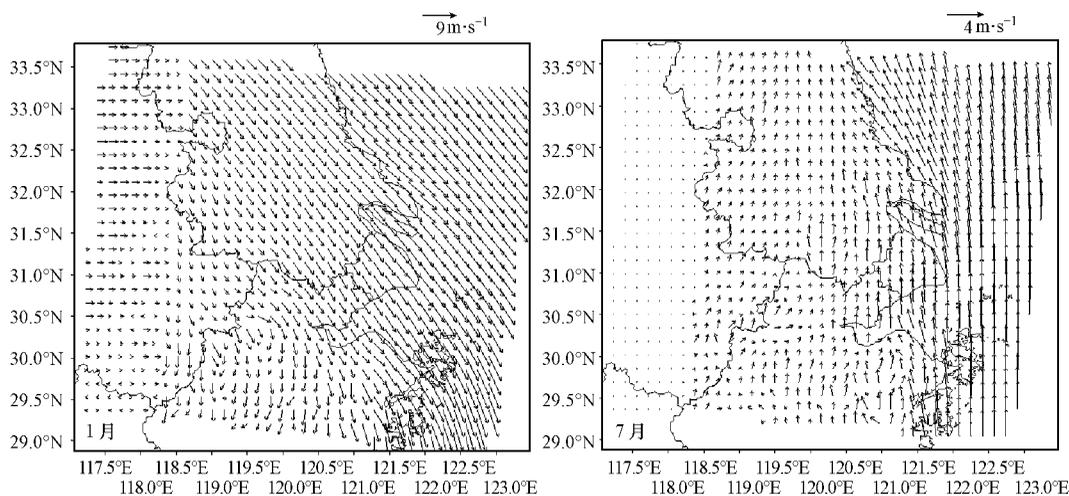


图 3 长三角地区 300m 高空的月均风场图

Fig. 3 Monthly mean wind field at height above 300 m in the Yangtze River Delta

为长三角地区近地面 300m 高 1 月和 7 月的平均风场图。由图可见, 1 月的流场空间型主要为西北气流, 贯穿整个江苏省, 一方面向东南方向输送到上海, 另一方面沿着浙江地区山脉的外围继续向东南方向输送, 经过杭州、宁波等地; 7 月份流场空间型特征主要为偏南气流, 浙北地区气流将由南向北贯穿上海、苏南地区, 而上海、苏南地区则可能输送到苏北地区。

#### 2.4 模型及参数设置

CALPUFF 模拟系统是美国 EPA 推荐的用于模拟污染物传输行为的集成模式 (Scire *et al.*, 2001a), 也是中国大气环境影响评价的法规模式之一, 模型采用为非定常三维拉格朗日烟团输送模式, 结合时变气象场资料, 考虑了垫面对污染物干湿沉降的影响, 同时考虑了复杂地形的动力学效应以及静风等非定常条件, 能够很好的模拟几十到几百 km 区域的污染物扩散情景。

CALPUFF 的基本方程:

$$C = \frac{Q}{2\pi\delta_x\delta_y} g \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\delta_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\delta_y^2}\right] \quad (1)$$

式中:  $C$  为地面污染物浓度 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $Q$  为烟团的污染物质量 ( $\text{g}$ );  $\delta_x$  为水平风向污染分布的标准差 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\delta_y$  为垂直风向污染分布的标准差 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $d_a$  为烟团中心到受体点在  $X$  方向上的距离 ( $\text{m}$ );  $d_c$  为烟团中心到受体点在  $Y$  方向上的距离 ( $\text{m}$ );  $g$  为高斯方程的垂直项 ( $\text{m}$ )。

CALPUFF 模拟系统, 包括诊断风场模型 CALMET、高斯烟团扩散模型 CALPUFF 和后处理软件 CALPOST 3 部分。

本研究使用的 CALMET 版本为 Version 6.112 (Scire *et al.*, 2001b), 模拟区域采用兰伯特投影, 中央经纬度为  $34^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{E}$ , 第一标准纬度为  $40^\circ\text{N}$ , 第二标准纬度为  $25^\circ\text{N}$ , 北偏 480km, 东偏 -690km。区域内地形高度和土地利用类型资料来自 USGS 的亚洲数据库, 精度约为 1km, 地面气象数据、高空探测资料和降水资料都来自 MM5 模型通过 CALMM5 程序转换的输出结果, 垂直高度共包含 10 层, 分别为 20、40、80、160、320、640、1000、1500、2200 和 3000m (Hao *et al.*, 2007), 这样通过 CALMET 就得到了 CALPUFF 运行所需的 1 月和 7 月的三维逐时气象场。

CALPUFF 版本为 Version 6.211, 模拟污染物为  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$ , 污染源输入时火电厂作为点源处

理, 包含地理坐标、烟囱高度和直径, 烟气出气速率和温度等信息, 工业源、生活面源和机动车都分配到  $4\text{km}\times 4\text{km}$  的网格中作为面源处理, 包括地理位置、基础几何高度等, 这几类面源的基础几何高度分别统一为 24m、12m 和 2m, 并对各类污染源建立污染排放速率季节变化和日变化的时间廓线。

为了得到各城市的污染来源, 利用 GIS 技术将区域排放清单按各城市行政范围分开, 分别模拟其在 1 月和 7 月的污染浓度分布, 提取某城市所辖网格的月均浓度平均作为该城市的受影响浓度, 本文共进行了 15 个城市  $\times$  2 个月共 30 次模拟。必须指出的是, 本研究假定污染物在传输过程中为惰性气体, 未考虑化学反应的影响, 因此计算结果也只能代表一次污染惰性传输的情况。

$$\text{City\_EI}_i + \text{Met\_Month}_j \xrightarrow{\text{CALPUFF}} \text{Conc}_{i,j,k} \quad (2)$$

式中:  $i$ : 1 ~ 15, 排放城市编号;  $j$ : 1、7, 分别代表 1、7 月;  $k$ : 受体城市编号;  $\text{City\_EI}_i$ : 城市  $i$  的排放清单, 包括辖区内的点源、面源;  $\text{Met\_Month}_j$ :  $j$  月的逐时气象场;  $\text{Conc}_{i,j,k}$ : 城市  $i$  排在  $j$  月对受体城市  $k$  所辖网格的月日均浓度平均。

### 3 研究结果 (Results)

#### 3.1 模型验证

为验证模型结果是否真实反映实际大气环境的污染情况, 参照文献 (郝吉明等, 2005) 的方法将各城市排放对监测站点所在网格的小时平均浓度

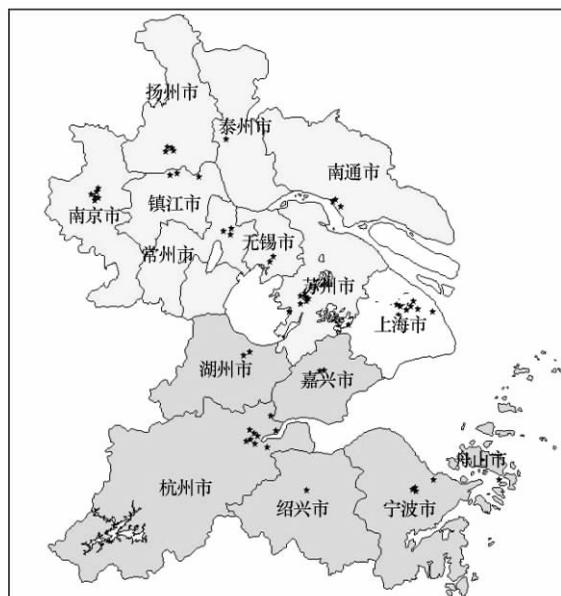


图 4 长三角地区各城市监测站点位图

Fig. 4 Monitoring sites' location in the Yangtze River Delta

累加,与监测站点的监测小时值进行两倍误差对比统计.

图5为2004年1月、7月3种污染物模拟与监测的两倍误差图.由图可见, $\text{SO}_2$ 1月和7月75%以上的点都在两倍误差范围内,而 $\text{NO}_2$ 在1月和7月差异较大,分别为66%和79%, $\text{PM}_{10}$ 的两倍误差总体偏低,1月为60%,7月为45%.究其原因, $\text{SO}_2$ 在大气中相对惰性,仅少量会进一步氧化形成硫酸

盐;模拟结果为 $\text{NO}_x$ ,而监测值为 $\text{NO}_2$ ,而 $\text{NO}_2$ 在空气中 $\text{NO}_x$ 比例变化较大(张爱东等,2006),本研究中按一固定比例进行 $\text{NO}_2$ 分摊难免产生较大季节性误差; $\text{PM}_{10}$ 的模拟浓度比实际监测值偏低,原因是一方面清单中各城市本地的道路扬尘、施工扬尘估算有所不足,另一方面二次生成的颗粒物在 $\text{PM}_{10}$ 占有相当比例(牛彧文等,2006).

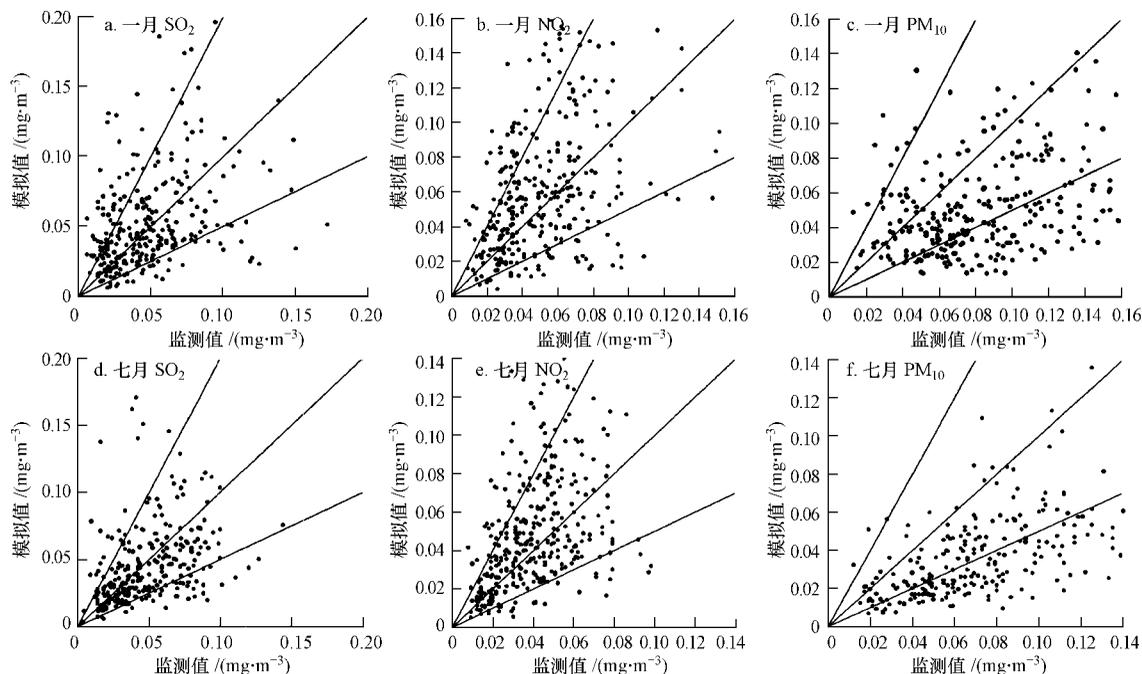


图5 监测站模拟与监测小时平均浓度的两倍误差图

Fig. 5 Monitoring sites' double bias map between simulation and observation

经过模拟值与监测值的统计分析,模型模拟结果基本接近实际大气污染的情况,模型可以用来进行长三角城市间一次污染跨界影响的研究.

### 3.2 各城市一次污染浓度分布

由式(2)中的 $\text{Conc}_{i,j,k}$ 按排放城市*i*进行加和,可得每个城市所辖网格受15个城市排放的共同影响的平均浓度.表4列出了各城市1月和7月3种污染物的一次污染日均浓度,图6根据表4的数据进行了污染浓度分级专题图的渲染.由表4的数据及图6的分布图不难看出,无论是1月还是7月,3种污染物污染最严重的地方都集中在环太湖地区,包括上海、苏州、无锡和常州等城市,这无疑和它们自身的高排放强度密切相关.对比1月和7月的季节变化,浙北的绍兴、宁波、杭州、湖州和嘉兴

等城市1月的污染浓度比7月显著较高, $\text{SO}_2$ 月均浓度增长幅度介于 $13 \sim 19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , $\text{NO}_x$ 增长在 $9 \sim 19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, $\text{PM}_{10}$ 为 $3 \sim 5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;而苏中的扬州、泰州、南通等城市却相反,7月的污染浓度比1月显著升高, $\text{SO}_2$ 月均浓度增长幅度介于 $5 \sim 8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , $\text{NO}_x$ 增长在 $4 \sim 8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, $\text{PM}_{10}$ 为 $1 \sim 2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .究其原因,1月份区域主风向为西北风,环太湖地区的大量污染物被输送到了浙北这几个城市;7月的流动场为偏南气流,环太湖地区的大量污染物又被输送到苏中地区.还应该指出的是,当北风盛行时,苏北、华北的大气污染对长三角北部城市,如南京、扬州、泰州等城市的影响是不可忽略的.

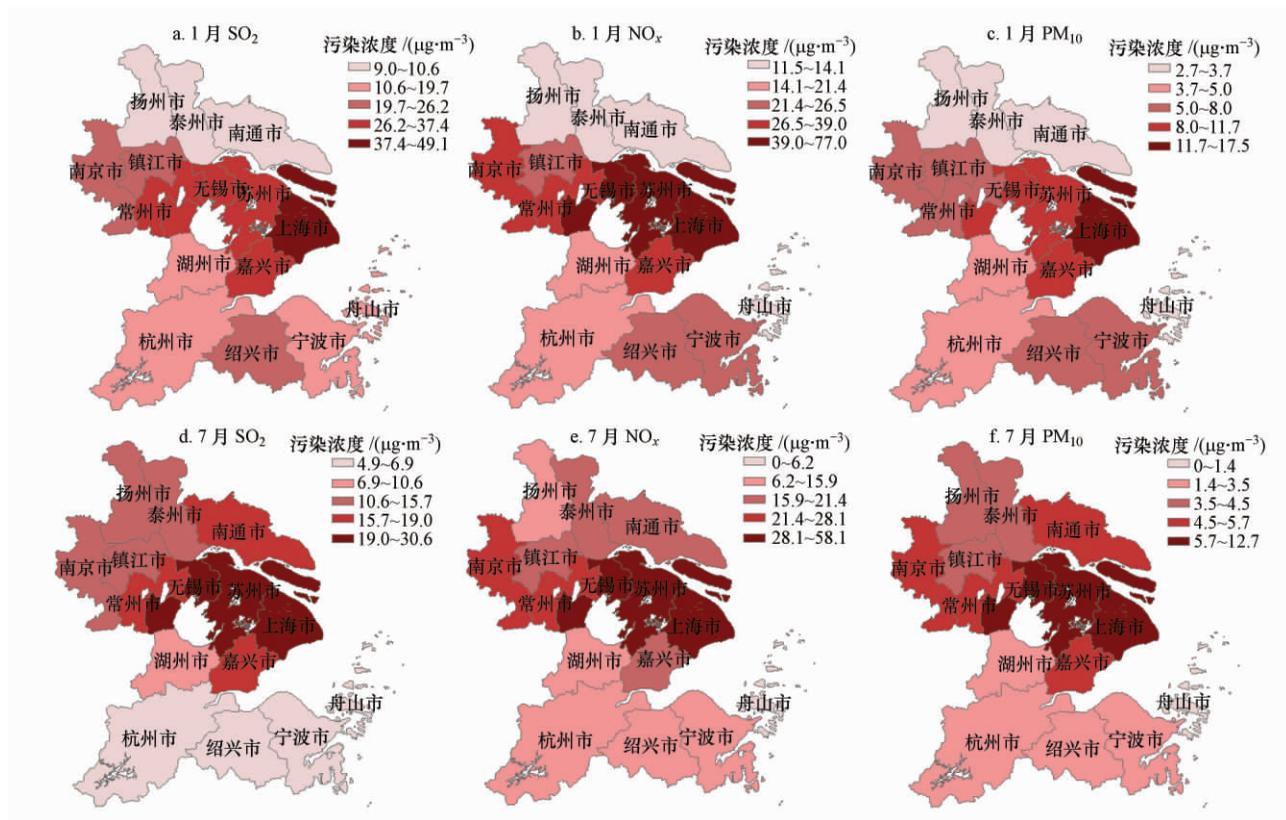


图6 各城市所辖网格污染物月均浓度分布图

Fig. 6 Monthly average concentration distribution map of every city's grids

表2 长三角各城市3种污染物月均值

Table 2 Monthly average concentration of primary pollutant in 15 cities of the Yangtze River Delta  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

城市	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>		PM <sub>10</sub>	
	1月	7月	1月	7月	1月	7月
上海	49.1	30.6	77.0	58.1	17.5	12.7
苏州	37.4	26.9	53.1	45.3	11.7	9.6
无锡	36.6	23.3	53.2	45.6	11.7	9.5
嘉兴	36.3	17.3	39.0	21.4	10.4	5.5
常州	31.1	17.5	35.6	26.5	8.0	5.7
镇江	26.2	14.6	26.5	19.8	6.4	4.5
南京	24.0	14.2	36.6	28.1	7.3	5.3
绍兴	21.3	6.8	24.5	11.4	6.1	2.6
宁波	19.7	6.2	25.2	12.7	6.2	2.8
湖州	18.6	10.6	19.3	14.1	5.0	3.5
舟山	15.0	4.9	14.1	6.2	3.7	1.4
杭州	13.8	6.9	21.4	14.4	4.8	3.0
南通	10.6	19.0	13.9	21.4	3.3	5.2
泰州	9.4	15.7	13.2	18.2	3.2	4.4
扬州	9.0	14.2	11.5	15.9	2.7	3.8

3.3 各城市一次污染浓度的来源分担

式(2)得到了排放城市*i*在*j*月对受体城市*k*所辖网格的污染浓度,在此基础上通过下式得到各

排放城市*i*对受体城市*k*所辖网格的污染浓度贡献分担率.

$$\text{Ratio\_Contri}_{i,j,k} = \text{Conc}_{i,j,k} / \sum_{i=1}^{15} \text{Conc}_{i,j,k} \quad (3)$$

将浓度贡献分担率通过箭头表达在GIS地图上,箭头起始位置为排放城市,终点位置为受体城市,箭头粗细和数字表示来源分担率的大小,即得到了图7所示各城市一次污染的来源分担率图.为突出显示,图中仅画出各城市外来分担率大于等于10%比例的箭头示意.

由图可见,在1月,上海、南京、杭州3个城市受本地自身污染源影响占主导地位,受外来城市影响较大的城市有舟山、镇江、嘉兴和绍兴等.具体到污染物,上海、南京和杭州3地的SO<sub>2</sub>本地贡献率为61%~76%,NO<sub>x</sub>本地贡献率为80%~88%,PM<sub>10</sub>为76%~84%.受外来影响较大的城市中,舟山的SO<sub>2</sub>浓度92%来自外来贡献,主要是上海贡献的48%和苏州贡献的17%,NO<sub>x</sub>的外来贡献达到82%,来自上海的46%和苏州的15%,PM<sub>10</sub>来自外地的贡献率为83%,依然由上海的51%和苏州的14%组成;镇江的SO<sub>2</sub>外来贡献率为67%,主要有来自南京的

30%和扬州的16%， $NO_x$ 的外来贡献达到48%，其中南京贡献18%，扬州贡献11%， $PM_{10}$ 外地贡献率50%主要由南京的19%和扬州的12%组成；嘉兴主要受到上海和苏州的影响， $SO_2$ 外来贡献率68%，上海和苏州分别占有20%和14%， $NO_x$ 外来贡献率60%，上海和苏州各为22%和16%， $PM_{10}$ 外来贡献

率60%主要由上海的25%和苏州的14%构成；绍兴则主要受杭州的影响较大， $SO_2$ 外来分担率56%中19%来自杭州，40%的 $NO_x$ 外来分担率杭州占了15%， $PM_{10}$ 外来分担率44%杭州贡献了其中的17%。

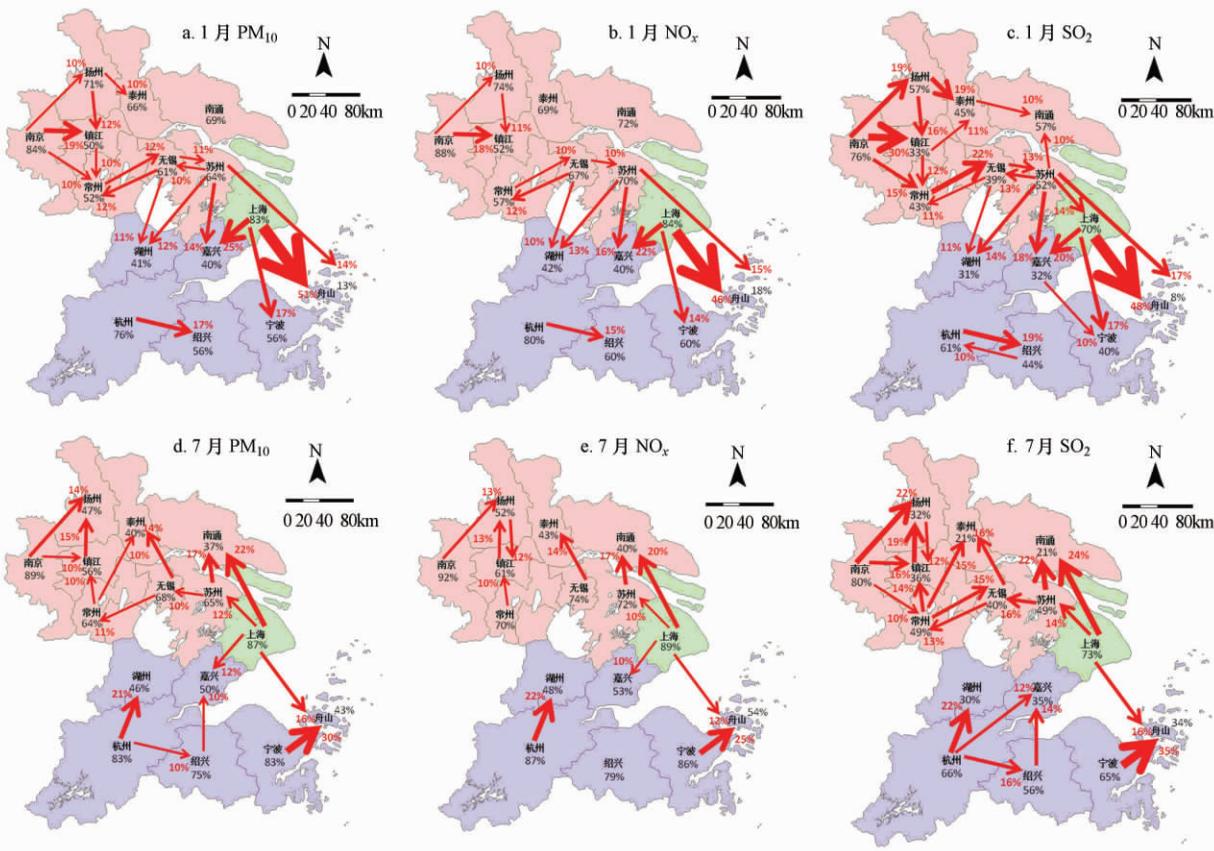


图7 各城市一次污染本地贡献及主要外来分担率

Fig. 7 The primary pollution's local contribution and main external contribution

在7月,由于主导风向的变化,情况和1月有很大不同.虽然上海、南京、杭州、宁波4个城市受本地自身污染源影响占主导地位,但受外来城市影响较大的城市主要是舟山、南通、扬州、泰州和湖州等.具体到污染物,上海、南京、杭州、宁波的 $SO_2$ 本地贡献率为65%~80%， $NO_x$ 本地贡献率为86%~92%， $PM_{10}$ 为83%~89%。受外来影响较大的城市中,舟山的 $SO_2$ 浓度66%来自外来贡献,主要是宁波贡献的35%和上海贡献的16%， $NO_x$ 的外来贡献达到46%，仍然是来自宁波的25%和上海的12%， $PM_{10}$ 来自外地的贡献率为57%，依然由宁波的30%和上海的16%组成；南通的 $SO_2$ 外来贡献率为79%，主要有来自上海的24%和苏州的22%， $NO_x$ 的外来贡献达到60%，其中上海贡献20%，苏州贡

献17%， $PM_{10}$ 外地贡献率63%主要由上海的22%和苏州的17%组成；扬州主要受到南京和镇江的影响， $SO_2$ 外来贡献率68%，南京和镇江分别占有22%和19%， $NO_x$ 外来贡献率48%，南京和镇江各为13%， $PM_{10}$ 外来贡献率53%主要由南京的14%和镇江的15%构成；泰州主要受到无锡和常州的影响， $SO_2$ 外来贡献率79%，无锡和常州分别占有16%和15%， $NO_x$ 外来贡献率57%有来自无锡的14%， $PM_{10}$ 外来贡献率60%主要由无锡的14%和常州的10%构成；湖州则主要受杭州的影响较大， $SO_2$ 外来分担率70%中22%来自杭州，52%的 $NO_x$ 外来分担率杭州占了22%， $PM_{10}$ 杭州则贡献了外来分担率54%中的21%。

## 4 结论 (Conclusions)

1) 研究表明,受长三角区域目前的污染源分布格局和气象季节特征共同影响,环太湖地区的上海、苏州、无锡和常州等城市由于自身高排放强度,始终是长三角一次污染最严重地区.受其影响,在以西北风为主导风向的1月,浙北的绍兴、宁波、杭州、湖州、嘉兴等城市一次污染加重, $\text{SO}_2$ 月均浓度增长幅度介于 $13 \sim 19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\text{NO}_x$ 增长在 $9 \sim 19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, $\text{PM}_{10}$ 为 $3 \sim 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;到了以偏南风为主的7月,苏中的扬州、泰州、南通等城市污染会比1月严重许多, $\text{SO}_2$ 月均浓度增长幅度介于 $5 \sim 8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\text{NO}_x$ 增长在 $4 \sim 8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, $\text{PM}_{10}$ 为 $1 \sim 2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

2) 从各城市一次污染来源分担率看,上海、南京、杭州等城市以本地污染贡献占主导地位, $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 的本地贡献率分别在61%、80%和76%以上;在1月,受外来影响较大的城市有舟山、镇江、嘉兴和绍兴,其中舟山受上海、苏州等外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为92%、82%和83%,嘉兴同样主要受上海、苏州的影响,外来贡献总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为68%、60%和60%,镇江则主要来自南京和扬州的传输,外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为67%、48%和50%,绍兴受杭州等地的外来影响总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为56%、40%和44%;在7月,舟山、南通、扬州、泰州和湖州受外来一次污染较大,舟山主要受宁波和上海的影响,外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为66%、46%和57%,南通则是上海和苏州污染传输所致,外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为79%、60%和63%,扬州的污染和南京、镇江的排放密切相关,外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为68%、48%和53%,泰州则是来自无锡和常州的影响,外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为79%、57%和60%,湖州受杭州影响较大,外来影响的总比例 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别为70%、52%和54%.

3) 受地理位置和气象条件的影响,长三角城市群的区域性大气污染格局已经形成,城市间大气污染物输送明显.大量的一次污染物跨界传输不仅加重了受体城市的一次污染,也为二次污染的形成与加重提供了潜在条件.因此,传统的针对单一城市的大气污染控制已不适用,需要站在长三角区域甚

至更大范围尺度上,通过区域联防联控开展大气污染控制工作.

**责任作者简介:** 陈长虹(1954—),男,教授,上海市环境科学研究院大气所所长.长期从事城市与区域大气环境研究,先后获上海市科学技术进步二等奖和三等奖. E-mail: chench@saes.sh.cn.

### 参考文献 (References):

- 陈长虹, 黄成, 李莉, 等. 2007. 长三角区域大气污染输送研究 [R]. 上海: 上海市环境科学研究院
- Chen C H, Huang C, Li L, *et al.* 2007. Research of atmospheric transport in the Yangtze River Delta [R]. Shanghai: Shanghai Academy of Environmental Sciences (in Chinese)
- Chen D S, Cheng S Y, Liu L, *et al.* 2007. An integrated MM5 CMAQ modeling approach for assessing trans-boundary  $\text{PM}_{10}$  contribution to the host city of 2008 Olympic summer games-Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 41(6): 1237-1250
- David G S, Joshua S F, Carey J J, *et al.* 2007. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 41(3): 480-492
- 国务院办公厅. 2010. 关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见 [OL]. 2010-07-14. [http://www.gov.cn/zwggk/2010-05/13/content\\_1605605.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2010-05/13/content_1605605.htm)
- General Office of the State Council. 2010. Guiding Opinions on Pushing Forward the Work of Joint Prevention and Control of Atmospheric Pollution to Improve Regional Air Quality [OL]. 2010-07-14. [http://www.gov.cn/zwggk/2010-05/13/content\\_1605605.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2010-05/13/content_1605605.htm) (in Chinese)
- 郝吉明, 王丽涛, 李林, 等. 2005. 北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析 [J]. *中国科学(D辑)*, 35(增刊 I): 115-122
- Hao J M, Wang L T, Li L, *et al.* 2005. The contribution of atmospheric sources related to Beijing's energy and adjustment measurement analysis [J]. *Science in China(Series D)*, 35(Supplement I): 115-122 (in Chinese)
- Hao J M, Wang L T, Shen M J, *et al.* 2007. Air quality impacts of power plant emissions in Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 147(2): 401-408
- Lee C, Richter A, Leeb H, *et al.* 2008. Impact of transport of sulfur dioxide from the Asian continent on the air quality over Korea during May 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 42(7): 1461-1475
- 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 2008. 长江三角洲地区大气  $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{10}$  的区域污染特征模拟 [J]. *环境科学*, 29(1): 237-245
- Li L, Chen C H, Huang C, *et al.* 2008. Regional air pollution characteristics simulation of  $\text{O}_3$  and  $\text{PM}_{10}$  over Yangtze River Delta Region [J]. *Environmental Science*, 29(1): 237-245 (in Chinese)
- Kaldellis J K, Chalvatzis K J, Spyropoulos G C. 2007. Transboundary air pollution balance in the new integrated European environment [J]. *Environmental Science & Policy*, 10(7/8): 725-733

- Moussiopoulos N, Helmis C G, Flocas H A, *et al.* 2004. A modelling method for estimating transboundary air pollution in southeastern Europe [J]. *Environmental Modelling & Software*, 19(6): 549-558
- 牛彧文, 何凌燕, 胡敏, 等. 2006. 深圳冬、夏季大气细粒子及其二次组分的污染特征 [J]. *中国科学( B 辑化学)*, 36(2): 173-180
- Niu Y W, He L Y, Hu M, *et al.* 2006. The pollution characteristics of fine particles and its secondary component in Shenzhen's Winter and Summer [J]. *Science in China( Series B)*, 36(2): 173-180 ( in Chinese)
- Scire J S, Strimaitis D G. 2001a. A user's guide for the CALPUFF dispersion model [OL]. 2007-05-10. <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>
- Scire J S, Robe F R. 2001b. A user's guide for the CALMET meteorological model [OL]. 2007-05-01. <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>
- 王淑兰, 张远航, 钟流举, 等. 2005. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响 [J]. *中国环境科学*, 25(2): 133-137
- Wang S L, Zhang Y H, Zhong L J, *et al.* 2005. Interaction of urban air pollution among cities in Zhujiang Delta [J]. *China Environmental Science*, 25(2): 133-137 ( in Chinese)
- Wang T, Cheung V T F, Anson M, *et al.* 2001. Ozone and related gaseous pollutants in the boundary layer of eastern China: overview of the recent measurements at a rural site [J]. *Geophysical Research Letters*, 28(12): 2373-2376
- Weinroth E, Luria M, Emery C, *et al.* 2008. Simulations of Mideast transboundary ozone transport: A source apportionment case study [J]. *Atmospheric Environment*, 42(16): 3700-3716
- 张爱东, 王晓燕, 修光利. 2006. 上海市中心城区低空大气臭氧污染特征和变化状况 [J]. *环境科学与管理*, 31(6): 21-26
- Zhang A D, Wang X Y, Xiu G L. 2006. Pollution characteristics and variation patterns of ozone in low-level air in central urban area of Shanghai [J]. *Environmental Science and Management*, 31(6): 21-26 ( in Chinese)
- 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 2004. 中国华北区域城市间污染物输送研究 [J]. *环境科学研究*, 17(1): 14-20
- Zhang Z G, Gao Q X, Han X Q, *et al.* 2004. The study of pollutant transport between the cities in North China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 17(1): 14-20 ( in Chinese)