

污染源、气象条件变化对我国 SO_2 浓度及硫沉降量分布的影响*

张新玲¹⁾ 安俊岭²⁾ 程新金²⁾ 程 炜¹⁾

1) (江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

2) (中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 用三维欧拉型污染物长距离输送模式, 模拟了中国大陆 SO_x 的分布, 并采用不同时期 (1975、1980、1987 年) 的污染源与气象场资料, 分析了污染源与气象条件变化对 SO_x 分布产生的影响。研究表明, 在该期间中国 SO_x 污染比较严重的地区, 气象条件变化导致 SO_2 浓度和硫沉降量的相对变化通常在 20% 左右; 污染源对 SO_2 浓度与硫沉降量的作用通常大于气象条件, 污染源变化产生的 SO_2 浓度与硫沉降量的相对变化率为气象条件变化的几倍, 甚至 1~2 个量级, 尤其 SO_x 污染比较严重的地区更为明显; 但对西北及青藏高原地区, 在源排放量变化不大, 而气象条件变化较显著时, 气象条件的作用通常大于排放源的影响。

关键词: 硫氧化物; 污染源; 气象条件; 相对变化率

1 引言

东亚的空气污染正日趋严重, SO_2 的排放量随着本地区能源需求的扩大而增加^[1~4]。在过去的 20 年里, 我国的 SO_2 排放量增加了 2 倍多, 而且增长趋势还在继续^[5], 污染物排放量的大幅度增长, 引发了严重的环境问题。污染物的分布和污染源的关系是空气污染及酸沉降研究中倍受关注的问题, 污染源是造成一切污染的根源, 直接影响 SO_x 在大气中的浓度, 因此也会影响其沉降量与降水的 pH 值。关于污染源和受体的关系, 国内外已做了很多工作^[6~9], 但控制污染源的排放量能否有效地提高环境质量, 或者说污染源与气象因素对 SO_x 分布起怎样的作用还有待进一步深入。以往对污染源作用的探讨主要是进行一系列的敏感性试验^[10, 11], 即污染源排放量增加或减少一定的比例, 分析其对大气中污染物浓度及沉降量产生的影响, 并未考虑不同历史时期源排放量的实际变化, 对气象因素的作用也只限于不同天气条件下对污染物分布个例研究或改变某一气象要素值所进行的敏感性试验, 极少用历史变化的污染源资料和气象条件的变化对较大研究区域内污染物的分布作长期模拟研究。这是由于在较大的研究区域内, 直接耦合化学模式作长期 (季或年) 数值模拟分析是相当困难的。我们对化学过程采用了既可保证一定精度, 又可大大缩短计算时间的查表式处理方

法^[12, 13], 解决了这一难题。通过长期数值模拟试验表明, 该方法用于污染物长距离输送模拟是完全可行的^[14]。

分析影响污染物分布的主要因素^[15, 16]——污染源、气象条件的作用对于控制污染、提高环境质量及区域的环境规划有着重要的意义。

本文用三维欧拉型长距离输送模式, 用查表法处理气相化学过程, 采用 1975、1980、1987 年的污染源与气象要素资料, 进行实际的定量化对比, 分析了污染源与气象条件变化对污染物分布产生的影响。

2 模式简介与资料来源

地形追随球坐标系下的三维欧拉型污染物输送方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\Delta HC_i) + \frac{\partial}{R \cos\theta \partial \varphi}(u \Delta HC_i) + \frac{\partial}{R \cos\theta \partial \theta}(v \cos\theta \Delta HC_i) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(WC_i) \\ & = \frac{K_\varphi \partial}{R^2 \cos\theta \partial \varphi} \left(\Delta H \frac{\partial C_i}{\partial \varphi} \right) + \frac{K_\theta \partial}{R^2 \cos\theta \partial \theta} \left(\Delta H \cos\theta \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_\sigma \partial C_i}{\Delta H \partial \sigma} \right) \\ & + S \Delta H + P \Delta H - R_d \Delta H - R_{\text{wet}} \Delta H, \end{aligned}$$

其中, C_i 为第 i 种污染物的浓度, t 是时间, R 为地球半径, θ 、 φ 分别代表经度和纬度, K_θ 、 K_φ 、 K_σ 是径向、纬向、垂直方向上的扩散系数, R_{wet} 为湿清除项, R_d 是干沉降项, S 为源排放率, P 为化学转化率, u 、 v 是水平方向的风速, σ 为地形坐标, 满足

$$\sigma(\theta, \varphi) = \frac{z - h(\theta, \varphi)}{H(\theta, \varphi) - h(\theta, \varphi)} = \frac{z - h}{\Delta H},$$

$H(\theta, \varphi)$ 为对流层高度, $h(\theta, \varphi)$ 是地形高度, W 是等效垂直速度, 由空气质量守恒方程得出,

$$W = \omega - \frac{u}{R \cos\theta} \left(\frac{\partial h}{\partial \varphi} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial \theta} \right) - \frac{v}{R} \left(\frac{\partial h}{\partial \theta} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial \theta} \right).$$

关于三维欧拉型污染物的长距离输送模式的详细说明可参考文献 [12、13], 模式的模拟区域为 (75°E~146°E, 16°N~60°N), 水平网格距 1°×1°, 垂直方向不等间距分为 8 层。

污染源资料来自 Akimoto 的排放源资料 (包括 SO₂、NO_x)^[17]。气象场资料采用月平均的 NCEP (美国国家环境预测中心) 等压面 (1000、925、850、700、500、400、300、200、100 hPa) 同化资料, 网格距为 2.5°×2.5°, 采用线性插值的方法, 水平方向把各气象要素插值到 1°×1°网格, 垂直方向上把等压面的气象要素插值到等 σ 坐标面。

模拟计算时, 由于采用的是月平均气象资料, 年污染物浓度及沉降量为逐月积分计算求得。模式可模拟 15 种污染物 (SO₂、SO₄²⁻、NO、NO₂、HNO₃、气溶胶等) 浓度分布情况, 本文重点研究 SO₂ 浓度及硫氧化物 (包括 SO₂、SO₄²⁻) 沉降情况。气溶胶粒子排放源根据不同地区的植被特征在模式中被赋予一定数值。

3 模式的数值试验

首先, 定义污染物浓度或沉降量的相对变化率 R ,

$$R = \frac{C_A - C_B}{C_B} \times 100\%,$$

其中, C_A 为 A 条件下的污染物浓度或沉降量, C_B 为 B 条件下的污染物浓度或沉降量, 一般取条件 B 为标准参数。

以 1975 年为参考标准 (条件 B), 即用 1975 年的污染源与气象场资料模拟得到 SO₂ 浓度或硫沉降量作为 C_B , 然后采用两种处理方法: 一是不改变 1975 年源排放的情况下, 分别用 1980、1987 年的气象场 (包括降水) 资料计算得到 SO₂ 浓度或硫沉降量作为 C_A , 进而求出改变气象条件 (即用 1980、1987 年气象条件) 时的相对变化率; 二是不改变 1975 年气象条件的情况下, 分别用 1980、1987 年的排放源资料, 计算得到 SO₂ 浓度或硫沉降量作为 C_A , 分别得出改变污染源 (即用 1980、1987 年排放源资料) 时的相对变化率。

各年份 SO₂ 排放情况见图 1 (图版)。

3.1 近地层 SO₂ 浓度的相对变化

气象场变化后模拟结果 (图 2) 表明, SO₂ 浓度变化率通常在 -50%~50% 之间, 西北的部分地区可达 100%。SO₂ 浓度比较大的地区, 如华东、华南、华北和西南的部分地区的变化率大致在 -20%~20%, 气象条件对北方地区, 尤其西北、华北大部分地区的影响程度普遍大于南方地区。

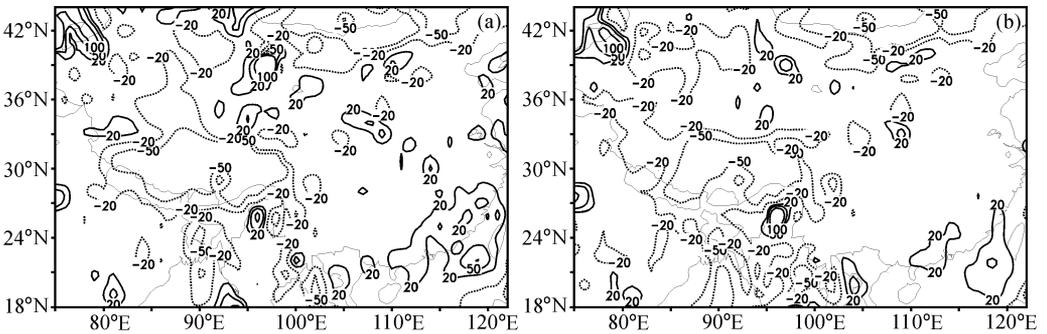


图 2 气象条件变化引起近地层 SO₂ 浓度的相对变化率 (%)

(a) 1980 年; (b) 1987 年

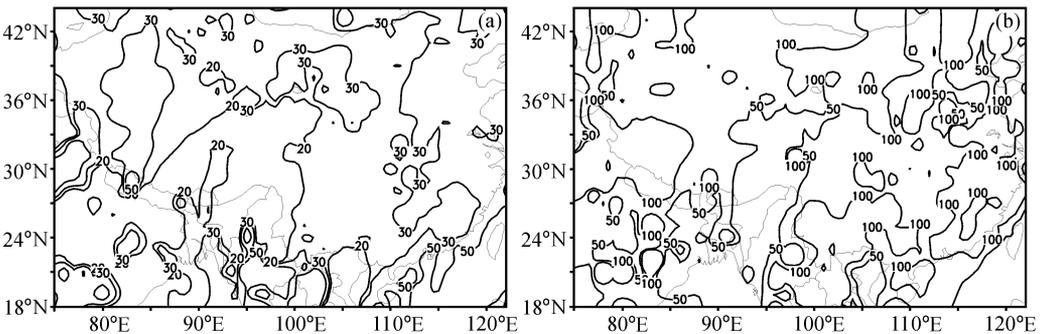


图 3 污染源变化引起近地层 SO₂ 浓度的相对变化率 (%)

(a) 1980 年; (b) 1987 年

改变污染源后计算结果表明(图3),用1980年的排放源资料得到的相对变化率基本上小于50%,全国的大部分地区在20%~30%之间,东部沿海一带及西北部分地区超过30%。用1987年的源排放资料其相对变化率明显增大,全国大部分地区超过50%,华北、华东、华南及西南部分地区都已超过100%,而这些地区又是SO₂浓度高值中心所在区域。

3.2 硫沉降量的相对变化

气象条件对硫沉降量的影响(图4)表明,当采用变化的气象条件(即分别用1980、1987年的气象要素场)时,除了西北及青藏高原的部分地区的变化率偏高(可超过100%)外,我国的广大范围,尤其是西南、华东、华南酸雨污染比较严重的地区的变化率幅度很小,通常在-20%~20%之间。用不同时期的污染源资料模拟后的情况(图5)表明,用1980年资料计算的结果与标准年份相差不是很大,其相对变化率大致在20%~40%;用1987年的源排放资料模拟情况表明,我国的广大区域硫沉降量的增长率超过50%,而酸雨污染严重的地区如华东、华南及西南大部超过100%。这一变化特征与污染源变化引起SO₂浓度的相对变化很相似。

通过分析不难发现,污染源分布变化程度大时,会引起SO₂浓度和硫沉降量分布显著变化,因而出现远偏离基础年份的模拟情况,而且在SO_x污染较为严重的地区,污染源变化后计算的相对变化率也明显大于气象场变化产生的相对变化率。

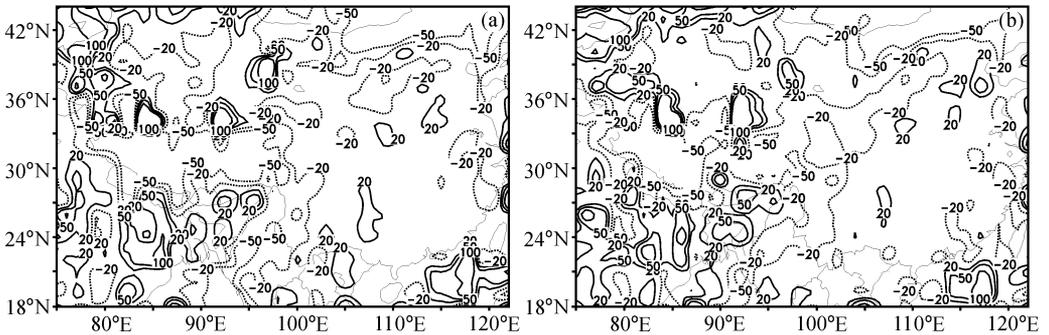


图4 气象条件变化引起硫年沉降量的相对变化率(%)

(a) 1980年; (b) 1987年

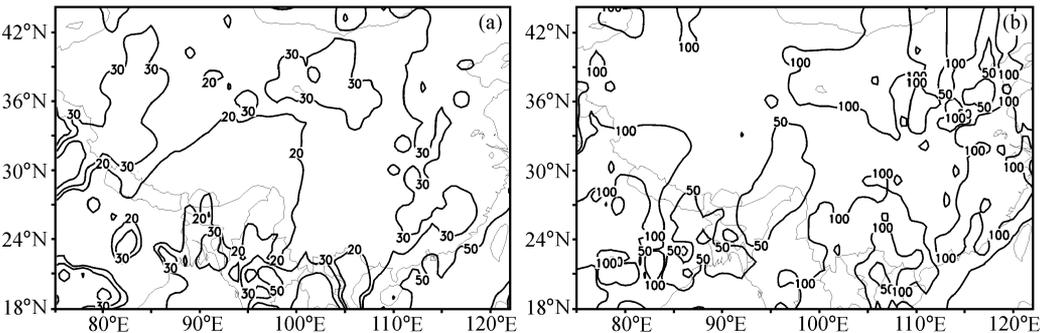


图5 污染源变化引起硫年沉降量的相对变化率(%)

(a) 1980年排放源; (b) 1987年排放源

4 部分城市不同时期污染物相对变化情况比较分析

为了进一步说明污染源和气象条件对SO_x浓度和沉降量的影响程度,表1列出我国一些主要地区包括SO_x污染比较严重的城市近地层SO₂浓度、硫沉降量的相对变化率。由表1可见,除西北地区(如西安、拉萨)气象条件影响可能大于排放源外,排放源变化产生的相对变化率通常是气象场变化得到相对变化率的3~5倍,部分城市可达1~2个量级。但济南情况有所不同,用1987年排放源计算SO₂浓度得到-10%的变化率,硫沉降量的变化率只有1%,这可能与该地区的排放量有关,济南1975、1980、1987年硫排放量分别是12.26 g m⁻²a⁻¹、15.97 g m⁻²a⁻¹、10.32 g m⁻²a⁻¹,上述情况可能是由于1987年比1975年排放量有所减少而造成的。总的来看,污染源对SO_x的作用明显大于气象条件。从我国源排放量的历史变化来看,1980年比1975年增长30%,而1987年排放量比1975年增长近100%,SO₂排放量的增长率与排放量变化导致的我国主要SO_x污染地区SO₂浓度和硫沉降量的相对变化率基本一致。由此不难看出,污染源变化程度越大,对SO_x分布产生的影响就越大,而气象条件的影响随时间推移是相对稳定的。

表1 部分地区SO₂浓度、硫沉降量的相对变化率(%)

城市	SO ₂ 浓度				硫沉降量			
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
北京	-9	32	-10	66	-20	33	3	58
沈阳	-1	42	-3	57	-4	37	12	59
天津	-1	36	-7	52	12	28	35	42
唐山	-1	33	3	47	5	29	-61	42
大同	6	29	3	67	-13	31	13	63
济南	-2	33	-2	-10	14	24	8	1
合肥	8	43	-15	115	-21	40	-27	114
南京	15	41	-11	134	-31	38	-18	120
上海	5	38	4	98	-6	30	2	71
杭州	12	35	-12	116	-12	33	5	107
武汉	56	41	12	107	-1	38	-8	105
长沙	10	39	-3	101	0	36	2	100
重庆	-1	27	2	109	-1	25	3	104
成都	9	24	-4	97	-8	24	4	96
贵阳	-5	25	-12	112	3	25	-9	106
柳州	-15	25	-5	114	13	26	-16	115
西安	54	29	22	93	18	28	26	84
西宁	18	18	-7	93	-17	29	-24	117
兰州	4	35	-12	120	-6	39	-12	122
乌鲁木齐	40	23	30	97	42	23	32	100
拉萨	-58	22	-67	70	-47	18	-25	63

注:CASE1、CASE3为采用1980、1987年气象场资料的计算情况,CASE2、CASE4为采用1980、1987年污染源资料的计算情况

从部分城市SO₂排放量在不同时间的增长变化情况(图6)来看,1980年相对于1975年排放量的增长率为20%~50%,大部分地区排放量的增长率与用1980年排放

源资料得到的相对变化率(近地层 SO_2 浓度与硫沉降量)较接近,而 1987 年相对于 1975 年排放量的增长率为 30%~150%,这与用 1987 年排放源资料得到的相对变化率(近地层 SO_2 浓度与硫沉降量)有一定偏离,且部分地区偏差较大,这可能是由于 1980 年相对 1975 年排放量变化幅度很小且各地区变化幅度较为接近,而 1987 年排放量相对 1975 年有较大增加,且部分地区增长幅度差别较大,导致局部地区污染物在大气中转化差异和向周边地区输送,因而可能出现排放量相对变化与 SO_2 浓度和硫沉降量相对变化差别增大。总而言之,排放量增加, SO_2 浓度、硫沉降量亦增加;排放量增加愈明显, SO_2 浓度、硫沉降量增长也就愈显著。

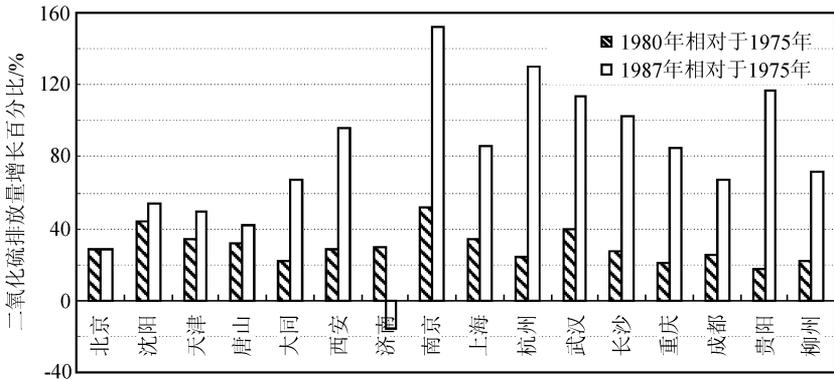


图 6 不同时期 SO_2 排放量变化情况

硫沉降量受排放源与气象因素的影响与近地层 SO_2 浓度具有相似的特点。由图 2~5 不难发现这样一个事实,用污染源变化模拟后得到 SO_2 浓度及硫沉降量的相对变化率通常大于气象条件改变所得到的相对变化率,而且与基准年份相隔时间愈长,源排放情况差别愈大,其排放源改变对基准年份的影响也就愈大。这从图中可以看到,用 1980 年排放源和气象场模拟后的相对变化率与基准年份差别不很显著,而用 1987 年排放源则差别很大。其原因是 1980 年的源排放情况与 1975 年较接近,1987 年差距较大,而气象条件在 1975~1987 十几年过程中的变化远不如污染源变化显著。

研究表明,湿沉降对 SO_2 的沉降过程起主要作用^[18],而湿沉降主要受降水分布的影响。源排放量分布变化不大,而气象条件尤其是降水分布形势变化比较大时, SO_2 浓度和硫沉降量也会出现气象场改变对其影响明显大于源排放量变化的情况。为此我们对 1975、1980、1987 年降水、风场、温度等气象要素进行了分析,图 7、图 8、图 9 给出了 1975、1987 年降水、风场、温度场分布形势。通过比较,发现 1975、1980、1987 年温度差别不大,气象条件变化导致 SO_2 浓度和硫沉降量分布相对变化主要是由降水和风场分布的差异引起的,而降水分布存在较明显差异的地区是我国西部地区。由我国西部地区年降水分布形势可以看出,气象条件变化引起硫沉降量变化,在其变化率大的区域,降水分布与 1975 年明显不同,而我国西北及青藏高原硫沉降对降水分布比较敏感,导致西北大部分地区硫沉降量、气象因素的影响程度大于排放源。但近地层 SO_2 浓度有所不同,它除在一定程度上受降水、流场输送等气象因素的影响外,我国西部地区地形复杂很可能是引起西部 SO_2 浓度变化率明显大于东部地区的一个重要因素。

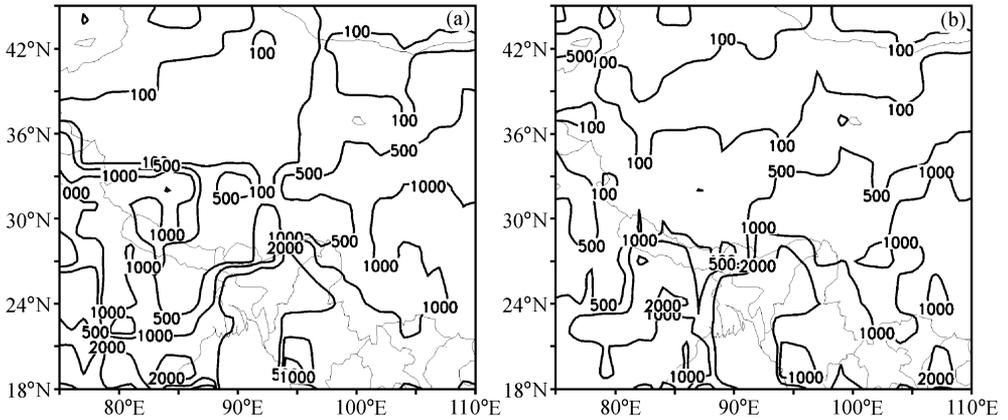


图 7 我国西部地区年降水分布 (单位: mm a⁻¹), (a) 1975 年; (b) 1987 年

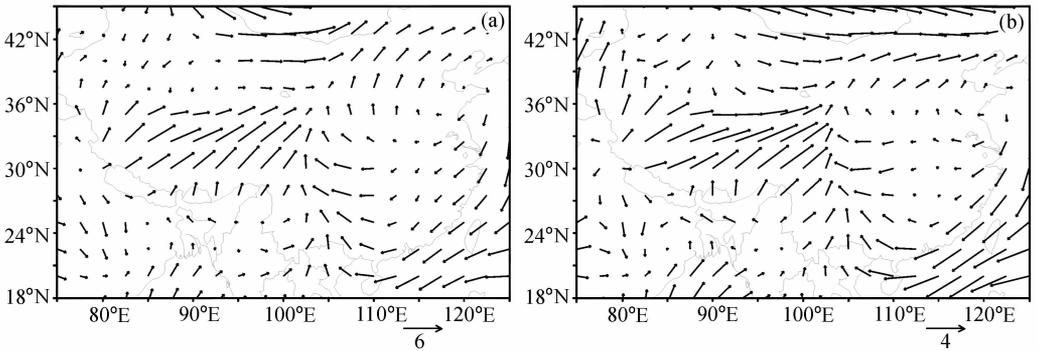


图 8 年平均风场分布 (单位: m s⁻¹), (a) 1975 年; (b) 1987 年

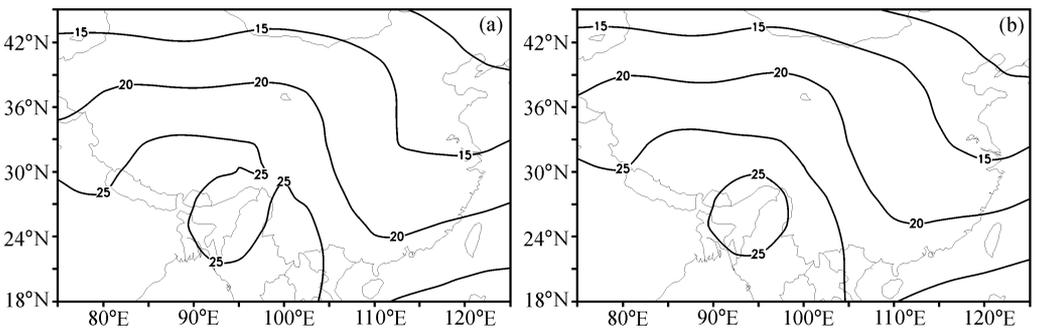


图 9 年平均温度场分布 (单位: °C), (a) 1975 年; (b) 1987 年

由以上分析可知, 气象因素变化对我国绝大部分地区, 尤其是 SO_x 污染比较严重的地区, 如华北、华东、华南及西南部分地区的影响远不如污染源改变产生的影响大。通常, 气象要素一般不会偏离气候统计平均值很多, 是一个长期比较稳定的条件, 而污染源变化则可能较大。进入 20 世纪 90 年代, 尤其到 90 年代中后期, 由于经济快速发展增加能源消耗量, 污染物产生量可能会逐渐增加, 但同时我国的工业企业已经开

始逐步采用各种污染治理措施（末端处理）和清洁生产工艺，污染物排放量的削减程度会进一步加大。未来污染源排放分布情况将会产生一系列新变化，短期排放量可能出现较大削减，也可能出现在一定时期内区域污染源排放分布形势变化不明显或其他难以预料的变化，这些变化可能会导致污染源、气象条件对我国 SO_x 污染的影响呈现新特征。

5 结论

通过对 20 世纪 70~80 年代我国 SO_2 排放情况和气象条件的历史变化的模拟分析表明：

(1) 在我国 SO_x 污染比较严重的地区，气象条件变化导致 SO_2 年均浓度和硫年沉降量的相对变化通常在 20% 左右。

(2) 污染源对 SO_2 年均浓度和硫年沉降量分布所起的作用明显大于气象因素，通过对我国一些污染严重的城市的分析表明，污染源变化引起的相对变化率通常是气象因素的几倍，甚至在 1~2 个量级。

(3) 我国的西北地区、青藏高原由于受气象条件、特别是降水分布影响较大，当污染源分布变化不大时，可能出现 SO_x 分布，尤其是硫沉降量分布主要受气象因素的影响。

(4) 影响硫沉降量的主要气象因素是降水，而降水对 SO_2 浓度的影响不如对硫沉降量明显，西部地区 SO_2 浓度变化率大，除风场差异对 SO_2 输送影响外，地形作用很可能是一个重要原因。

由于本文使用 20 世纪 70~80 年代的污染源及气象资料来分析污染物排放分布和气象条件变化对 SO_x 分布影响程度的，所以本文的结论也具有时间性的限制。随着社会经济发展和污染治理水平的提高，未来污染源排放量的分布形势很可能出现新的变化特征，即一定时期内区域污染源排放分布形势变化不同于本文出现的情况，这些变化和气象条件变化对我国 SO_x 污染将产生何种程度的影响还有待进一步研究和探讨。

参 考 文 献

- 1 Rodhe, H., J. Galloway, and Dianwu Zhao, Acidification in Southeast Asia—prospects for the coming decades, *Ambio*, 1992, **21**, 148~150.
- 2 Foell, H. K. et al., Energy use, emission and air pollution reduction strategies in Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**, 2277~2282.
- 3 Qi Ling, Hao Jiming, and Lu Mingming, SO_2 emission scenarios of eastern China, *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**, 1873~1878.
- 4 Kato, N., Analysis of structure of energy consumption and dynamics of emission of atmospheric species related to the global environmental change ($\text{SO}_x, \text{NO}_x, \text{CO}_2$) in Asia, *Atmos. Environ.*, 1996, **30**, 757~785.
- 5 Streets, D. G. et al., Energy consumption and acid deposition in Northeast Asia, *Ambio*, 1999, **28**(2), 135~143.
- 6 Arndt, R. L., G. R. Carmichael et al., Sulfur dioxide emissions and sectorial contributions to sulfur deposition in Asia, *Atmos. Environ.*, 1997, **31**(10), 1553~1572.

- 7 高会旺、黄美元、安俊岭, 污染源、干沉降和气相化学影响硫沉降的数值研究, *大气科学*, 1998, **22**(1), 25~31.
- 8 Tarrason L., and T. Iversen, Modeling intercontinental transport of atmospheric sulphur in the Northern Hemisphere, *Tellus*, 1998, **50**(B), 331~352.
- 9 Arndt, R. L. et al., Seasonal source-receptor relationships in Asia, *Atmos. Environ.*, 1998, **32**(8), 1397~1406.
- 10 王体健、李宗恺、南方, 区域酸性沉降的数值研究 II. 个例模拟和试验, *大气科学*, 1996, **20**(6), 729~734.
- 11 高会旺、黄美元、王自发等, 东亚不同天气下的硫沉降分布, *中国环境科学*, 1997, **17**(6), 530~534.
- 12 Huang Meiyang et al., Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**, 1921~1926.
- 13 王自发、黄美元、何东阳等, 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式, *大气科学*, 1997, **21**(3), 366~378.
- 14 张新玲、安俊岭、程新金等, 查表法处理 SO_x气相化学过程的性能检验, *环境科学学报*, 2001, **21**(5), 513~518.
- 15 Pielke, R. A., and M. Uliasz, Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models—Limitations and strengths, *Atmos. Environ.*, 1998, **32**(8), 1455~1466.
- 16 Fujita Shin-ichi et al., Precipitation chemistry in East Asia, *Atmos. Environ.*, 2000, **34**, 525~537.
- 17 Hayime Akimoto and Hirohito Narita, Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, *Atmos. Environ.*, 1994, **28**(2), 213~225.
- 18 Xu Yiwen, and G. R. Carmichael, An assessment of sulfur deposition pathways in Asia, *Atmos. Environ.*, 1999, **33**, 3473~3468.

Effect of Evolutions of Source Emissions and Meteorological Factors on SO₂ Distribution and Sulfur Deposition in China

Zhang Xinling¹⁾, An Junling²⁾, Cheng Xinjin²⁾, and Cheng Wei¹⁾

1)(*Jiangsu Academy of Environmental Sciences, Nanjing 210036*)

2)(*State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract Using a 3-D Eulerian transport model with actual emissions and meteorological data (1975, 1980, and 1987), we analyzed the roles of key factors impacting on SO_x distribution. The results implied the relative impact ratios of SO₂ concentrations and sulfur depositions induced by meteorological factors are about 20% for a period of that time, which are less several times than those by source emissions. However it is possible that the meteorological factors show major effect when there are significant variations of meteorological conditions and less disparity of emissions in Northwest China and the Tibetan Plateau areas.

Key words: sulfur oxide; emission source; meteorological factor; relative impact ratio