第13卷 第1期
1990年 3月

南京气象学院学报
Journal of Nanjing Institute of Meteorology

Vol.13, No.1
Mar., 1990

几种点源扩散模式的研究

曹文俊　朱汶

提　要

本文用高斯(正态)模式(G·S)、Egan模式、SCIM模式及本文推荐式(GCEM)，分别计算了南京大厂区在中性条件下SO_2的瞬时浓度，并与实测浓度作了对比分析。结果表明：考虑了地形校正及化学衰减项的本文推荐式与实测浓度有较好的一致性。

在研究地形不太复杂(如城郊、乡村)的大气扩散问题时，常用高斯(正态)模式(G·S)[1]估算污染物的浓度分布。在G·S模式中，一般不作地形修正，也不计污染物(SO_2)的化学衰减作用。在大气环境评价工作中，常会遇到评价区的地形从整体上看是较平坦的，但确也存在若干零星山丘和土坡的情况。例如，在扬子乙烯工程环境影响评价的120km²范围内，在大厂镇的西南及西部，就有数处山丘、土坡的相对高差达几十米。对于这种存在局部起伏的地形，若用G·S模式计算山丘和土坡上的污染物浓度会有误差。为了估算这种误差的大小，以供实际工作参考，本文用G·S模式、Egan模式、SCIM模式以及本文推荐式(GCEM)，分别作了大厂区SO_2浓度的计算，并与该地SO_2的实测浓度值作了对比分析。所用的SO_2实测资料，是扬子乙烯工程环境影响现状评价组1983年10月20至25日在现场测得的资料，采样时间是20分钟，每天采样6次。

一、SO_2瞬时浓度的计算模式

(一)G·S烟云模式

对于高架连续点源，若把坐标原点取在排放点正下方的地面上，X轴的正向指向平均风方向，Y轴在水平面上垂直于X轴，Z轴垂直向上延伸，则G·S模式的基本形式是

$$q(x,y,z,H_e)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\cdot\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_e}{\sigma_z}\right)^2\right.\right.$$
$$\left.\left.+\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_e}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\}\qquad(1)$$

高架点源的地面浓度计算式是

1988年11月24日收到，1989年5月16日收到修改稿

$$q(x,y,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

高架点源的地面轴线浓度的计算式是

$$q(x,0,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3)$$

其中q是污染源下风侧任一点(x, y, z)的污染物浓度(以$\mu g\cdot m^{-3}$为单位)；σ_y、σ_z是Y方向与Z方向的扩散参数(m)；U是污染源排放口的平均风速($m\cdot s^{-1}$)；Q是源强($\mu g\cdot s^{-1}$)；y是该点离X轴的横向距离(m)；z是该点离地面的高度(m)；H_e是烟囱的有效源高度(m)。

(二)Egan模式

若地势并非真正平坦而存在局部起伏，则烟云的空间轨迹将异于平原地区：烟流越过高地形(如山丘)时将被抬升，在背风坡又伴有下沉运动。故在计算起伏地形上的污染物浓度时，应对G·S模式作地形修正。据文献[2]、[3]，Egan对浓度作地形修正的方法是将(2)式中的第二项$\exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right)$用$\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{TH_e}{\sigma_z}\right)^2\right]$代替。故计算高架点源的地面浓度的Egan模式是

$$q(x,y,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{TH_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (4)$$

其中T是地形修正系数，其余符合同前。因烟流一般不会与起伏地形严格保持始终平行，也不会始终保持固定的海拔高度，而是处于上述两种情况之间，故T的计算法是[2]

$$\begin{cases} H_e\leqslant h_t: & T=C \\ H_e>h_t: & T=1-\frac{h_t}{H_e}+C\frac{h_t}{H_e} \end{cases} \quad (5)$$

其中h_t是计算点的地面离烟囱底的高度(即计算点与烟囱底的高度差)。C是烟流路径系数，其值与大气稳定度、地形有关，变化于0—1之间。T也与大气稳定度、地形有关。

(三)SCIM模式

据文献[4]，若考虑化学衰减作用，则计算高架点源的地面浓度的SCIM模式是

$$q(x,y,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}-\frac{kx}{U}\right]\cdot\exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (6)$$

(6)式中的x是计算点离污染源的水平距离(m)。$\exp\left(-\frac{kx}{U}\right)$代表化学衰减作用项

k是污染物的化学衰减常数(s)，可用下式计算[5]

$$k=\frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

其中$T_{1/2}$是污染物的半衰期。对SO_2言，$T_{1/2}$变化于0.5—4h，本文计算取$T_{1/2}=2h$。其

余符号同前。

(四)GCEM模式

为了考虑地形起伏与化学衰减作用对地面浓度的影响，近似地做法是将地形修正、化学衰减与湍流扩散的作用分别考虑，而最终的浓度值则是上述三者共同作用的结果。先考虑化学衰减作用，大气中发生的化学衰减实际上很复杂，但作为一级近似，可认为污染物的化学转化速率与浓度成正比，即

$$\frac{dq'}{dt}=-kq'$$

其中k是污染物的化学衰减常数，q′是已考虑了湍流扩散与地形修正后的浓度值。设起始时刻(t＝0)的浓度为q′，经化学衰减作用后t时刻的浓度值q″为

$$\int_{q'}^{q''}\frac{dq'}{q'}=-\int_0^t k\cdot dt$$

$$q''=q'\cdot e^{-kt}$$

以t＝x/U及(7)式代入上式，得

$$q''=q'\cdot\exp\left(-\frac{0.693x}{U\cdot T_{\frac{1}{2}}}\right) \tag{8}$$

在(4)式中，q值已综合了湍流扩散与地形高度对浓度的影响，故(4)式中的浓度q即是(8)式中的q′。将(4)式中的q值代替(8)式中的q′值可得

$$q''(x,y,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2-\frac{0.693x}{U\cdot T_{\frac{1}{2}}}\right]\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{TH_e}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

为方便计，将上式中的q″换写成q，得

$$q(x,y,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2-\frac{0.693x}{U\cdot T_{\frac{1}{2}}}\right]\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{TH_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \tag{9}$$

(9)式即为本文推荐式，可用来计算高架点源的地面浓度。相应的计算高架点源地面轴线浓度的公式是

$$q(x,0,0,H_e)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}\cdot\exp\left(-\frac{0.693x}{U\cdot T_{\frac{1}{2}}}\right)\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{TH_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \tag{10}$$

(9)、(10)式中各符号同前，T的求法同(5)式。

(五)ATDL模式

本文用ATDL模式[6]计算由面源产生的污染物浓度。ATDL模式是

$$q_A=\frac{(2/\pi)^{1/2}\cdot(0.5\Delta x/\cos\Delta\theta)^{1-b}}{a(1-b)\cdot U}\cdot\left\{Q_0+\sum_{i=1}^{N}Q_i[(2i+1)^{1-b}-(2i-1)^{1-b}]\right\} \quad (11)$$

(11)式中的q_A代表接受点(网格中心)的浓度；Δx是方形网格的边长(500m)；Q_0是接受点所在网格的平均源强($\mu g\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}$)；i是某方位上风向的网格序号；N为上风方网格数；Q_i是第i网格的面源源强；a、b系数为Smith(1968)给出的值(见[6])；$\Delta\theta$是风向与网格的横向(或纵向)的夹角($0°<\Delta\theta<45°$)；U是平均风速。

二、计算模式中各参数的确定

1.σ_y、σ_z、H_e、U、Q、Q_i的求取

根据扬子乙烯工程大气环境影响评价课题组的野外测试资料及气象观测资料(1983—1984年)，统计得中性层结时的σ_y、σ_z、U、H_e分别是[7]

$$\begin{cases}\sigma_y=0.38x^{0.83}\\ \sigma_z=0.30x^{0.81}\\ U=2.9\left(\frac{z}{10}\right)^{0.26}\\ H_e=H_s+\Delta h\end{cases} \quad (12)$$

H_s是烟囱的几何高度；Δh(烟气抬升高度)的计算式是[8]

当$Q_h\geqslant2093.4kJ\cdot s^{-1}$，$\Delta T\geqslant35℃$，则

$$\Delta h=n_0(4.19Q_h)^{n_1}\cdot H_s^{n_2}/U$$

当$Q_h<2093.4kJ\cdot s^{-1}$或$\Delta T<35℃$，则

$$\Delta h=2(1.5V_s\cdot d+0.167Q_h)/U$$

其中Q_h是烟气热释放率($kJ\cdot s^{-1}$)；ΔT是烟囱口的烟气温度与环境空气的温度差；V_s是烟囱口的烟气升速(m/s)；d是烟囱口的内直径(m)；n_0、n_1、n_2的取值见表1[8]。

表1 n_0、n_1、n_2的值(大厂区)

$Q_h(kJ\cdot s^{-1})$	n_0	n_1	n_2
$Q_h\geqslant2093.4$	2.2	1/3	2/3
$20934>Q_h\geqslant2093.4$	0.74	3/5	2/5

面源的源强(Q_0、Q_i)包括各网格内的小手工业低矮源的SO_2排放量、生活源(家庭炉灶)的SO_2排放量、烟囱高度小于45m且SO_2排放量小的点源排放量。大厂区的面源源强采用[7]的资料。点源的源强(Q)见[9]。

2.烟流路径系数(C)、地形修正系数(T)的选取

为了决定大厂区的C值，可用(9)、(11)式，计算东北风、中性层结时大厂区各点源、面源产生在南京钢铁厂门口(监测点的$h_t=20m$)的SO_2浓度值。计算时分别令C等于0.1、

0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9。计算结果见表 2 。由表 2 得：在大厂区，

表 2　中性层结、不同 C 时的浓度计算值与实测值的比较

烟流路径系数 C	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	实测浓度平均值 ($\mu g/m^3$)
浓度计算值 ($\mu g/m^3$) (点源＋面源)	255.0	247.2	239.5	231.8	224.2	216.7	209.4	202.1	195.0	229.0
相对误差 %	11.35	7.95	4.59	1.22	-2.10	-5.37	-8.56	-11.75	-14.85	

若 C 取0.4，则SO_2瞬时浓度的计算误差最小。Haugen, D. A.(1975)指出：在中性(或不稳定)层结，C值一般可取0.5。这与本文的 C 值相近。故大厂区的 C 值可取0.4。

在已知 C 值及某地点的h_t后，利用(5)式，可得中性层结时的地形修正系数(T)。

三、各模式的计算结果及分析

(一)计算方法及计算结果

分别用点源公式(G·S模式、Egan模式、SCIM模式、GCEM模式)、面源公式(ATDL模式)，算出大厂区各点源和面源在中性层结、3 个风向(NE、ENE、E)下、在 3 个监测点(三村幼儿园、南钢门口、南京气象学院水塔公园)所产生的SO_2瞬时浓度，然后将点源浓度与面源浓度相加，即得各个监测点的SO_2瞬时浓度的计算值。表 3 列出了各模式的计算值、实测浓度平均值及样本数。

(二)分析与讨论

1. 4 种模式计算结果的对比分析

G·S模式、Egan模式、SCIM模式的SO_2瞬时浓度的计算值与实测浓度平均值的相对误差的绝对平均值分别为13.76%、41.28%、16.28%，其中G·S模式的计算结果较好。G·S模式的各次计算值与实测值相比，其相对误差有正有负，这由实测值的随机性误差引起。Egan模式的各次计算值都高于实测值，其原因是它的地形修正：从(4)、(5)式知，因C＜1，故T＜1，这就起了降低有效源高度(使地面浓度增大)的作用。另外，Egan模式未考虑污染物实际还存在的化学衰减(使地面浓度减小)的作用，致使它的各次计算值均偏高。就SCIM模式言，各次计算值均小于实测值。其原因是(6)式虽考虑了污染物的化学衰减(使地面浓度降低)的作用，但未考虑山丘地形高度对地面浓度的影响。

GCEM模式的计算值与实测平均值的相对误差的绝对平均值是3.62，其计算误差小于上述 3 种模式的误差。由(9)式知，GCEM模式同时考虑了地形高度、化学衰减的影响，故从物理概念看是较合理的。

表 3　各种模式计算值与实测值的比较

测点及风向 \ 数值 \ 模式		G·S+ATDL		Egan+ATDL		SCIM+ATDL		GCEM+ATDL		实测平均值	样本数
		计算值 (μg/m³)	相对误差 (%)	计算值 (μg/m³)	相对误差 (%)	计算值 (μg/m³)	相对误差 (%)	计算值 (μg/m³)	相对误差 (%)	(μg/m³)	
三村幼儿园	NE	447.9	-9.9	773.5	55.6	374.9	-24.6	480.2	-3.3	497.0	1
(h_t=50m)	ENE	210.6	-8.0	321.2	40.3	188.1	-17.9	231.8	1.2	229.0	4
南钢门口	NE	124.3	6.5	149.6	28.2	110.6	-5.2	119.1	2.1	116.7	12
(h_t=20m)	ENE	212.5	-15.3	346.9	38.2	183.2	-27.0	227.3	-9.4	251.0	3
气象学院水塔公园 (h_t=20m)	E	218.0	29.1	243.2	44.1	157.5	-6.7	165.2	-2.1	168.8	4
相对误差的绝对平均值 (%)		13.76		41.28		16.28		3.62		/	/

2. 不同风速时GCEM/G·S模式地面轴线浓度的比值

由(3)、(10)式，用GCEM与G·S模式分别算出南京热电厂 1 号烟囱[9]的地面轴线浓度。表 4 、表 5 是地面风速$U_{10}=2m/s$与5m/s时，GCEM/G·S模式的地面轴线浓度之比值。表中x是污染源的下风方距离。由表4、表5知：①在同一 x 处，若h_t越大，则两种模式的地面轴线浓度的比值越大，表明这两种模式的计算值相差较大。②在h_t值相同时，随着离源距离的增加，两种模式的地面轴线浓度的比值渐变小。③在近污染源的一侧，GCEM模式的计算值高于G·S模式的计算值；在离开污染源较远的一侧，GCEM模式的计算值低于G·S模式的计算值。表 4 、表 5 还表明：随着风速与h_t值的增加，两种模式计算值相等的点渐渐远离污染源。

3. 不同风速时GCEM/G·S模式地面轴线浓度的相对误差

由南京热电厂 1 号烟囱的地面轴线浓度值，可求出GCEM与G·S模式的相对误差 $R\left(=\frac{GCEM-G\cdot S}{G\cdot S}\right)$（见图 1 、图 2 ）。由该两图可知，两种模式计算的相对误差随h_t及x值而异。若取R＝10%→－10%的区域认为是两种模式的计算结果较一致的区域，则从图 1、图 2 得：当$U_{10}=2m/s$、$h_t=10m$时，沿x方向在离源1 500→4 900m的范围内，两模式的计算结果较一致；当$U_{10}=5m/s$、$h_t=10m$时，沿x方向在离源1 700→10 500m的范围内，两模式的计算结果较一致。故随着地面风速的增大，两模式的计算结果相一致的区域也变大。随着地面风速的减小及h_t增大，离污染源越近，则两模式的计算误差越大。

表 4　$U_{10}=2m/s$时GCEM/G·S模式地面轴线浓度之比值

比值 h_t(m) / x(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1500	1.09	1.23	1.39	1.56	1.75	1.96	2.18	2.43	2.69	2.98
2000	1.02	1.11	1.19	1.28	1.38	1.48	1.59	1.70	1.81	1.93
2500	0.99	1.04	1.10	1.16	1.22	1.28	1.34	1.40	1.47	1.53
3000	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16	1.21	1.25	1.29	1.33
3500	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21
4000	0.92	0.95	0.97	0.99	1.02	1.04	1.06	1.09	1.11	1.13
4500	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.07
5000	0.89	0.91	0.92	0.94	0.95	0.97	0.98	1.00	1.01	1.03
5500	0.88	0.89	0.90	0.92	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99
6000	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96

表5 $U_{10}=5m/s$时GCEM/G·S模式地面轴线浓度之比值

比值 h_t(m) / x(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2500	1.03	1.08	1.14	1.20	1.26	1.33	1.39	1.46	1.52	1.59
3000	1.01	1.05	1.09	1.13	1.17	1.22	1.26	1.31	1.35	1.40
3500	0.99	1.02	1.05	1.09	1.12	1.15	1.18	1.22	1.25	1.28
4000	0.98	1.01	1.03	1.06	1.08	1.11	1.13	1.16	1.18	1.20
4500	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15
5000	0.96	0.98	1.00	1.01	1.03	1.05	1.06	1.08	1.10	1.11
5500	0.96	0.97	0.98	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.07	1.08
6000	0.95	0.96	0.97	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.06
6500	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	1.00	1.01	1.02	1.03	1.03
7000	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02
7500	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00
8000	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99
8500	0.92	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98

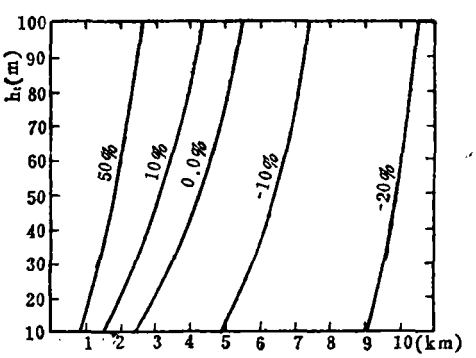

图1 $U_{10}=2m/s$，不同h_t时GCEM与G·S模式的相对误差（中性层结）

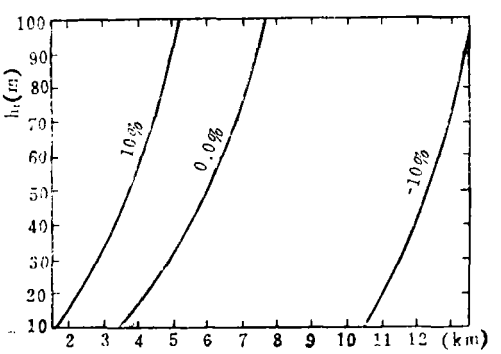

图2 $U_{10}=5m/s$，不同h_t时GCEM与G·S模式的相对误差（中性层结）

4.GCEM与G·S模式SO_2落地最大浓度距离的比较

图3中的曲线(1)是南京热电厂1号烟囱在$U_{10}=2m/s$、中性层结时用G·S模式算得的q/Q沿地面轴线分布曲线，曲线(2)、(3)分别是$h_t=10m$和50m时，用(10)式算得的同一烟囱的q/Q沿地面轴线的分布曲线。图中的横坐标是对数坐标($X=\ln x$)，纵坐标$Y=q/Q\times10^{-3}(s\cdot m^{-3})$。图中曲线(3)的峰值大于曲线(1)、(2)的峰值。这表明：$h_t=10m$

时的地形修正项对浓度的影响小于化学衰减作用项对浓度的影响，而h_t=50m时的地形修正项对浓度的影响大于化学衰减作用项对浓度的影响。由图3得：随着h_t的增加，SO_2落地最大浓度出现的距离渐向污染源靠近。图4中的曲线(1)和(2)是分别取U_{10}=2m/s和5m/s按G·S模式算得的上述烟囱在中性层结时的q/Q沿地面轴线的分布曲线，曲线(3)、(4)是分别取U_{10}=2m/s和5m/s、h_t=50m按GCEM模式算得的同一烟囱的q/Q沿地面轴线的分布曲线。从图4得：①GCEM与G·S模式的SO_2落地最大浓度都随风速的增大而向污染源靠近。例如，当地面风速从2m/s增大至5m/s时，GCEM模式的SO_2落地最大浓度的距离，从离源3 200m移至1 700m；G·S模式的SO_2落地最大浓度的距离，从离源3 500m移至2 000m。②当风速增大时，GCEM模式的落地最大浓度比G·S模式的落地最大浓度增加得更快。

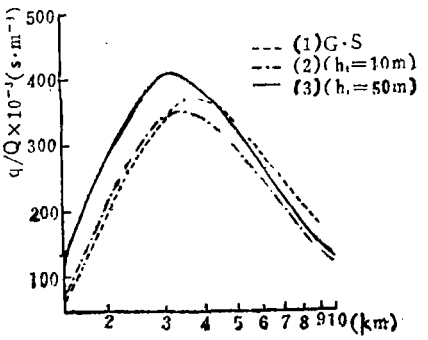

图3　不同h_t时高架源的q/Q沿地面轴线分布曲线（中性层结）

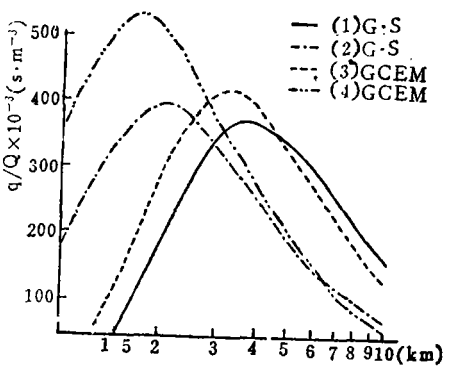

图4　不同风速时高架源的q/Q沿地面轴线分布曲线（中性层结）

四、结　　语

据本文的初步研究，可得如下结论：

(一)Egan模式的SO_2浓度计算值大于G·S模式的计算值和浓度实测值。SCIM模式的SO_2浓度计算值小于G·S模式的计算值和浓度实测值。

(二)GCEM模式的物理概念较清楚。其SO_2浓度计算值与浓度实测(平均)值的误差最小，它是计算气态污染物(如SO_2)瞬时浓度的较好公式。

(三)大厂区的烟流路径修正系数C，在中性层结时是0.4。这可供地形不太复杂的地区(城郊或乡村)参考。

(四)风速越小、h_t越大、离污染源越近则GCEM模式与G·S模式的误差越大。风速较小时，建议用GCEM模式进行浓度计算。

(五)GCEM模式的SO_2落地最大浓度的距离，要比G·S模式在同样条件下算得的SO_2落地最大浓度的距离近。随着地面风速的增大和h_t值的增加，SO_2落地最大浓度的距离渐向污染源靠近。

参考文献

[1] 北京市环境保护科学研究所编，大气污染防治手册，401—407，上海科学技术出版社，1987。

[2] Joint conference on applications of air pollutions meteorology,196—203, American Meteorological Society,1977.

[3] Houghton,D.D.,Handbook of Applied Meteorology,727—729,734—735,1985.

[4] Rosenblum,H.S. et al.,Adaptation of Gaussian plume model to incorporate multiple station data input,U.S.Environmental Protection Agency,Vol.1,2.22—2.24, 1975.

[5] Second joint conference on applications of air pollution meteorology and second conference on industrial meteorology,446,American Meteorological Society,1980.

[6] Hanna,S.R. et al.,Handbook on Atmospheric Diffusion,59—61, U.S.Department of Energy,1982.

[7] 南京气象学院扬子乙烯工程大气环境影响评价课题组，南京大厂区大气污染物的浓度分布，南京气象学院学报，1988,3,25—39。

[8] 沈觉成等，若干烟云抬升公式的对比分析，南京气象学院学报，1986,2,173—179。

[9] 曹文俊、朱汶，微风时局地大气扩散及SO_2浓度分布的初步研究，南京气象学院学报，1988，9，335—345。

A STUDY OF SEVERAL POINT SOURCE DIFFUSION MODELS

Cao Wenjun Zhu Wen

ABSTRACT

The SO_2 instantaneous concentration in the Dachang district of Nanjing under neutral conditions is calculated by using the Gaussian (normal) model, the Egan model, the SCIM model and the GCEM model. The results from calculation are compared with the observational data. It is found that the GCEM model for which the terms of topography revision and chemical decay have been taken into account works well and its calculated values are consistent with recorded concentrations.