

下的颗粒中粗粒占 47%，细粒占 53%。

2. 北京大气颗粒物的质量-粒度分布一般呈正态分布 ($<7\mu\text{m}$ 以下的颗粒物)。在其他条件下亦会有对数正态分布出现。

3. 北京颗粒物的质量中值直径 (MMD) 在可吸入颗粒 ($<7\mu\text{m}$ 以下) 部分中一般为 $2\mu\text{m}$ 左右, 对人体健康影响较大, 值得引起重视。

4. 颗粒物的模态 (mode) 呈典型的城市双模态 (或双峰型)。粗粒模在城区郊区均较明显而突出, 积聚模在有人为污染较重的地区较为明显。

综上所述, 北京大气颗粒物中对人体健康危害较大的粒度其含量是相当高的, 因此, 有必要在降低环境中总悬浮颗粒物 (TSP) 的

同时, 还需要注意对可吸入颗粒物的防治与控制。目前首先要普遍加强对可吸入颗粒的监测与分析, 并进一步对其化学组分、生物效应进行综合研究。

本工作中葛继荣、马慈光、王庆广等同志参加了采样, 特此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] National Research Council of the National Academy of Sciences, *Airborne Particle*, pp. 1-19, pp. 107-146, University Park Press, Baltimore, Maryland 21202, U.S.A. 1979.
- [2] 曹守仁, 环境保护, 7, 21(1982).
- [3] 汪安璞等, 环境科学学报, 1(3)220(1981).
- [4] Whitby, K. T., *Atmos, Environ.* 13, 123(1979).
- [5] 汪安璞等, 环境化学, 2(6)25(1983).

烟囱高度和夜间城市热岛效应对 污染物输送和扩散的影响

叶 卓 佳

(中国科学院大气物理所)

一、引 言

人口的发展和工业密集的城市, 增加了地面粗糙度及热排放量, 形成城市热岛环流。周明煜等^[1,2]根据北京地区台站资料研究北京市城市边界层结构。本文以输送扩散方程, 通过积分边界层控制方程组, 得到城市热岛和中尺度城市热岛环流。由此产生的气象要素场作为输送扩散方程所需的气象场, 去模拟计算在城市条件下污染物的输送和扩散; 用一维热动力学边界层方程组的数值模拟, 得到水平均匀地面条件的气象场, 由这些气象场输入到扩散方程中计算水平均匀条件下污染物输送和扩散。比较两者结果可研究

城市对污染物输送和扩散的影响。通过改变源高去研究源高对污染物输送和扩散影响。由于稳定夜间边界层是造成严重的污染的气象条件, 本文只研究小风条件下夜间边界层。

二、模式方程

描述烟羽状态的非定常、非线性方程为:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + Q \quad (1)$$

其中 \bar{c} 为浓度, Q 为源强, 以单位长度表示 (当 Q 为点源时, 则 \bar{c} 为横向积分浓度: $\int c dy$)。 u , w 和 k_x , k_z 分别为风速和涡旋扩

散系数在 x 和 z 方向的分量，它们的数值由边界层方程组的数值计算提供。

假定空气是干燥的和不可压缩的，忽略分子粘性和辐射效应，取 x 轴与地转风同向， z 轴垂直地面向上。当城市纵向尺度 L_x 与横向尺度 L_y 之比满足 $L_y/L_x = 10|V|/|U|$ ，其中 $|U|$ 和 $|V|$ 分别为 x 和 y 方向的速度尺度。则经过城市中心与地转风平行剖面 ($x-z$ 剖面) 的气象要素场的发展演变可以用二维非线性、非定常边界层方程组描述：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} + fv \\ &\quad - c_p \theta \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial u}{\partial x} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &\quad + f(u_g - u) + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial v}{\partial x} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= -\frac{g}{c_p \theta} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

其中 P 为无量纲压力， $P = (P/P_0)^{R/c_p}$ ， $c_p = 1004.6(\text{m}^2/\text{k} \cdot \text{s})$ ， θ 为位温， $\theta = T/P$ ，

$$k_x = l^2 S_w \begin{cases} (1 - \alpha R_i) & \text{当 } R_i < 0 \\ (1 + \alpha R_i) & \text{当 } R_i \geq 0 \end{cases}$$

$$S_w = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$R_i = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta / \partial z}{S_w^2}$$

$$l = k(z + z_0) / [1 + (k(z + z_0) / \lambda)^{3/4}]$$

$$k_x = 10k_z$$

式中 λ 为混合长 l 达到最大值的高度， z_0 为地面粗糙度长度， k 为卡门常数，其它符号具有通常意义。

模式计算水平范围为 21km，其中城市尺度 $L_x = 18\text{km}$ 。水平网格距为 600m。模式计算高度为 1.5km，分 30 个网格，网格距随高度按对数-线性规律分布。

方程(1)所有边界条件取为 $\frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} = 0$ ， ξ 为 x 或 z 。初始条件 $\bar{c} = 0$ 。

方程组(2)的边界条件规定如下：假设郊区下垫面为水平均匀的，则入流横边界 ($x = 0$) 的气象要素场随时间变化由一维方程组支配：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= fv + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= f(u_g - u) + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \\ w &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

出流(下游)横边界为： $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$ ， ϕ 为 $u, v,$

θ 。顶部边界条件： $u = u_g, v = v_g = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, P = \text{常数}$ 。地面边界条件： $u = v = 0,$

$$\theta(x, 0, t) = \theta(x, 0, t - \Delta t)$$

$$- A(x, t) \Delta t$$

其中 $A(x, t)$ 为地面降温率，它随 x, t 变化。

方程组(2)的初始条件为在中性层结大气 ($\theta = \text{常数}$) 状态下方程组(2)的定常解，代表日落前后的大气状态。

现规定，当方程(1)的气象参数由方程组(3)提供时，方程(1)描述了在水平均匀下垫面条件下输送和扩散，下称“均匀郊区型”；当方程(1)所需气象参数由方程组(2)提供时，方程(1)描述了水平不均匀的城市边界层条件下污染物的输送和扩散。下称“城市型”。

三、数值计算结果

这里主要介绍一个小风例子： $u_g = 4\text{m/s}$, z_0 , 郊区为 0.1m , 市中心为 0.4m , 城市其余地区由这两个值的线性内插得到. $A(x, t)$ 为: 在城市上、下游边界和郊区, 在降温后的前 8 小时 $A = 1.5^\circ\text{K/h}$, 在 8 小时后, A 值为前 1 小时的 $\frac{3}{4}$; 城市中心降温率为边界值的一半, 城市其余地方降温率由这两个值线性内插得到. 源位于 $x = 1.2\text{km}$, z 分别位于 37m , 195m 和 310m . 源强为 100 单位/ s . 计算的浓度场为相对浓度, 是源强的百分数.

图 1 为 $t = 12\text{h}$, 源高为 37m 浓度剖面图. 图中表明不管是城市型或是郊区均匀型, 污染物的分布都呈现为从源强烈地向地面扩散的特征, 这是边界层风速垂直切变造成的, 下文将讨论这个问题. 值得注意的是: 城市型的污染物输送和扩散在水平和垂直范围都

比均匀郊区型大. 例如 10% 的等值线, 在离源距离 1.8km 范围内几乎是一致的, 在离源下风方向 2.4km 以远差别越来越大. 图中还表明, 浓度的水平和垂直梯度, 城市型比郊区均匀型小, 即城市有利于污染物的扩散. 最大接地浓度, 城市型位于离源下游 1.8km , 郊区均匀型位于源下游 2.4km . 城市作用使高架源最大接地浓度离源距离缩短. 图 1 还表明一个重要现象: 浓度的垂直分布并非对称正态的. 因而使用高斯模式计算烟羽垂直分布必然引入较大误差. 下文将讨论造成浓度在垂直方向分布非对称正态的原因.

下面从城郊边界层结构变化解释城市型和郊区均匀型浓度分布的差别.

图 2 为 $t = 12\text{h}$ 时 ΔT (城市上空温度与上游边界上同高度温度差) 剖面图. 城市上空由一暖空气层覆盖着, 暖轴中心底部在市中心; 随着高度增加, 由于平流效应使暖轴向市中心下风方向偏移. 此即为城市热岛的

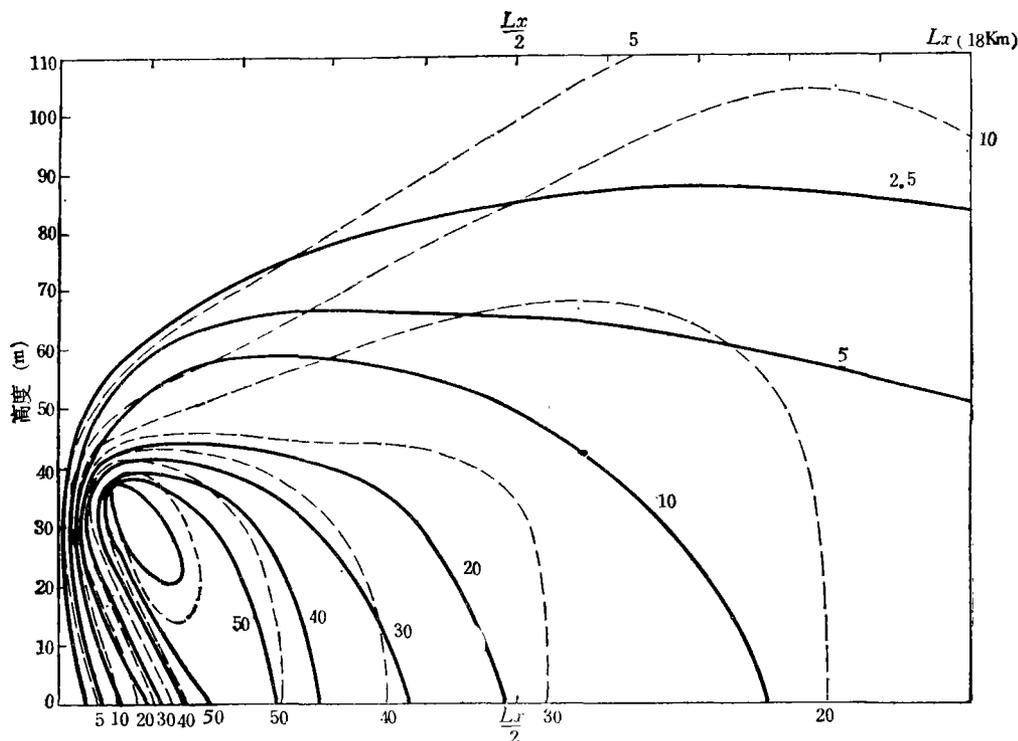


图 1 $t = 12\text{h}$ 源高为 37m , 源强为 100 单位/ s 的浓度剖面图, 图中实线为郊区均匀型, 虚线为城市型

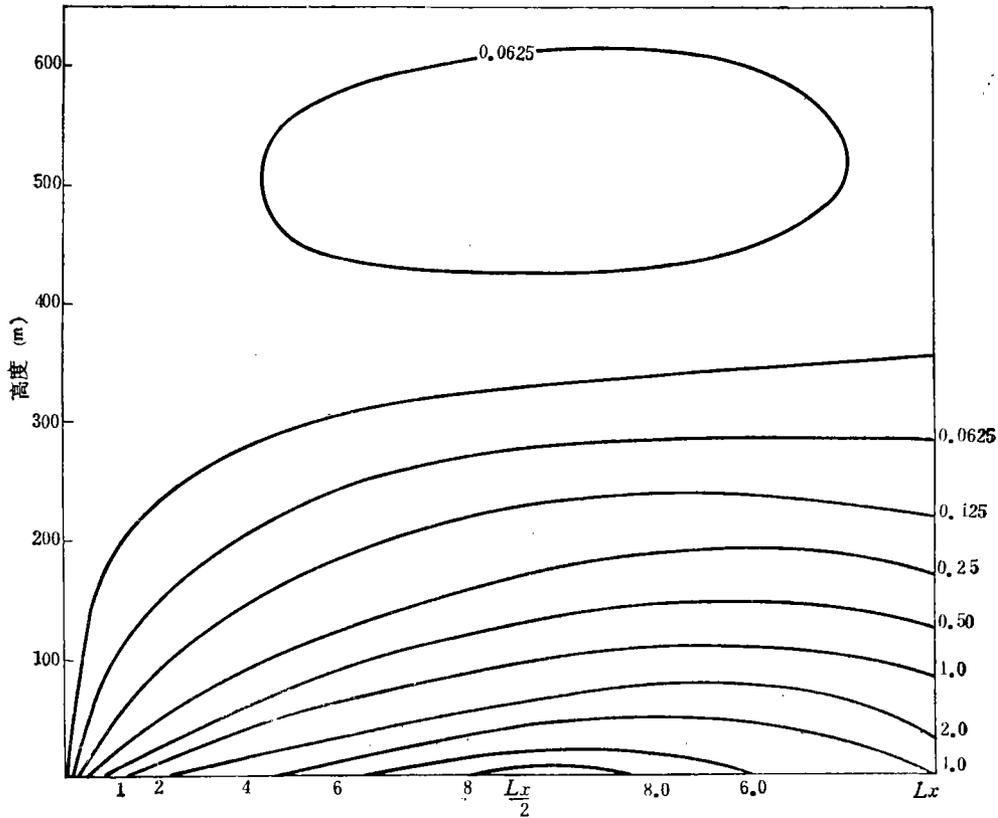


图 2 $t = 12h$ ΔT 剖面图,单位 $^{\circ}K$

空间结构。在热岛上方有一个 $\Delta T < 0$ 的区域,最大值位于 500m 高度附近。城市热岛的存在,使城市上空低层存在从两边界指向市中心,高层从市中心指向两边界的斜压力,在该斜压力的作用下,在城市中心上、下风向各形成一个方向相反的城市热岛环流,环流在城市中心低层辐合,上层辐散,形成上升运动区。

图 3 为 $t = 12h$ 数值模拟计算得到的 u' (城市上空风速与同高度上游边界处风速差)和 w 值在 $x = 0 - L_x/2$ 的风速矢量图。图中表明了一个清楚的城市热岛环流。当郊区空气流入城市上空后,风速在城市上空发生复杂的变化。城市上空风速是郊区风速与城市热岛环流风速的迭加。由于城市热岛效应和城市对风场改变,使城市上空大气稳定

度参数 R_i (图 4 中用实线表示) 和垂直涡旋扩散参数 k_z (图 4 虚线) 与郊区相比,发生明显变化。图 4 表明,城市上空大气稳定度明显减弱,甚至在市中心附近、7—10m 高度以下存在 $R_i < 0$ 的不稳定层结。但这个高度以上城市上空仍为稳定层结。文献 [3] 根据直升飞机和桅杆测量资料指出:除地面附近外,城市上空温度层结仍表现为弱的稳定层结。这个观测结果与我们的数值模拟结果是一致的。 k_z 的空间分布说明,从郊区到城市, k_z 显著增大。例如,在 $z = 110m$, 市中心 k_z 值比上游郊区值约增大 60%, 在 $z = 10m$ 则增大达 2.8 倍。

以上分析说明,在城市热岛和热岛环流的作用下,城市的热力和动力作用使城市上空大气稳定度减弱,涡旋扩散系数增大。从

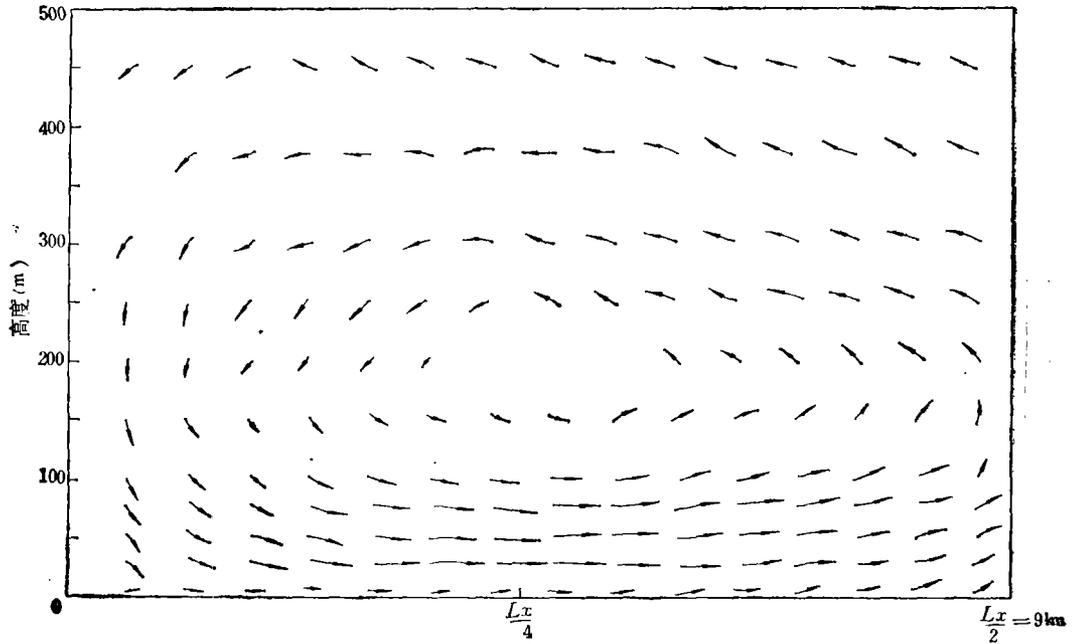


图3 $t = 12\text{h}$ 的 u' 和 w 合成风速矢量在 $x = 0 \sim L_x/2$ 剖面图. 图中 1cm 代表 80.0 m/s

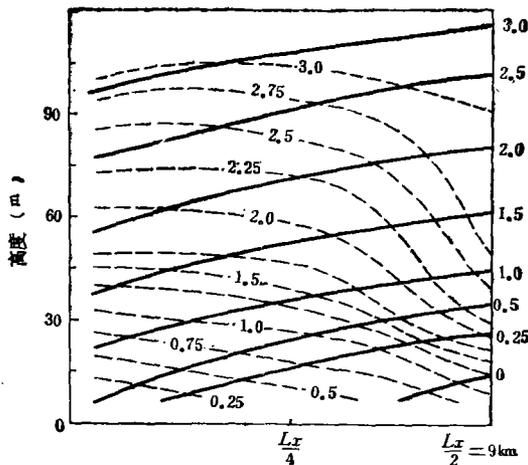


图4 $t = 12\text{h}$ 的 Ri (实线) 和 k_z (虚线) 在 $x = 0 \sim L_x/2$ 剖面图

而造成城市型和郊区均匀型扩散的显著差异。

数值模拟计算表明,城市型和郊区均匀型差异是随城市热岛和热岛环流的发展而增大的.表1列举了最大热岛环流风速 u'_{\max} ,热岛环流高度 H_1 ,市中心和郊区在 $z = 2\text{m}$ 的温差 ΔT (它表征热岛强度),城市型和郊

区均匀型最大接地浓度离源距离,在高度为 10m 处的 R_i 值等要素随时间的演变.表1说明,热岛环流风速及其伸展高度随热岛强度 ΔT 的增大而增大.与此同时,城市型和郊区均匀型的地面浓度差别也随城市热岛环流发展而增大,如表2所示.表1还表明,当城市热岛环流较弱时(前四小时),两种“型”的最大接地浓度离源距离并无明显差别.只是当城市热岛发展到一定强度以后,城市型的最大接地浓度离源距离才表现出比郊区均匀型距离的明显缩短.表1还表明,最大接地浓度离源距离随稳定度的增大而增大。

计算还表明,源高对污染物的输送和扩散特性有重要影响.图5为城市型不同源高的浓度分布图($t = 1\text{h}$).计算表明,源高从 37m 分别增加到 195m 和 310m,最大接地点浓度离源距离分别为 600m, 6600m 和 7800 m.最大接地浓度离源距离随源高增加而增大.源高增加一倍,最大接地浓度离源距离增大 1.6—2.2 倍.最大接地浓度随源增高而减小.源高从 37m 增加到 195m 和

表 1 城市型和郊区均匀型随热岛环流的变化

时间 (h)		2	4	6	8	10	12
u'_{max} (cm/s)		14	22	30	50	66	74
H_1 (m)		190	250	320	370	420	550
ΔT ($^{\circ}K$)		1.7	3.3	5.0	6.8	8.6	8.7
最大接地浓度离源的距离 (m)	城	600	1200	1800	1800	1800	1800
	郊	600	1200	1800—2400	2400	2400	2400
$R_1(z = 10m)$	城	0.102	0.164	0.202	0.237	0.250	0.250
	郊	0.159	0.231	0.269	0.303	0.309	0.311

表 2 地面浓度在不同时间“城”市型和“郊”区均匀型的对比

离源距离 (km)		0	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2	14.4	15.6	16.8	18
4h	城	26	57	48	34	24	18	14	11.3	9.0	7.1	5.5	4.2	3.3	2.8	2.4	2.0
	郊	23	53	47	34	24	17	13	9.8	7.8	6.3	5.1	4.0	2.2	1.5	1.3	1.0
8h	城	17	53	56	48	40	34	30	27	25	24	22	19	18	16	13	11
	郊	16	49	51	42	32	24	19	15	14	13	11	9	8	7	7	6
12h	城	16	51	57	49	42	37	33	30	27	25	24	23	20	18	16	14
	郊	15	47	52	44	34	27	22	18	15	13	12	10	9	8	7	6

310m, 最大接地浓度从 56.8% 减小为 27.8% 和 3.9%, 源高与最大地面浓度间并非简单的反比关系, 当源高增加四倍, 该浓度减小一半。但当源高增加七倍, 该浓度减小发生量级变化。

除此之外, 图 5 还表明, 不同的源高, 污染物分布呈不同的状态。源高为 310m, 烟羽有明显的烟轴, 它为与源同高的一条水平直线, 浓度分布几乎为轴对称的。当源高在 195m 以下时, 浓度分布发生明显的变化。污染物从源明显地向地面扩散, 结果浓度垂直分布成非对称状态。我们分别计算了三个源高处的局地风切变及源高至地面的层风切变 $(\frac{\partial u}{\partial z})$, 源高从高到低排列, 它们分别为: 前者 0.0027/s, 0.044/s 和 0.022/s, 后者 0.011/s, 0.016/s 和 0.050/s。由此表明, 垂直风切变强弱是控制污染物垂直扩散的重要机制。当垂

直风速切变很弱时, 烟轴呈水平分布, 浓度在垂直方向几乎以烟轴成轴对称分布; 当垂直风切变增强时, 它引起污染物明显地向地面扩散, 污染物在垂直方向严重偏离对称分布。由此可得出结论: 在风速垂直切变较强时, 应用高斯模式必然产生较严重误差。

四、结 论

通过以上分析研究, 可以得到如下三点结论:

1. 城市粗糙下垫面、城市热岛和城市热岛环流是造成烟羽在城市上空输送扩散特性不同于平坦均匀郊区的原因。城市的作用, 使烟羽在水平和垂直方向扩散增强, 浓度分布趋于均匀, 烟羽最大接地浓度离源距离减小。

2. 在城市边界层中, 最大接地浓度离源距离随源高增高而增大, 源高增加一倍, 距离

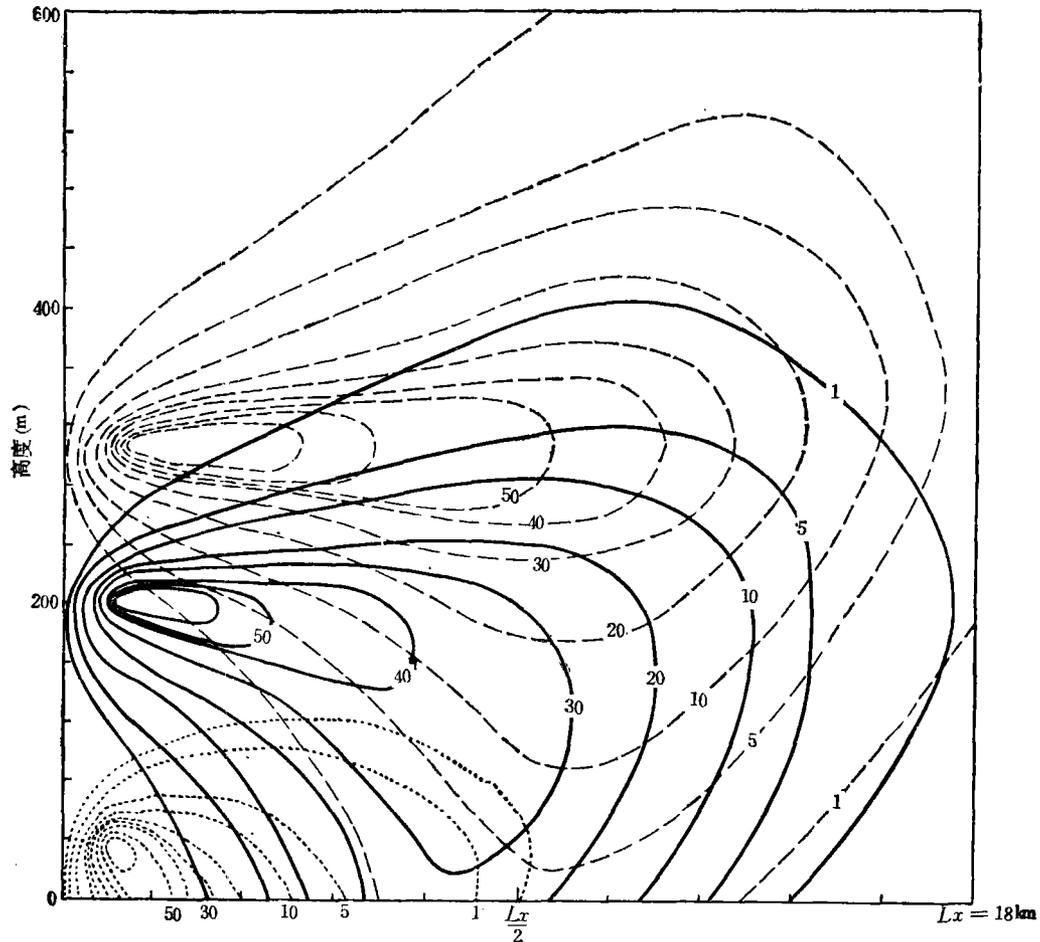


图 5 浓度分布与源高关系。虚线为 310m, 实线为 195m, 点线为 37m

增大 1.6—2.2 倍; 最大接地浓度随源高增高而减小, 并呈现显著的非线性关系。

3. 风切变强弱是影响烟羽的输送和扩散的重要机制, 当风速垂直切变小时, 烟羽的烟轴为水平分布, 浓度在垂直方向几乎是以烟轴为轴对称分布的。当垂直风切变较大时, 它会引起污染物显著地向地面扩散, 形成最大接地浓度, 污染物的垂直分布严重地偏离

对称分布。因而, 在这种条件下使用以对称正态分布为基础的高斯模式去估算垂直方向浓度分布是不合适的。

参 考 文 献

- (上接第47页)
- [9] Heggstad, H. E., *J. Air Pollut. Control. Assoc.*, **11**, 691—694 (1966).
 - [10] Allen S. Heagle, *Environ. Pollut.*, **19**, 1—10 (1979).
 - [11] Dugger, W. M. et al., *A. Rev. Pl. Physiol.*, **21**, 214—234 (1970).
 - [12] Koziol, M. J., *Exp. Bot.*, **29**, 1037—1043 (1978).
 - [13] Manafield, T. A., *Effects of Air pollutants on plants*, Soc. Exp. Biol. Semin. Ser. 1 Cambridge University Press, Cambridge, pp. 105—114, 1976.