

# 城市热岛效应对污染物扩散 规律影响的数值模拟

苗 曼 倩

(南京大学大气科学系)

## 提 要

用一个二维非定常扩散方程模拟了夜间城市边界层中三种不同有效高度(20m, 72m 和 110m)连续线源所产生的污染物浓度分布特征.数值试验结果表明:不管是否出现热岛环流,城市热岛效应使高架源产生的地面浓度增大,而使近地面源所产生的地面浓度减小.这是因为城市下垫面的热力和动力作用改变了一般的边界层低层的温度结构和湍流结构所致.

**关键词:** 数值模拟; 热岛效应; 污染物扩散

## 一、引 言

最近, Smith<sup>[1]</sup>对当前用于空气质量的 10 个扩散模式作了评价,其结论是这些模式都不令人满意.并建议在今后 10 到 20 年,应探索新的模式,使之能反映出大气边界层中湍流和扩散结构的最新知识.

空气污染物扩散和输送的数值模拟研究必须要有很好的边界层动力学模式与之配合.为此,我们的工作,首先选择有实际意义的城市下垫面,建立能真实地模拟城市边界层风、温场和湍流结构特征的气象场模式(见文献[2]).然后,考察在这样的气象条件下,空气污染分布将与周围乡村有何不同,这对改善城市空气质量是有参考价值的.

在一些文章或著作中,都提到由于城市热岛局地环流的存在,城市上空污染物随局地环流向四周分散,然后在乡村上空下沉至地面附近,又随地面空气而向市中心辐合,造成市区地面浓度增加.我们认为,除了地处山谷内的城市,全年静风频率不会很高.为不失一般性,我们选用常州市常见的地面地转风速  $6.5\text{m/s}$ ,有明显的低空急流出现的典型气象背景.以这样的气象条件下 17 时实测资料为初值输入,试验城市热岛效应对气象场和市区空气质量的影响,这也是本工作与其它有关城市热岛研究<sup>[3-7]</sup>的不同之处.

在方程组闭合方面,本文采用 EK 闭合方法作为对以往这方面工作的改进.所谓 EK 闭合,即在方程组中引进湍流能量变率方程和湍能与湍流交换系数关系式,使方程组封闭.这是因为考虑到平均流场与湍流脉动场并非始终处于相互平衡的状态,避开运用一些现成的  $K$  公式,而直接引用湍流能量变率方程,就可以反映这种不平衡.这对研究非定

1988 年 3 月 25 日收到, 7 月 14 日收到修改稿.

常问题尤为重要的.模拟结果与实测结果作了一些比较,证明气象场的模拟是可行的(详见文献[2]).

## 二、方 法

用二维原始方程描写大气边界层结构及其演变,其控制方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= f v + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -f u + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial v}{\partial z}, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} - R, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

方程中已经假定各物理量的湍流交换系数相同.式中  $R$  是辐射冷却率,采用 Sasamori<sup>[8]</sup> (1972) 方法,公式中其余符号都是通常所用的.然后引进能量变率方程

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + w \frac{\partial e}{\partial z} = K_x \left( S v^2 - \alpha_H \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \alpha_2 \left( \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial e}{\partial x} \right) - \varepsilon, \quad (2)$$

这里,

$$\begin{aligned} K_z &= C_0 l \sqrt{e}, \\ \alpha_H &= \frac{K_H}{K_z} \approx 1, \quad C_0 = 0.46, \quad \alpha_2 = 1.2. \end{aligned} \quad (3)$$

这样,只要知道混合长  $l$  随高度的变化,方程组闭合.(2)式中的湍流能量耗散  $\varepsilon = C_3 e^{3/2} / l$ ,  $C_3 = 0.2$ .关于以上这些参数的选取和初始及边界条件,这里不作详细叙述(见文献[2]).

一个均匀排放的侧风向连续线源所释放的污染物时空分布,是用二维扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4)$$

描写,其中  $C$  是浓度,它是  $x, z$  和  $t$  的函数.本模式模拟的范围:水平向 15km,垂直向 1.5km.在城区上风边缘(距热岛中心 5km 处)设有一个污染源.污染源的有效高度分别为近地面源(20m)、72m 和 110m(以下分别简称为地面源、72m 源和 110m 源)三种情况.将(4)式与气象场的方程组联立求数值解,并定性地分析热岛效应的影响.

初始时刻假定空间是清洁的,即  $C(x, z, 0) = 0$ , 边界条件如下:

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad z = 0 \text{ 或 } z = h, \quad (5)$$

其中  $h$  为边界层的高度,本文中定义当  $K_z \rightarrow 0$  的高度为边界层的高度,并假定源的强度  $Q_s$  满足以下关系式

$$C|_{x=0} = \frac{Q_s}{u \Delta z} \delta(z - h_s) = 1 \text{ mg/m}^3,$$

式中  $h_s$  为有效源高,  $\delta(z - h_s)$  是一个  $\delta$  函数,  $u$  是源高处风速.

所用的差分格式:时间微分用向前差分近似;二阶空间微分采用 Crank-Nicolson 六点格式(与气象场相同)。这样,平流项恰好是上游差分,差分方程求解采用隐式格式。

### 三、数值试验结果

关于气象场的模拟结果,这里不一一列举,须指出的是,模式计算中,我们把城市上空的空气运动看作由两部分组成:一是基本流动,它来自城市上风向乡村上空的气流,也就是大尺度天气背景的流动,假定它处于水平均匀的正压状态;二是当空气进入城区,因下垫面、热力作用而引起的扰动运动,而城市上空的流场是这两个流场的叠加。当热岛强度达  $4.0^{\circ}\text{C}$  以上时,扰动场出现热岛环流,但它与背景场叠加后,城市上空的流动类似过山气流而呈波动状(见文献[2])。那么,在这种情况下城区地面浓度是否还高于周围乡村的?在回答该问题之前,有必要阐述一些与污染物扩散有关的气象特征。

以下所引用的结果均为热岛强度为  $4.5^{\circ}\text{C}$ ,地面地转风速为  $6.5\text{m/s}$  的计算结果。

试验结果表明,城-乡间地面温差可以通过湍流交换垂直向上传递,故城区内地面到  $120\text{m}$  范围内为暖空气覆盖。因本模式包括有平流作用,所以城-乡温差等值线是倾斜的:暖轴由热岛中心开始随高度增加而向下风向倾斜。在城区  $120\text{m}$  以上出现负的温度扰动区,这与纽约市的观测结果吻合<sup>[9]</sup>。梯度理查孙数  $Ri$  的低值中心位于热岛中心,而上游侧边界  $100\text{m}$  高度出现一个高值区(图略),是因为城市下垫面效应还未传递到该高度,那里仍保持着来流的较稳定层结。另一高值出现于下风侧效区上方约  $50\text{m}$  高度处,说明市区平流过来的暖空气遇到了较冷的下垫面,使地面附近逆温加强,层结更趋稳定。

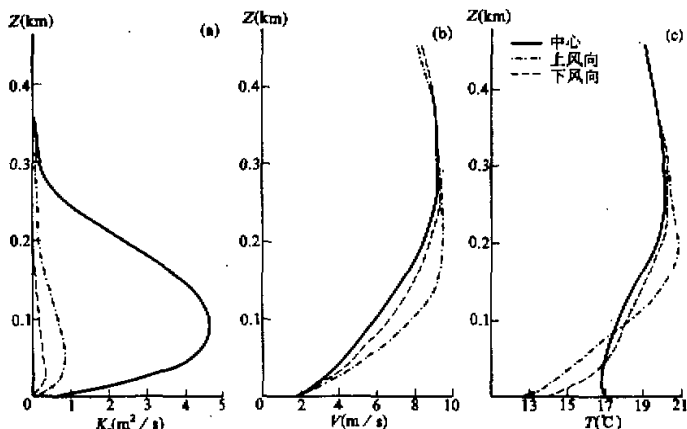


图1 城区不同位置上  $K_z$  值,平均水平风速,气温随高度的分布

城市热岛对大气边界层下部气象要素和湍流特征的影响见图1。我们用上风向侧边界的气象要素分布表征来流的基本状态。对同一时刻位于城区不同位置上的水平风速、温度和垂直向湍流交换系数  $K_z$  的铅直分布作一比较。图1(c)是城市中心和下游的温度廓线与来流的温度廓线的比较。可见位于中心处的地面逆温近于消失,而下风侧地面附近逆温比上风侧强些,这和上述的  $\Delta T$  分布是一致的。由此城市不同位置上湍流交换能力的强弱



上述这些污染气象特征无疑对城市上空污染物扩散有影响,本文用以上对气象场的模拟结果来研究连续线源扩散的性状及其随时间的演变.

三种不同高度的污染源之污染浓度的时空分布分别由图 3、4 和 5 给出,并对存在热岛效应(图中左边)和不存在热岛效应(图中右边)两种情况作了对比,图 5 与图 3、4 比较,清楚看出城市热岛效应对近地面源和高架源的影响是不同的,热岛效应使近地面源所造成的地面污染浓度减小,这种减小以热岛中心最明显,数量是无热岛效应时地面浓度的  $1/2$  左右.原因很简单,城—乡温差出现,改变了层结稳定度使湍流扩散交换增强,又由于逆温层高度增高扩大了污染物垂直扩散范围,对于地面源而言,显然有更多的污染物向上扩散而被稀释,则地面浓度相应减小.此外热岛效应使浓度轴线向上翘起的程度也有所加大.

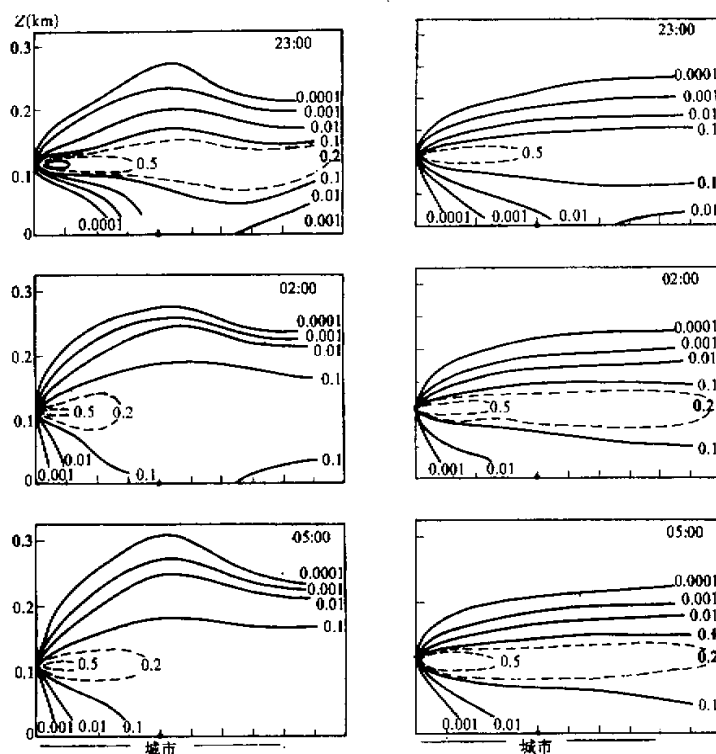


图 3 110m 源释放的污染浓度分布剖面图

但是,对高架源而言,热岛效应总是使地面浓度增加,而且 110m 源比 72m 源更为明显.对于城区热岛中心和下风侧,其地面浓度可以有量级上的差别(图 3 中 02:00 和 05:00 的状况所示),无热岛效应时,  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$  的等值线是不接地的,热岛效应使它变成接地了,这种现象 72m 源(见图 4)不如 110m 源明显.高架源地面浓度加大的原因可能是夜间稳定边界层内高架源排放的污染物,本应当集中在烟羽高度附近,而现在热岛效应使烟羽到地面范围内湍流交换增强,垂直向扩散加大,于是有更多污染物接地.显然,源高越高,这种现象越明显.当然这只是对于源高低于逆温层的源而言.

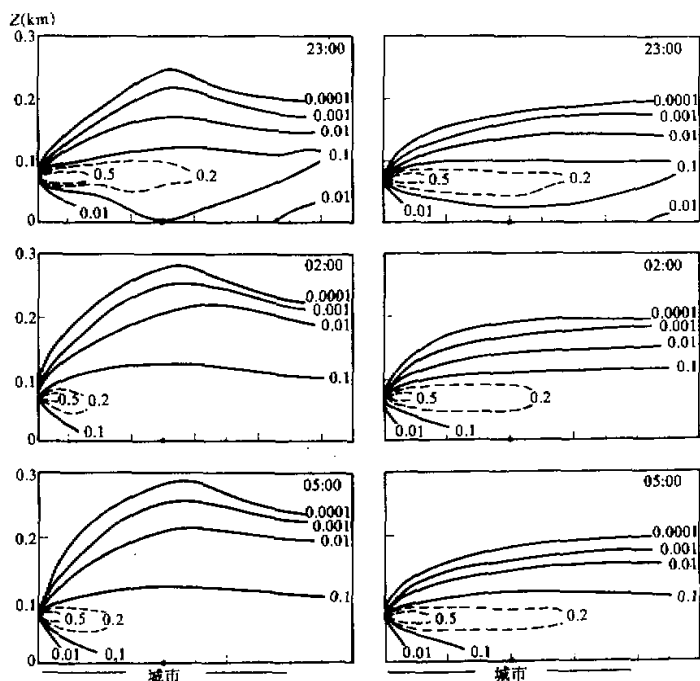


图 4 72m 源释放的污染浓度分布剖面图

尽管如此, 110m 源对地面造成的污染还是低于 72m 源, 以 02:00 为例, 即使当热岛效应不存在时, 72m 源造成城区大部分地方的地面浓度量级为  $10^{-1}\text{mg}/\text{m}^3$ , 而 110m 源, 有热岛影响时, 地面浓度虽增大了, 但除了中心及其下风侧邻近区达  $10^{-1}\text{mg}/\text{m}^3$  外, 其余地方仍是  $10^{-2}\text{mg}/\text{m}^3$  量级. 所以在城市中适当提高烟囱的高度仍是必要的.

从图 3, 4 和 5 可见最上面的浓度等值线的形状与逆温层高度分布 (见表 1) 是很一致的. 城区逆温层高度被抬高而浓度等值线在热岛中心附近也向上隆起. 前面曾说过, 在浓度计算中, 定义  $K_z \rightarrow 0$  的高度为边界层高度. 浓度分布的上界和计算的逆温高度如此一致, 既符合“污染物不会穿过逆温层而扩散”的物理事实, 也说明本模式的合理性.

图 4 和 5 还表明, 烟羽轴线高度上污染浓度因热岛效应而降低, 这必然会影响到日出后熏烟过程的浓度分布.

图 6(a), (b), (c) 分别表示 110m, 72m 和近地面源所造成的地面浓度随距离 (离源所在位置的) 的分布, 更清楚地看出地面源和高架源受城市热岛影响所造成的后果是不同的. 图 6 中字母 A, B, C 所在位置分别代表热岛存在时 23:00, 02:00 和 05:00 最大地面浓度出现的位置. 无热岛效应情况则用 A', B', C' 表示. 可见, 城市热岛出现使高架源的最大落地浓度位置向源所在位置移动, 如 110m 源, 最大落地浓度位置从郊区移到了市中心附近. 注意 02:00 和 05:00 两时刻, 将图 6(a) 中实线 (存在热岛效应) 与 (b) 中虚线 (不存在热岛效应) 比较, 两者峰值大小差不多. 换言之, 110m 源释放的污染物即使有热岛效应

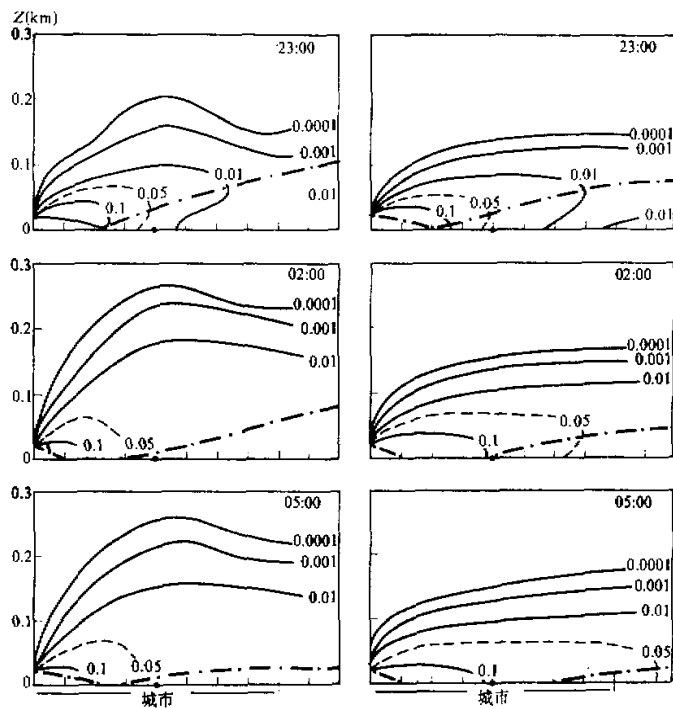


图5 近地面源释放的污染浓度分布剖面图

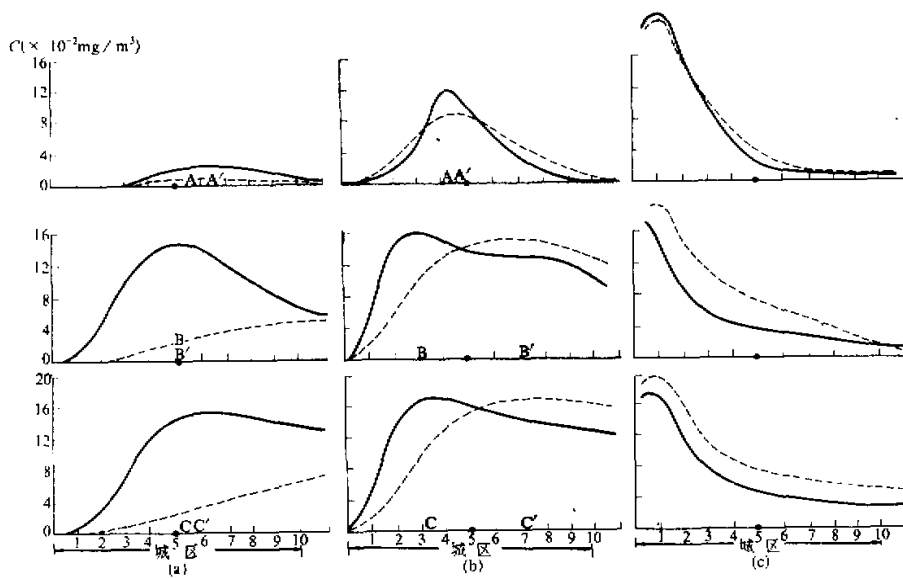


图6 地面浓度随距离的变化,实(虚)线代表有(无)热岛效应的状况

影响也不会明显超出无热岛效应条件下 72m 源产生的地面浓度。

对于不同时刻热岛中心位置上,污染浓度垂直分布可以发现城市热岛的热力作用使污染物的垂直分布均匀化。模式计算还表明,污染物浓度的垂直向分布是偏离正态分布的。这种偏离将随着源高的增高而减小(图略)。然而,热岛效应会使这种偏离正态分布的程度加剧。以上这些特征将随热岛强度的增加而变得更明显。

#### 四、结 语

(1) 为不失一般性,本文气象场模拟中,初始值与边界值均以实测资料为依据;基本流场的水平风速有垂直切变,扰动场考虑了水平平流,随着夜间稳定层结的维持,在惯性振荡作用下于 05:00 出现了低空急流,这些特征是平原地区经常观测到的。相反地,出现微风或静风的概率不一定多,用这样的夜间城市边界层模式与扩散方程联立求解而得到的结论是具有实际参考价值的。

(2) 用 EK 闭合,使湍流脉动场和平均场之间不断相互调整。这对用非定常模式预测气象场和浓度场是更合适的。

(3) 本文揭示了在城市中影响空气质量的基本原因是城市下垫面的热力作用。设法减小城—乡之间的温差(例如城市绿化等措施),可以改善城区夜间的空气质量。

(4) 本文中,浓度扩散方程中平流项的离散方法与运动方程一致(即用上游差分),会造成一定的伪扩散误差。如果要作为预报模式使用,须对平流项的格式作一定的修改。

以上这些结论尚待进一步以更多的实测结果证实。

#### 参 考 文 献

- [1] Smith, M. E., 1984, Review of the attributes and performance of 10 rural diffusion models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **65**, 554–558.
- [2] Miao Manqian, 1987, Numerical modeling of the nocturnal PBL over the urban heat island in Changzhou City, *Bound. Layer Meteor.*, **41**, 41–56.
- [3] Olfo, D. B. and R. L. Lee, 1971, Linearized calculation of heat island convection effects, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1374–1388.
- [4] McElroy, J. L., 1973, A numerical study of the nocturnal heat island over a medium-sized mid-latitude city (Columbus, Ohio), *Boundary Layer Meteor.*, **3**, 442–453.
- [5] Delage, V. and T. A. Taylor, 1970, Numerical studies of heat island circulations, *Boundary Layer Meteor.*, **1**, 201–226.
- [6] Bornstein, R. D., 1975, The two-dimensional URBMT urban boundary layer model, *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1459–1477.
- [7] 叶卓佳等, 1986, 夜间城市边界层发展的数值模拟, *大气科学*, 第10卷, 第1期, 80–88.
- [8] Sasamori, T., 1972, A linear harmonic analysis of atmospheric motion with radiative dissipation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 505–517.
- [9] Bornstein, R. D., 1968, Observations of the urban island effect in New York City, *J. Appl. Meteor.*, **7**, 575–582.