

北京地区严重污染状况下的 大气边界层结构与参数研究

殷达中 洪钟祥

(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 利用北京 325 m 铁塔资料对出现在 1998 年 9 月 26~30 日的一次严重污染过程的边界层结构和决定大气污染物扩散稀释的边界层参数作了分析和研究。分析发现, 这段时间边界层稳定层结占绝大多数, 白天在近地面的不稳定层结上还有逆温盖, 另外在此期间风速较小。利用此资料还得到了北京严重污染状况下决定边界层湍流的一套基本物理参数。

关键词 严重大气污染 污染物扩散 边界层结构和参数

1 引言

大气边界层的湍流状态主要由地表和大气的热量和动能交换决定。以前, 研究大气污染物扩散的模式通常按 Pasquill-Gifford-Turner 稳定度直接计算浓度, 这种稳定度划分决定于风速、云量和太阳高度角, 实际上大气污染物的扩散应由决定边界层湍流的物理参数来分类计算^[1]。Monin-Obukhov 长度 L 就是和污染物扩散相关很好的参数, L 由摩擦速度 u_* 、特征温度尺度 θ_* 确定; 对流速度尺度 w_* 是大气对流状态的度量; 混合层高度 h 则是另一个重要的参数。这些参数在一定程度上决定了大气污染物扩散输送, 是客观估算大气污染状况的输入物理量。

1998 年 9 月 26~30 日, 北京市出现了连续严重污染天气, 市区空气质量很差, 污染指数在 4 级以上。本文对这段时间北京 325 m 气象铁塔的观测资料进行了分析, 得到了造成严重污染的边界层典型结构, 并计算了这种条件下上述决定边界层湍流的基本物理参数。

2 边界层结构分析

1998 年 9 月 26 日开始, 铁塔观测表明北京出现了连续的小风天气, 低层温度结构也很特殊。9 月 27 日到 30 日的整点温度廓线分析表明, 不稳定条件出现了 9 次, 中性条件出现 18 次, 其余均为稳定条件。图 1 是 27 日的位温廓线, 01 点和 05 点是稳定廓线, 9 点开始在 50 m 以下出现薄不稳定层, 50 m 以上仍是稳定层结, 到 13 点, 150 m 以下是不稳定层结, 但 150 m 米以上仍是逆温盖, 16 点为不稳定层结, 到 20 点低层又

1999-05-10 收到

* 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403-02资助

完全变为稳定层结。从位温廓线看, 27 日全天大部分时间都笼罩在逆温盖下, 大部分时间混合层的高度基本在 200 m 以下。

图 2 是 27 日的风速廓线, 从图中可以看到全天风速都很小, 除 20 点外, 300 m 以下的风速都在 2.5 m/s 以下。尽管这样, 夜间由近地层惯性振荡形成一个风速的极大值点仍很明显, 27 日 01 点的风速极大值点在 200 m, 05 点在 100 m。

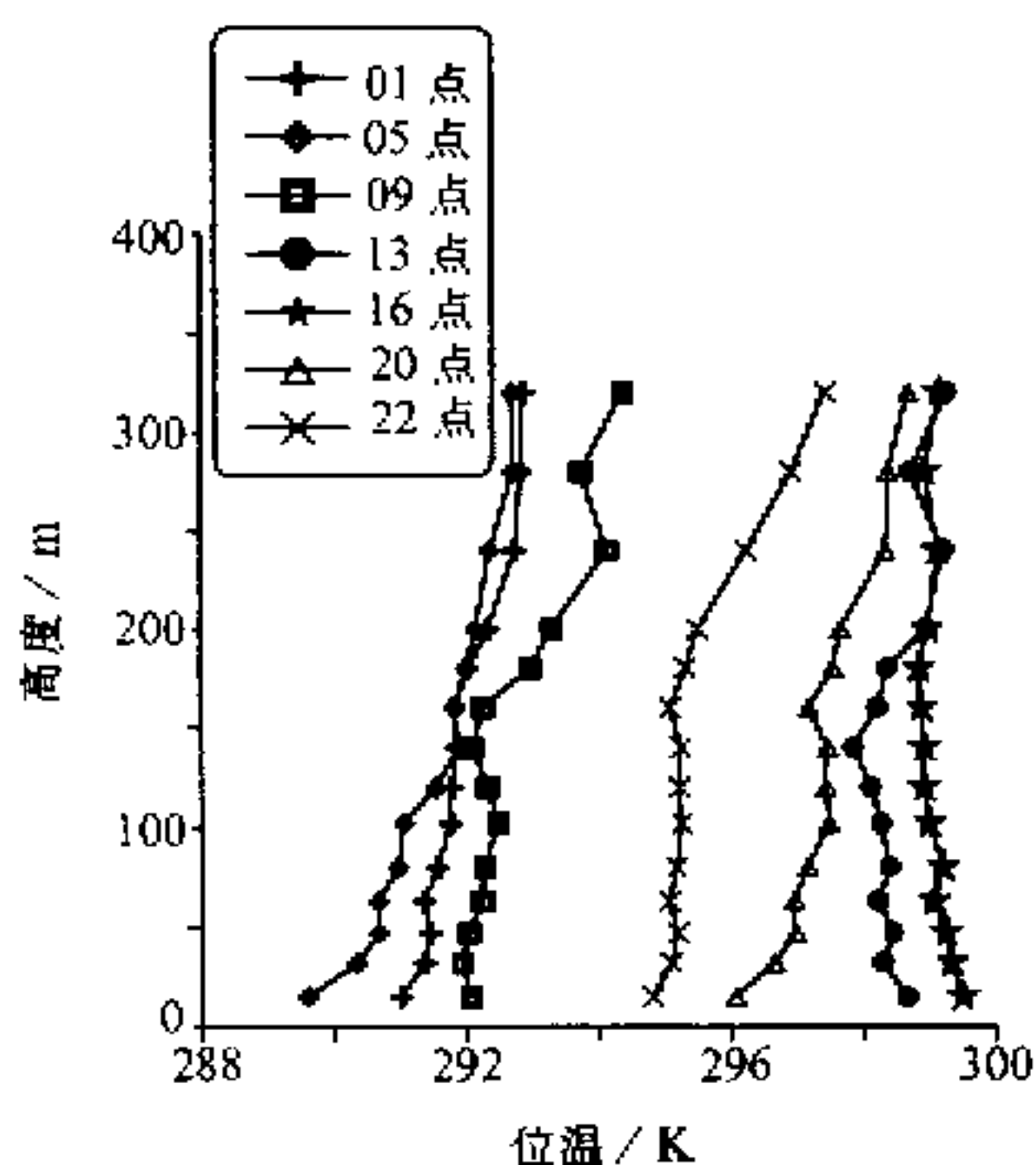


图 1 1998 年 9 月 27 日位温廓线

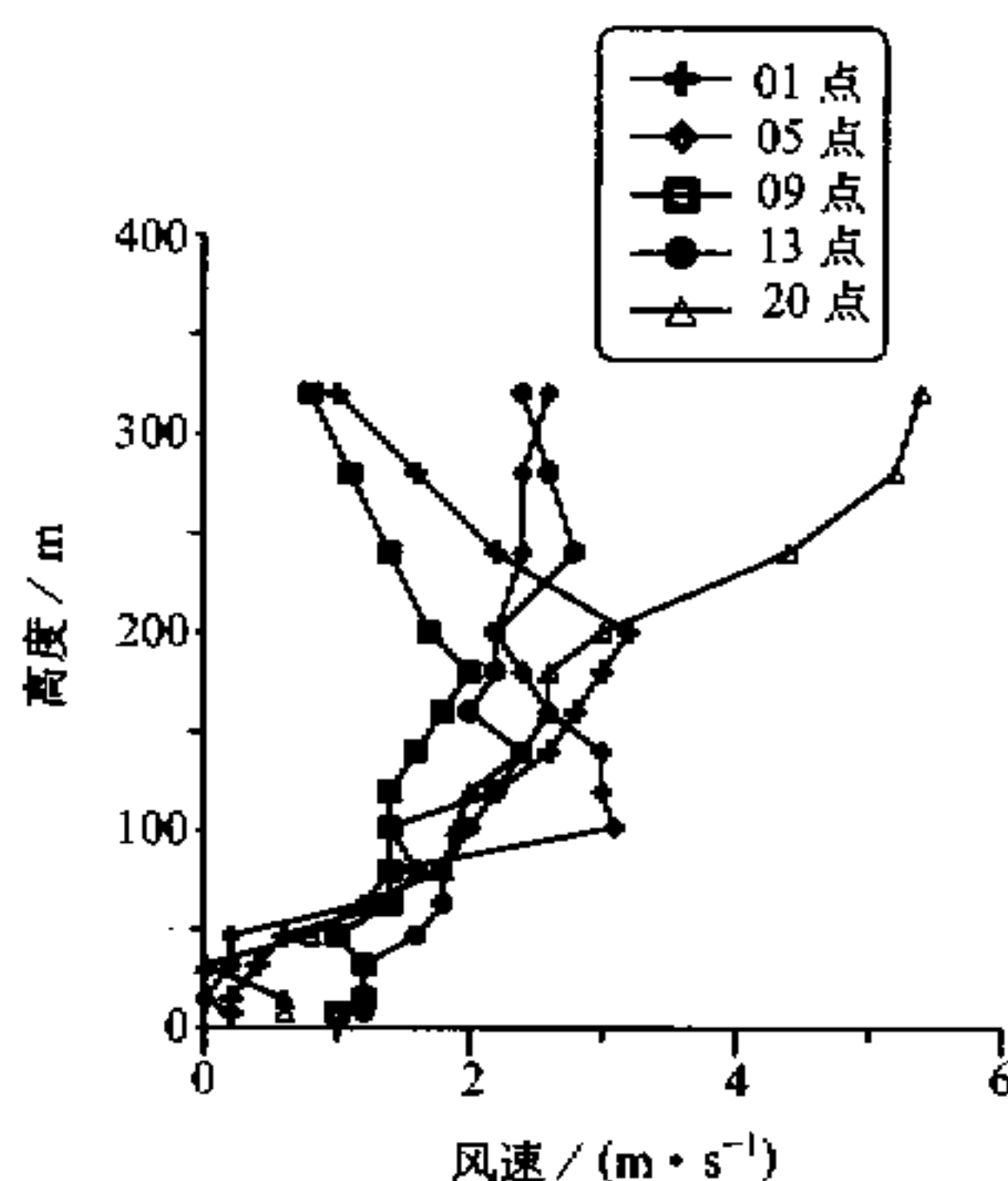


图 2 1998 年 9 月 27 日风速廓线

3 边界层参数

3.1 粗糙度高度和零平面位移

在城市中房屋非常密集, 我们不妨把城市下垫面等同于树木密集的林冠, 这样可以仿照对越过林冠的气流的处理, 认为在静力中性层结下林冠顶部以上风速分布满足对数律, 平均屋顶水平面对气流的作用就象一个垂直向上位移了的地面一样:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0}, \quad (1)$$

其中, z 是离地面的高度, u 为水平风速, u_* 为摩擦速度, d 为零平面位移高度, z_0 是粗糙度高度。若将 d 看成是粗糙度倍数^[2],

$$d = Az_0, \quad (2)$$

表 1 各方位的粗糙度和零平面位移

方位 / (°)	零平面位移 / m	粗糙度 / m
0~90	23	4.0
90~180	26	4.5
270~360	18	3.1

A 取 5~7 之间的值。表 1 是各方位计算得到的粗糙度和零平面位移平均值, 用温度梯度法来划分稳定度^[3]。计算得到的摩擦速度 u_* 列于表 2 中。

3.2 摩擦速度 u_* 和特征温度尺度 θ_*

根据近地层相似理论, u_* 和 θ_* 是垂直风速廓线 $u(z)$ 和位温廓线 $\theta(z)$ 的函数^[4]:

$$u_* = k[u(z_2) - u(z_1)] / [\ln(z_2/z_1) - \Psi_m(z_2/L) + \Psi_m(z_1/L)], \quad (3)$$

$$\theta_* = k[\theta(z_2) - \theta(z_1)] / [\ln(z_2/z_1) - \Psi_h(z_2/L) + \Psi_h(z_1/L)], \quad (4)$$

其中, k 为 von Karman 常数, z_1 和 z_2 为不同的高度, Ψ_m 和 Ψ_h 是稳定度的函数。当 $L < 0$ 时,

$$\Psi_m = \ln \frac{1+x^2}{2} + 2 \ln \frac{1+x}{2} - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

$$\Psi_h = 2 \ln \frac{1+x^2}{2}, \quad (6)$$

式中

$$x = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{1/4}; \quad (7)$$

当 $L > 0$ 时,

$$\Psi_m = \Psi_h = -5z/L. \quad (8)$$

上述风速廓线形式适用于 $z_0 \leq z < L$ 的情形^[5], 其中,

$$L = \frac{\bar{\theta} u_*^2}{g k \theta_*}, \quad (9)$$

其中, g 为重力加速度, $\bar{\theta}$ 为近地层平均位温。

对城市边界层, 以 $z-d$ 代替上述 (3) ~ (8) 式中的 z 即可。在城市边界层中,

$$u_* = k[u(z_2) - u(z_1)] / \{\ln[(z_2-d)/(z_1-d)] - \Psi_m[(z_2-d)/L] + \Psi_m[(z_1-d)/L]\}, \quad (10)$$

$$\theta_* = k[\theta(z_2) - \theta(z_1)] / \{\ln[(z_2-d)/(z_1-d)] - \Psi_h[(z_2-d)/L] + \Psi_h[(z_1-d)/L]\}. \quad (11)$$

这样, 由温度和风速廓线, 用数值迭代法来得到 L 、 u_* 和 θ_* 。第一步: 给定 $L = \infty$, 这时 Ψ_m 和 Ψ_h 均为零, 从 (10)、(11) 式求得一组 u_* 和 θ_* 。第二步: 将求得的 u_* 和 θ_* 代入 (9) 求 L 。第三步: 将上一步求得的 L 代入 (10)、(11) 式再求 u_* 和 θ_* 。重复第二、三步直到连续求得的 L 的差别小于 L 值的 10% 为止, 这时的 u_* 、 θ_* 和 L 便为所要求的摩擦速度 u_* 、特征温度尺度 θ_* 和 Monin-Obukhov 长度 L 。表 2 给出了所求得的各类稳定度下的 u_* 、 θ_* 和 L 。

3.3 混合层高度

由渐进相似理论^[6]得到静力中性的混合层高度:

$$h = c_n u_* / f, \quad (12)$$

其中, f 为科里奥利参数, $c_n = 0.2$ 。该公式只能用于中性条件大气下, 即 $|h/L| < 1$ 时。

稳定时的混合层高度^[7]:

$$h = 0.4(u_* L / f)^{1/2}. \quad (13)$$

不稳定条件下,混合层高度变化较大,可以从前一时次的混合层高度来推导出当时的混合层高度^[8]:

$$h(t_2) = [h(t_1)^2 + 0.1575 \bar{H}(t_2 - t_1)]^{0.5}, \quad (14)$$

其中, $h(t_2)$ 和 $h(t_1)$ 为前后两时刻的混合层高度(单位: m), t_2 和 t_1 为时间(单位: s), $\bar{H}$ 为两时刻间的平均近地层感热通量。

感热通量 H 由下式得到:

$$H = -\rho c_p u_* \theta_*, \quad (15)$$

其中, ρ 和 c_p 分别为大气密度和定压比热。所计算的不同稳定度下的混合层高度见表 2。在实际计算中,若温度廓线中在中性或不稳定层结之上存在逆温盖,而计算的混合层高度比逆温盖底高,则以逆温盖底高作为混合层高度。不稳定时的混合层高度随时间变化较大,未在表 2 中列出。图 3 给出了计算的 9 月 27 日的混合层高度随时间的变化。

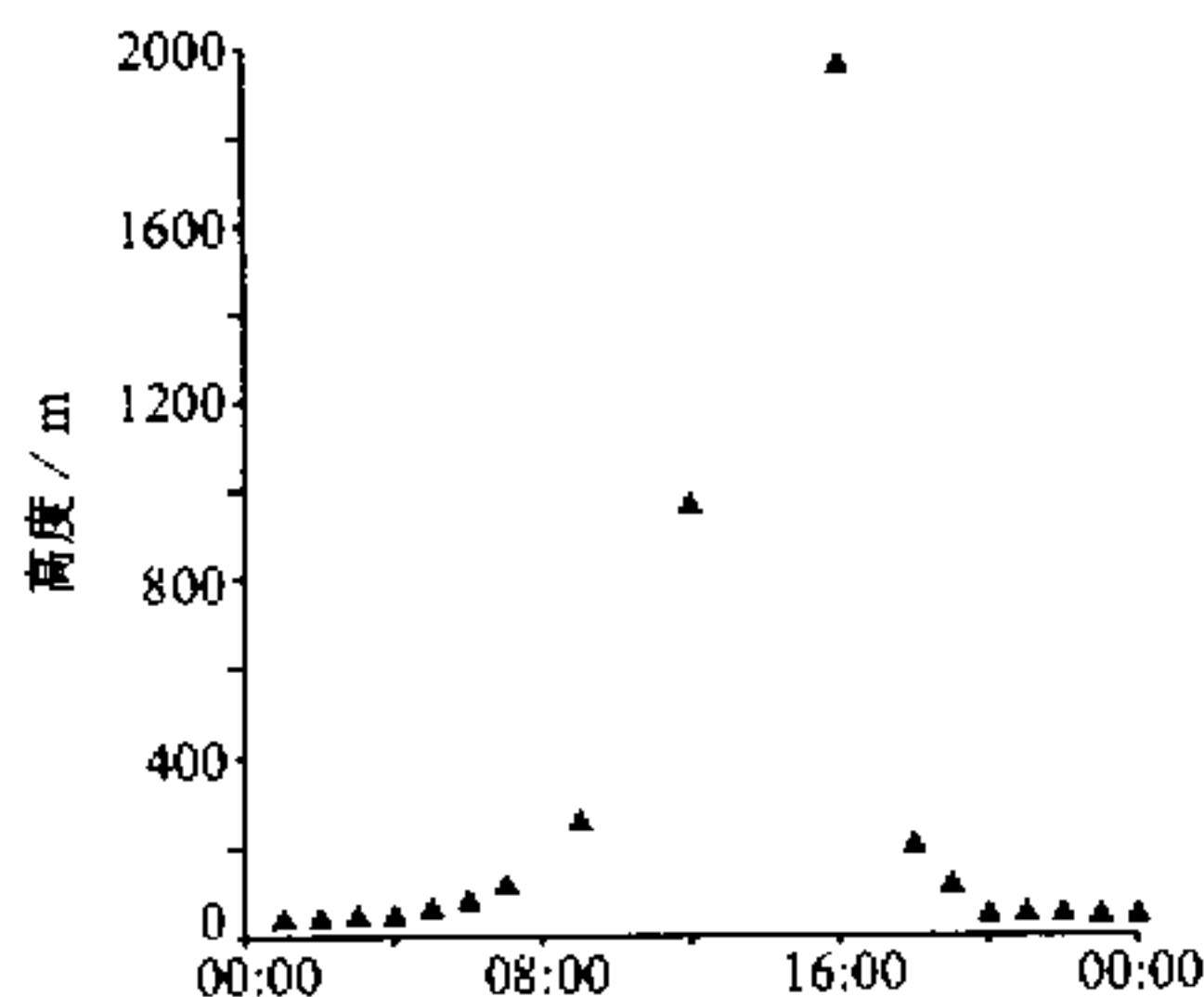


图 3 计算的 9 月 27 日的混合层高度

表 2 各种边界层参数

参数	稳定度					
	A	B	C	D	E	F
L_m / m	-40.3	-81.5	-203.6	7310	171.8	46.1
h_m / m				920	249	110
$u_{*m} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.26	0.30	0.39	0.44	0.323	0.18
θ_{*m} / K	-0.12	-0.084	-0.058	0.002	0.043	0.052
$w_{*m} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.52	0.91	0.68	0.03		

注: 上述参数均为各类稳定度的平均值, $L_m = 1 / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{L_i} \right)$, $h_m = 1 / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_i} \right)$, 其余为算术平均值

3.4 对流速度尺度

对流速度尺度为

$$w_* = \frac{gHh}{\rho c_p \bar{\theta}}, \quad (16)$$

式中 H 的计算方法同(15)。不同稳定度下的 w_* 也列于表 2 中。

4 结语

北京严重污染状况下的大气边界层结构存在如下特点: 稳定层结占大多数, 中性和不稳定层结很少, 且在近地层的中性或稳定层结之上常常有逆温盖, 不利于污染物垂直扩散; 风速较小, 且随高度增加风向来回摆动较大, 不利于污染物水平稀释。表 2 给出

了重污染条件下决定边界层湍流的基本物理参数, 混合层高度基本在 200 m 以下, 有时在中性和不稳定层结下混合层高度可发展到 1000 m 以上, 但这种情形很少, 如低层中性和不稳定层结上还有逆温盖, 混合层高度应以逆温底高为限; 摩擦速度在 0.4 m/s 以下; 特征温度尺度则在 10^{-2} 量级; 最大对流速度尺度为 1.52 m/s。

参 考 文 献

- 1 Nieuwstadt, F. T. M., 1980, Application of mixed-layer similarity to the observed dispersion from ground-level source, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 157~162.
- 2 Parlange, M. B. and W. Brustaert, 1989, Regional roughness of the landes forest and surface shear stress under neutral conditions, *Boundary-Layer Meteor.*, **48**, 69~81.
- 3 袁素珍、雷孝恩, 1982, 320 米塔上测定的大气稳定度类和风速廓线, *中国环境科学*, **2**(3), 29~34.
- 4 Wieringa, J., 1980, A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup-anemometer overspeeding, *Boundary-Layer Meteor.*, **18**, 411~430.
- 5 Yaglom, A. M., 1977, Comments on wind and temperature flux-profile relationships, *Boundary-Layer Meteor.*, **11**, 89~102.
- 6 Blackadar, A. K. and H. Tennekes, 1968, Asymptotic similarity in neutral barotropic planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1015~1020.
- 7 Zilitinkevich, S. S., 1972, On the determination of the height of the Ekman boundary layer, *Boundary-Layer Meteor.*, **3**, 141~145.
- 8 Hanna S. R. and Chang J. C., 1991, Modification of the hybrid plume dispersion model (HPDM) for urban conditions and its evaluation using the Indianapolis data set, *Final Report Prepared for Electric Power Research Institute*, Palo Alto, CA.

Study on the Boundary Layer Structure and Parameters under Heavy Pollution Conditions in Beijing

Yin Dazhong and Hong Zhongxiang

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

Abstract The boundary layer structure and parameters of the heavy pollution process from September 26, 1998 to September 30 in Beijing are studied based on the observational data of the 325 m Beijing Meteorological Tower. The study shows that stable conditions are the overwhelming majority and sometimes an inversion presents over the daytime unstable lower layer during this period. The wind speed is rather small also. A set of physical parameters which determines the turbulent state of the atmospheric boundary layer is calculated using these observational data.

Key words heavy pollution condition pollutant diffusion structure and parameters of boundary layer