

考虑湿度影响的城市气溶胶 夜晚温度效应*

李子华

(南京气象学院, 南京 210044)

涂晓萍

(海南省气象局, 海口 570003)

摘 要 本文利用一维非定常模式, 研究了城市上空干、湿气溶胶粒子对夜间边界层温度的影响。结果表明, 湿气溶胶粒子对低层大气有明显的升温作用, 而对中上层大气则起降温作用, 同时改变了贴地逆温层结构和边界层稳定度。

关键词 大气气溶胶 大气边界层 温度效应

1 引言

随着工业的发展, 重庆市空气污染日益加剧。与此同时, 夜间气温逐年升高。80年代末与50年代初相比, 02时气温升高了1.7°C。大气气溶胶粒子的增多, 可能是导致市区夜晚气温变化的原因之一。为此建立了城市大气气溶胶夜晚温度效应的模式, 试图研究空气污染物对重庆市夜间边界层温度场的影响。

国外对大气气溶胶辐射效应的模拟研究始于60年代初。Chylek和Coakley^[1]曾建立一维模式研究气溶胶粒子的温度效应。80年代开始, 此项工作更加深入^[2,3]。我国也建立了一些可行的模式^[4~6], 并取得比较好的模拟效果。本模式的特点是考虑了湿度对气溶胶粒子辐射的影响, 气溶胶粒子除了吸收辐射能外, 还将对外发射能量。由于模式已在文献[7]发表, 本文主要介绍模拟试验及其结果。

2 模式简介

晴空夜间大气边界层控制方程组为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \left(\frac{\delta T}{\delta t} \right)_R, \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f(u - u_g) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (4)$$

1994-12-27收到, 1995-05-10收到修改稿

* 本文得到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资助

$$\left(\frac{\delta T}{\delta t}\right)_R = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F_N}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.286}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial \zeta^2}, \quad (7)$$

$$\left(K_\theta \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial z} + \rho L K_q \frac{\partial q}{\partial z} - K_s \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - F_N \right) \Big|_{z=0} = 0. \quad (8)$$

(1) 式为热量方程, (2) 式为水汽方程, (3) 和 (4) 式为运动方程, (5) 和 (6) 式为辐射增温率和位温表达式, (7) 式为土壤热传导方程, (8) 式为地表热量平衡方程。在上述方程中, F_N 表示地气系统净长波辐射通量值, K_s 、 c_s 、 ρ_s 分别为土壤的热传导系数, 比热和密度, ζ 为地表以下深度坐标, K_m 、 K_θ 、 K_q 分别是动量、热量、比湿的湍流交换系数。

大气长波辐射采用 Roach^[8]的五波段模式计算, 并结合 Rodgers-Walshaw^[9]的宽带模式计算长波辐射通量。考虑的吸收物质有水汽、二氧化碳分子和气溶胶粒子。对气溶胶粒子, 考虑了湿度的影响。观测表明, 只有当相对湿度 f 大于 60% 左右时, 气溶胶粒子尺度的增长才较为明显。因此, 湿气溶胶粒子半径 $r(f)$ 与干粒子半径 r 之比 P , 可用经验公式^[10]

$$P = \frac{r(f)}{r} = (1-f)^{-1/\mu} - (1-60\%)^{-1/\mu} + 1,$$

上式的适用范围: $60\% \leq f \leq 95\%$, 系数 μ 则取 3.5。湿气溶胶粒子的光学特性不同于干气溶胶粒子, 也有异于水滴。湿气溶胶粒子等效光学折射率可表示为^[10]

$$m_c = n_{ic} - i n_{ie},$$

其中 n_{ic} 为复折射指数的实部, n_{ie} 为其虚部, 与相对湿度 f 之间有关系式

$$n_{ic} = n_{rw} + (n_r - n_{rw})[r(f)/r]^{-1},$$

$$n_{ie} = n_{iw} + (n_i - n_{iw})[r(f)/r]^{-1},$$

n_{rw} 和 n_{iw} 为水滴的光学折射率的实部和虚部, n_r 和 n_i 为干粒子的光学折射率的实部和虚部。在本模式中, 水和尘埃的折射率实部和虚部引自文献[9]附录。

气溶胶粒子一方面吸收辐射能量, 同时还将对外发射能量。吸收光学厚度为^[9]

$$\delta_A(\lambda) = \iint \pi r^2 K_a(r, n_i, \lambda) n(r, z) dr dz,$$

其中 $n(r, z)$ 为气溶胶粒子谱, 并随高度变化; K_a 为吸收有效因子, 可近似写为^[9]

$$K_a = (8\pi r / \lambda) \text{Im}[(1 - n^2) / (2 + n^2)],$$

n 为复折射指数, Im 表示只取虚部。

在一定温度下, 若将某一气溶胶薄层当作黑体, 则其辐射能量密度为

$$F_B = \sigma T^4,$$

σ 为 Boltzman 常数。显然, 气溶胶粒子的辐射应是长波辐射。

因重庆是座山城，在计算地表长波辐射时，考虑了坡度的影响。模式计算方法、所需参数及初边条件见文献[7]。

本模式经过检验^[7]，与实际观测比较符合，能反映夜间城市边界层气温变化的一般规律。利用模式作了六个模拟试验，包括有无气溶胶粒子试验，改变气溶胶粒子数密度试验，干湿粒子对比试验，改变气溶胶粒子复折射指数虚部试验等。

3 气溶胶粒子对夜间边界层温度的影响

1990 年 12 月，用 ADAS 在重庆市中区观测边界层温、湿、风，用 LG-83 型光学粒子计数器在市边区沙坪坝观测气溶胶粒子（0.3~20 μm）谱分布。模拟计算时，初始场取 12 月 23 日 20 时观测资料。气溶胶粒子观测表明，平均数密度为 252 个/cm³，粒子谱服从 Junge 分布。但水平分布不均，日际变化很大。市中区与市边区相比，可大 1 倍到几倍，晴天与浓雾日相比，可小到 1/2~1/3^[11,12]。本模式取大气气溶胶粒子空间谱分布为

$$n(D,z) = 2.866D^{-2.95}\exp(-z/H_p),$$

H_p 取为 1.2 km， D 为粒子直径。模拟试验分 4 种情况：（1）取 $n(D,z) \times 0$ ，即无气溶胶粒子；（2）取 $n(D,z)$ ，考虑湿度影响；（3）取 $n(D,z) \times 5$ ，考虑湿度影响；（4）取 $n(D,z)$ ，干粒子。图 1 给出了试验结果，其中试验（2）的模拟结果接近观测实况^[7]。比较图 1a 与 1b 可知，若不考虑大气气溶胶粒子的存在，在 200 m 以下的低层大气，等温线加密，这表明夜晚降温速度加快，逆温强度大。对 200 m 以上的气层，等温线显得平缓，这意味着中上层降温速率减小。可见大气气溶胶粒子的存在，可使低层大气升温，使中上层大气降温，使接地逆温层减弱。这一结论与文献[6]基本一致。低层大气增温是由于其中的气溶胶粒子使该层大气吸收地表辐射和近地层大气辐射增强，中上层大气降温是由于存在于该气层的气溶胶粒子使放出的长波辐射加强之故。

为了更清楚地了解气溶胶粒子对边界层温度的影响，图 2 给出了试验(1)、(3)与(2)之间的温差廓线，表 1 列出了有气溶胶粒子的各试验与无气溶胶粒子试验在 06 时的温差数值。由图 2a 可以看出，对 100~120 m 以下气层，温差为负，而其上气层温差为正，且随时间的延长，温差越来越大。可见大气中若无气溶胶粒子，则 100~120 m 以下气层温度会降低，最大降低值在地表附近；而其上的气层温度会升高，最大升值在 450~550 m 之间。对 1000 m 以上的气层，温差不明显。在表 1 中可以看到，当大气气溶胶粒子分布为 $n(D,z)$ （试验(2)）时，与无气溶胶粒子（试验(1)）相比，低层要增温，最大增温值为 0.6℃，中上层要降温，最大降温值为 0.8℃。

表 1 各试验与试验（1）在 06 时温度差（℃）

高度 / m	0	40	60	80	100	120	140	160	180	200	240	280	360	400	500	600	800	1000
(2)-(1)	0.6	0.4	0.4	0.3	0.0	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.2	-0.1
(3)-(1)	0.8	0.5	0.3	0.0	-0.5	-0.9	-1.3	-1.5	-1.8	-1.9	-2.1	-2.2	-2.3	-2.4	-2.4	-1.8	-0.3	0.1
(4)-(1)	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.5	0.6
(5)-(1)	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.1	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5
(6)-(1)	0.6	0.5	0.4	0.3	-0.1	-0.3	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-1.0	-1.0	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	0.0	0.2

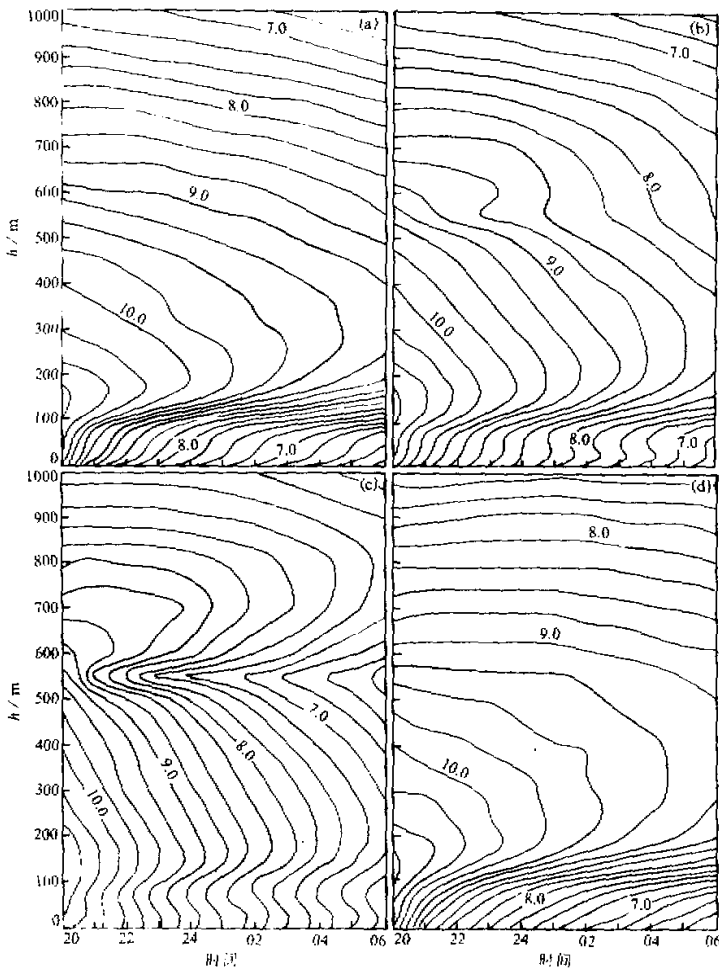


图1 模拟边界层气温($^{\circ}\text{C}$)时空分布

(a) $n(D,z) \times 0$, 即无气溶胶粒子; (b) $n(D,z)$, 考虑湿度;
(c) $n(D,z) \times 5$, 考虑湿度; (d) $n(D,z)$, 干粒子

如果气溶胶粒子数密度增大 5 倍, 如图 1c 所示, 会使低层大气夜晚降温率进一步减小, 中上层大气降温率进一步加大。由表 1 可以看到, 气溶胶粒子增多 5 倍后, 与无气溶胶粒子相比, 近地层最大增温值可达 0.8°C , 中上层最大降温值可达 2.4°C 。80 年代与 50 年代相比, 重庆雾日显著减少, 这可能与城市发展、污染加重, 导致近地层夜晚气温升高有关。

大气气溶胶粒子对边界层温度场的影响, 改变了贴地逆温层的结构, 这由各试验得到的温度廓线 (图 3) 可以看出。在试验 (1) 中, 05 时的逆温层顶为 280 m, 温度为 9.2°C , 而在试验 (2) 和 (3) 中, 逆温层顶分别为 240 m 和 200 m 以下, 温度分别为

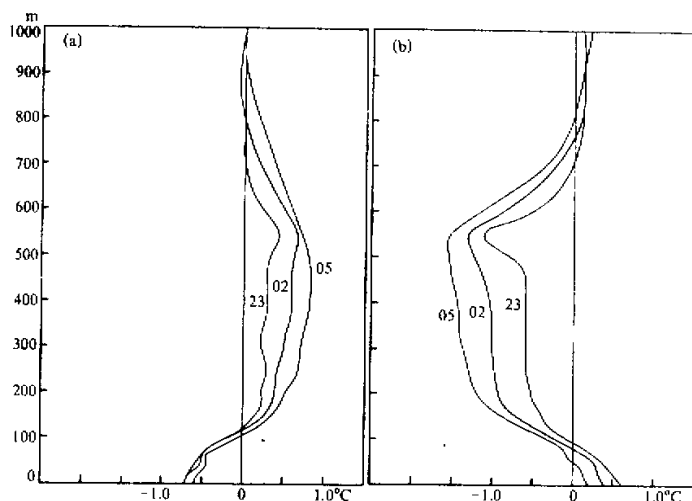


图2 各试验之间温差廓线

(a) 试验(1)-(2), (b) 试验(3)-(2)

8.5°C 和 7.4°C。可见大气气溶胶粒子的存在, 可使逆温层顶降低, 层顶温度下降。气溶胶粒子的存在, 也直接影响逆温强度。如表 2 所示, 没有气溶胶粒子时, 不论是逆温厚度还是逆温强度, 都比有气溶胶粒子时要大。在试验 (2) 中, 即气溶胶粒子分布为 $n(D, z)$, 并考虑湿度影响时, 近地面逆温层被分割为两部分, 即 20 m 以下的贴地逆温层和 40 m 以上的低悬逆温层。如果气溶胶粒子数密度加大 (如试验(3)), 不仅这种分割现象更明显, 而且逆温厚度更小, 强度更弱 (见图 3 和表 2)。气溶胶粒子使低层逆温减弱的现象符合重庆实际。据重庆市中区的 ADAS 观测资料, 05 时接地逆温平均顶高 35m, 强度仅 0.30°C/100 m, 出现频率只有 33%。

大气气溶胶粒子对温度场的影响, 改变了边界层的稳定度。用位温梯度 $\partial \theta / \partial z$ 衡量大气稳定度, 并用

$$Y_{n-1} = \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_n - \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_1 \right] \times 100$$

表示有气溶胶粒子的各试验与无气溶胶粒子时的位温梯度差, 则

$Y_{n-1} > 0$ 表示稳定度增加

$Y_{n-1} = 0$ 表示稳定度不变

$Y_{n-1} < 0$ 表示稳定度减小

表2 各试验得到的 06 时逆温分布

厚度	强度 / °C(100 m) ⁻¹			
	(1)	(2)	(3)	(4)
0~20 m	1.0	1.0	0.5	1.0
20~40 m	0.5	—	—	0.5
40~60 m	0.5	0.5	—	1.0
60~80 m	1.0	0.5	—	1.0
80~100 m	3.0	1.5	0.5	2.0
100~120 m	2.5	2.0	0.5	2.5
120~140 m	2.5	1.5	0.5	2.0
140~160 m	1.5	1.0	0.5	1.5
160~180 m	1.5	0.5	0.0	1.5
180~200 m	0.5	0.5	0.0	1.0
200~240 m	0.5	0.3	0.0	0.3
240~280 m	0.3	0.0	0.0	0.3
280~320 m	0.0	0.0	—	0.3
320~360 m	—	0.0	—	0.0
360~400 m	0.0	0.0	—	0.0
550~600 m	—	0.2	1.2	—
600~700 m	—	—	0.5	—
700~800 m	—	—	0.1	—

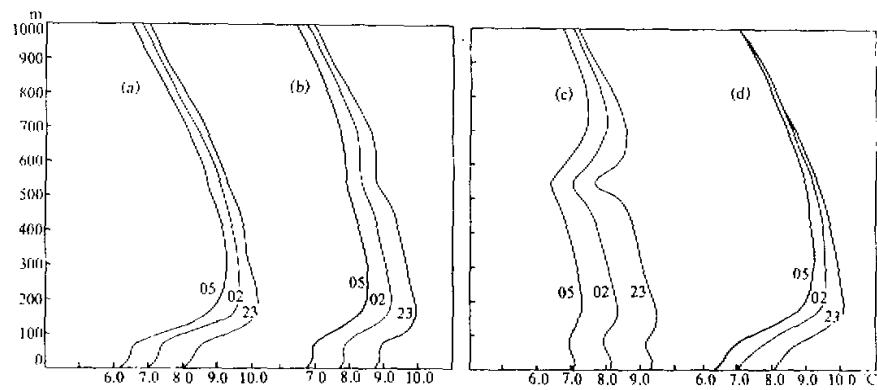


图 3 模拟试验得到的各时次温度廓线
(a) 无气溶胶粒子; (b) $n(D,z)$, 考虑湿度; (c) $n(D,z) \times 5$, 考虑湿度; (d) $n(D,z)$, 干粒子

表 3 给出了 06 时各高度上 Y_{n-1} 值。由此表可见, 当大气中气溶胶粒子分布为 $n(D,z)$, 且考虑湿度影响时, 可使 360 m 以下的大气层结稳定度减小, 450 m 以上的大气层稳定度增加, 360~450 m 大气层, 稳定度可能减小, 也可能增大。如果气溶胶粒子数密度增加 (如试验(3)), 则低层稳定度减小, 上层稳定度增大就更为显著。

表 3 各试验与试验 (1) 在 06 时位温梯度差 (K / 100 m)

高度 / m	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~140	140~160	160~180	180~200	200~280
Y_{2-1}	-0.5	0.0	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	0.0	-0.3
Y_{3-1}	-1.0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.5	-2.0	-0.5	-1.0	-0.5	-0.5
Y_{4-1}	-0.5	0.5	0.0	0.5	-1.0	-0.5	0.0	0.0	1.0	-0.2
高度 / m	280~320	320~360	360~400	400~450	450~550	550~600	600~700	700~800	800~900	900~1000
Y_{2-1}	0.0	-0.3	0.3	-0.2	0.2	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
Y_{3-1}	-0.3	-0.3	0.3	-0.2	0.0	1.4	1.0	0.6	0.2	0.2
Y_{4-1}	0.3	0.0	0.3	0.2	0.2	0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2

4 气溶胶粒子物理化学性质不同对温度场的影响

大气气溶胶粒子物理化学性质不同, 对边界层气温场影响的程度可能会有差异。为此做了干气溶胶粒子的模拟试验 (4)。在图 1d、图 3d 和表 1~3 中给出了这个试验的结果。比较图 1、图 3 中的 (d) 和 (a) 图可知, 大气中有干气溶胶粒子与没有气溶胶粒子时温度分布极为相似, 所不同的是, 大气中存在干气溶胶粒子时, 边界层上部 (600 m 以上) 等温线较为平直, 各时次温度廓线也无大的变化, 表明上层夜晚温度下降不明显。如果仔细分析 (见表 1、表 2), 可以看到大气中存在干气溶胶粒子时, 也使低层增温, 中层降温, 但与湿气溶胶粒子比较起来, 温度变化幅度很微小, 逆温结构也并无改变。因此可以认为, 气溶胶粒子对低层大气增温, 中层大气降温效应主要是粒子

吸附水汽后所为。当相对湿度大于 60% 时, 大气中可吸湿性粒子吸附水汽的能力很显著, 这时粒子尺度会增大, 其外层还可形成一水膜, 从而大大改变干气溶胶粒子的光学折射率, 使复折射指数虚部明显增大, 导致夜间大气长波辐射向外发射的能量发生相应的变化。大气气溶胶质粒复折射指数虚部取决于粒子的成分。气溶胶粒子发生源不同, 其物理化学结构可能不同。同一源的气溶胶粒子, 其尺度不同, 化学组成也会有异。因此, 气溶胶粒子复折射指数虚部 n_i 值时空变化可能很大。根据实际测量, n_i 变化范围可达两个量级^[13]。 n_i 是决定大气气溶胶粒子吸收特性的重要参数, 它的变化会影响辐射在大气中的传播。因此设计了两个试验, 气溶胶粒子分布均为 $n(D, z)$, 都考虑湿度影响, 但复折射指数虚部不同, 一为 $n_i / 10$ (试验 5), 一为 $n_i \times 1.3$ (试验 6)。

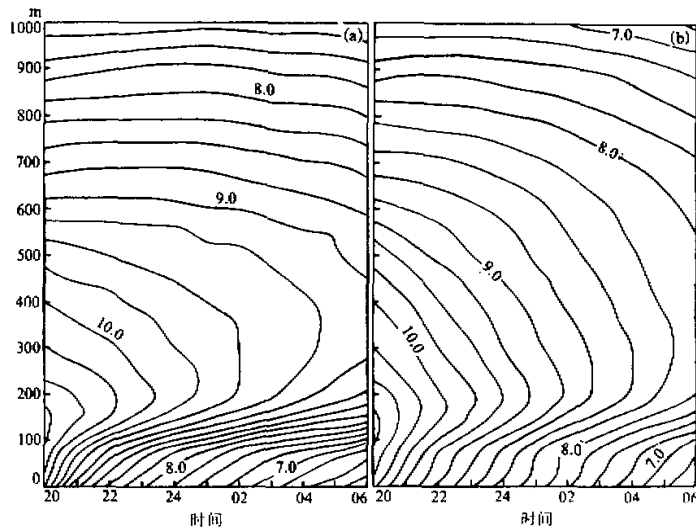


图 4 (a) 试验 5 和 (b) 试验 6 的气温时空分布

图 4 给出了这两个试验的边界层气温时空分布。比较图 4a 和图 1d 可知, 两图极为相似。这表明: 若气溶胶粒子复折射指数虚部减小一个量级, 即和干气溶胶粒子一样, 吸收能力明显减弱, 致使近地层增温, 中上层降温能力明显减弱。这在表 1 中也可清楚地看出。由此可以认为, 气溶胶粒子复折射指数虚部减小 10 倍, 与不考虑湿度对粒子的作用时引起的边界层温度变化是很相近的。

增大复折射指数虚部为 $n_i \times 1.3$ 的试验结果如图 4b 所示。与图 1b 比较可知, 它没有明显改变整个边界层温度场结构。比较表 1 中 [(6)-(1)] 与 [(2)-(1)] 后发现, 略增大气气溶胶粒子复折射指数虚部, 可使低层增温、中层降温作用稍有增强, 因而近地逆温层也会有所削弱。

5 结论

(1) 大气气溶胶粒子的存在, 可使夜间大气边界层低层降温速率减小, 中上层降温

率增大。随着气溶胶粒子数密度的增加,这种作用更加明显。这种温度效应主要是气溶胶粒子吸收水汽后所为。

(2) 湿气溶胶粒子改变了贴地逆温层结构,使逆温层顶降低,强度减弱。

(3) 气溶胶粒子改变了边界层的稳定度,使低层稳定度减小,上层稳定度增大。

(4) 气溶胶粒子复折射指数虚部的明显变化,可对边界层温度场产生明显影响。

参 考 文 献

- 1 Chylek, P. and J. A. Coakley, 1974, Aerosols and climate, *Science*, **183**, 75~77.
- 2 Coakley, J.A., R.D. Cess and F.B. Yurevich, 1983, The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget. A parameterization for climate models, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 116~138.
- 3 Sachio Ohta and Naoto Murao, 1990, Evaluation of absorption properties of atmospheric aerosols at solar wavelengths based on chemical characterization, *Atmos. Envir.*, **24A**(6), 1409~1416.
- 4 卞 宏, 韩志刚, 1989, 气溶胶大气对太阳辐射的吸收, *气象学报*, **47**(1), 118~123.
- 5 卞绍华, 1991, 对流层气溶胶和云的大气辐射加热特征, *大气科学*, **15**(6), 89~98.
- 6 李乐泉, 周明煜, 李兴牛, 1992, 夜间城市大气边界层和气溶胶的相互作用, *应用气象学报*, **3**(1), 32~41.
- 7 徐晓萍, 李子华, 1994, 气溶胶粒子对城市夜间边界层温度影响的模式研究, *南京气象学院学报*, **17**(2), 195~199.
- 8 Roach, W.T. et al., 1979, A high resolution infrared radiative transfer scheme to study the interaction of radiation with cloud, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **105**, 603~614.
- 9 刘长盛, 刘文保, 1990, 大气辐射学, 南京大学出版社, 207~214, 339~341.
- 10 孙景群, 1985, 能见度与相对湿度的关系, *气象学报*, **43**(2), 230~234.
- 11 陈金荣, 周文贤, 1992, 重庆市区大气气溶胶粒子的时空分布和物理特性, *气象科学*, **12**(4), 436~444.
- 12 任丽新, 王明星等, 1988, 重庆地区大气气溶胶的物理化学特性及其对酸雨形成的作用, *大气科学 (特刊)*, 236~244.
- 13 胡欢陵, 许军, 黄正, 1991, 中国东部若干地区大气气溶胶虚折射指数特征, *大气科学*, **15**(3), 18~23.

The Influence of Urban Aerosols with Humidity Effect on Temperature during Night

Li Zihua

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Tu Xiaoping

(Hainan Bureau of Meteorology, Haikou 570003)

Abstract The effect of dry and wet aerosol particles over a city on temperature field of the nocturnal boundary layer is studied using a one-dimensional nonconstant model. The result indicates that the wet aerosol particles obvious increase the temperature of the lower air, and decrease the temperature of the higher layer. Therefore they change the constructure of the ground-hugging inversion layer and the stability of the boundary layer at the same time.

Key words atmospheric aerosol particles boundary layer temperature effect