

城市气溶胶的辐射效应及对混合层发展的影响*

陈长和 王海啸 黄建国 张 镭 秦广言

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

王 介 民

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

关键词 城市烟雾层、短波加热、长波冷却、混合层

文献[1]指出,在受烟尘污染的城市,到达地面的太阳辐射可被严重削弱。这显然会改变地面和气溶胶所在气层的热量收支,从而影响低层大气的温度分布和边界层的发展。本文拟从观测资料和理论计算两方面就这个问题进行分析。

本文所用资料取自1989年12月1—15日在兰州地区进行的一次外场观测。在三个测点进行了大气浑浊度、辐射量和风温廓线的观测。兰州大学测点(简称兰州)接近城市中心,海拔高度1530m,南山顶测点高出城市620m,皋兰县气象站(简称皋兰)位于较开阔的农村,海拔高度1668m。整个观测期间天气以晴为主,有时多云,无明显天气过程。

1 城市气溶胶的辐射效应

1.1 烟雾层辐射效应的观测

兰州市地处青藏高原东侧黄河河谷盆地内,冬季天气稳定,风力微弱,取暖燃煤排放烟尘在盆地上空形成烟雾层。1989年观测期间,在南山顶定时观测烟雾层顶的高度。观测表明,兰州城市烟雾层顶高度在500—800m之间,平均高度600m,多数情况下烟雾层顶界线分明。混合层顶高度一般低于烟雾层顶。

我们把城市上空厚度600m的大气称为“烟雾层大气”,而南山顶测点则正好在烟雾层大气的顶部。由大气浑浊度资料计算出波长 $0.55\mu\text{m}$ 处的大气气溶胶质点光学厚度,兰州整层大气气溶胶光学厚度为0.87,比北京上空光学厚度最大的春季要大近一倍^[2]。兰州烟雾层大气光学厚度值占整层大气的70%,反映出烟雾层气溶胶粒子集中的特点。

城市烟雾层的存在,影响了到达地面的太阳辐射通量。兰州正午到达地面的直接辐射比郊区皋兰小 204.5Wm^{-2} ,即58.9%。经计算,在地方时12时,兰州上空气体散射和臭氧的吸收量占太阳直接辐射总削减量的17.4%,水汽吸收量占11.9%,气溶胶粒子消光占削减量的70.7%。因此可以认为兰州与皋兰的直接辐射差异主要是烟雾层气溶胶质点造成的。到达地面的散射辐射因气溶胶粒子的散射作用而使兰州比皋兰多 71.0Wm^{-2} ,中午兰州地面得到

1992-10-19 收稿, 1993-02-17 收修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

的太阳总辐射比皋兰小 28.5%。

1.2 烟雾层的短波加热率

由于烟雾层大气中含有大量气溶胶粒子, 太阳辐射被多次散射, 可用 Meader 等提出的二流近似累加法求解辐射传输方程^[3,4]。

根据实测的浑浊度资料, 将兰州烟雾层中气溶胶粒子分为三种情况: 轻污染 (L)、平均污染 (A)、重污染 (H), 三种状况对应于波长 $0.55\mu\text{m}$ 处的光学厚度分别为 0.2, 0.6 和 0.9, 假定烟雾层内的消光系数随高度线性变化, 上层大气消光系数随高度均匀分布, 如图 1(a) 所示。

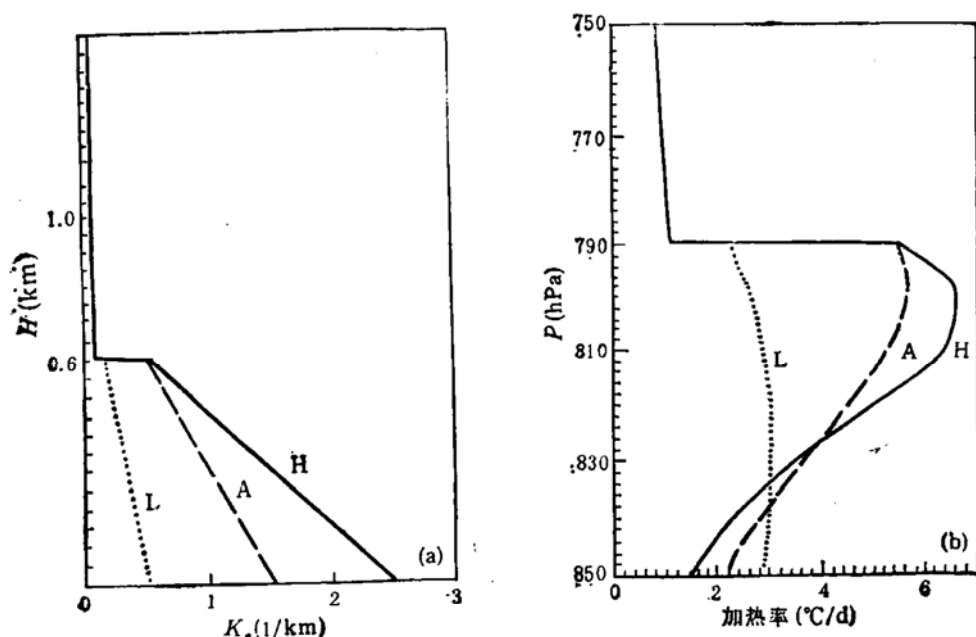


图1 三种污染状况下烟雾层内消光系数分布(a)和辐射加热率(b)

兰州冬季烟雾层中污染物多为工业粉尘和燃煤烟尘, 按 Twitty 等的研究^[5], 气溶胶复折射指数取 $n = 1.8 - 0.5i$ 。气溶胶粒子谱取 Twitty 等^[5]所给的两种形式, 分别表示兰州上层大气和烟雾层大气的气溶胶粒子谱。计算中太阳光谱分为四段, 地面反射率取城市平均值 0.15^[6], 太阳高度角取 12 月 7 日的值。

图 1(b) 为对应于三种污染状况下的日加热率。平均污染状况时, 气溶胶质点的加热率比纯水汽加热率大 5 倍, 烟雾层上部最大加热率达到 $5.7^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 在严重污染时可达 $6.7^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

1.3 烟雾层的长波辐射效应

长波辐射计算中除考虑水汽和 CO_2 的作用外, 假设气溶胶的红外辐射仅限于波长 $8-14\mu\text{m}$ 的大气窗区^[4], 用兰州测点向下长波辐射资料验证, 计算结果与实测值之差在 6% 以内, 与未考虑气溶胶作用的计算结果相比有显著改善。设 $T_0 = 278\text{K}$, 温度随高度以递减率 $0.6\text{K}/100\text{m}$ 变化。对应于图 1(a) 的三种污染状况, 气溶胶粒子产生的向下长波辐射分别增加了 6.1%, 15.2% 和 21.2%, 气层冷却率增加了 $0.023^{\circ}\text{C}/\text{h}$, $0.073^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 和 $0.105^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

白天 8 h, 对于平均污染状况 (A), 烟雾层冷却率为 -1.01°C , 远小于吸收短波辐射引起的加热 (5.7°C), 烟雾层的长波逆辐射增加量在白天时段里与到达地面短波辐射的削减量相比也是很小的。

2 烟雾层辐射效应对混合层发展影响

图2是农村地区和城市污染大气中一天内的位温廓线,表示了混合层发展过程。兰州早晨240m以下有近绝热递减率的城市边界层存在,因而上午混合层高度高于农村,但午后最大混合层高度则低于农村,显示出城市地区太阳辐射被烟雾层削弱,地面加热作用减弱所导致的影响。由图2还可以看到兰州在混合层内增温的同时,混合层以上的覆盖逆温中也有较大增温,显示出烟雾层上层短波加热的作用。覆盖逆温层中的辐射加热增加了大气稳定度,抑制了混合层的发展。

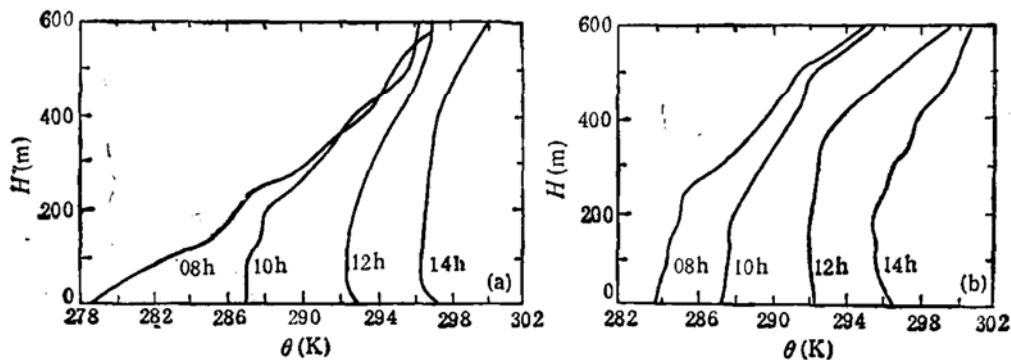


图2 城乡地区混合层发展的比较(1989年12月4日)

(a) 为皋兰, (b) 为兰州

烟雾层的辐射效应改变了城市地面和烟雾层大气的热量收支,由此引起的对混合层发展的影响可通过数值模拟来计算。

冬季兰州地区,在几百米高度内风速常在 1m/s 左右,本文用一个仅考虑垂直方向热量收支的模式来模拟混合层发展,烟雾层辐射效应反映在模式参数中。设混合层顶处位温廓线转折为逆温,但不考虑位温跃变。混合层高度的变化可表示为

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial \theta_m}{\partial t} - \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \right) + W(h), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = [\overline{(w'\theta')}_0 - \overline{(w'\theta')}_h] / h + R_A^m, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = W(h) \frac{\partial \theta_i}{\partial z} + R_A^i, \quad (3)$$

式中 h 是混合层高度, γ 是覆盖逆温层位温递减率, θ_m 和 θ_i 是混合层和逆温层中位温, R_A^m 和 R_A^i 是气溶胶吸收太阳辐射对混合层和逆温层的加热率, $W(h)$ 为大尺度垂直运动速度, $\overline{(w'\theta')}_0$ 和 $\overline{(w'\theta')}_h$ 分别是地表和混合层顶端湍流热通量。

兰州冬季干燥少雨。Oke^[1] 总结得出,在干燥时期,城市地表湍流热通量为地面净辐射的 65%。若把城市释放的人工热量也考虑为地面湍流热通量的一部分,得到

$$\rho C_p \overline{(w'\theta')}_0 = 0.65 Q_* + Q_F, \quad (4)$$

Q_* 是地面净辐射; Q_F 是人工热源产生的热通量,兰州城区平均为 20Wm^{-2} 。

Holtslay 等^[6]提出对地面净辐射的如下参数化公式:

$$Q_* = \frac{(1-r)K\downarrow + C_1T^6 - \sigma T^4 + C_2N}{1 + C_3}, \quad (5)$$

C_1, C_2, C_3 均为经验常数; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; N 为总云量; r 为地面反射率; $K\downarrow$ 为到达地面的太阳短波辐射, 本文用二流近似法计算烟雾层的影响; T 为百叶箱高度的气温。

混合层顶部的夹卷热通量按 Tennekes 的公式参数化^[7]。

选择天气系统影响不大的 1989 年 12 月 15 日作为检验模式的个例, 假定 $W(h) = 0$, 并以 8:00 的位温廓线作为初始值。图 3 表明模拟结果与实测混合层高度基本相符。14:00 模拟结果略有偏高, 原因是本地区在午后常出现局地下沉气流^[8], 影响混合层发展。计算还表明, 在相同的地表热通量情况下, 若不存在烟雾层加热的作用, 则混合层发展高度可以增加。

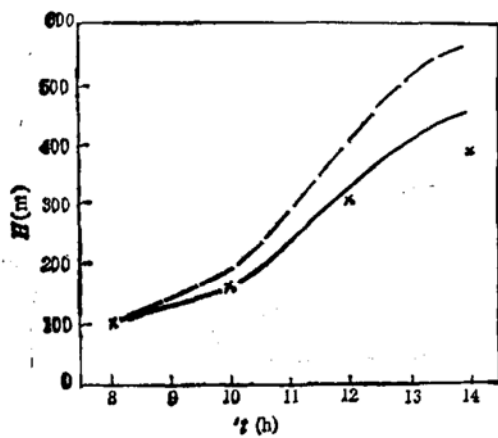


图3 1989年12月15日混合层高度的实测值(*), 模拟值(—)、不考虑烟雾层作用时的模拟值(---)

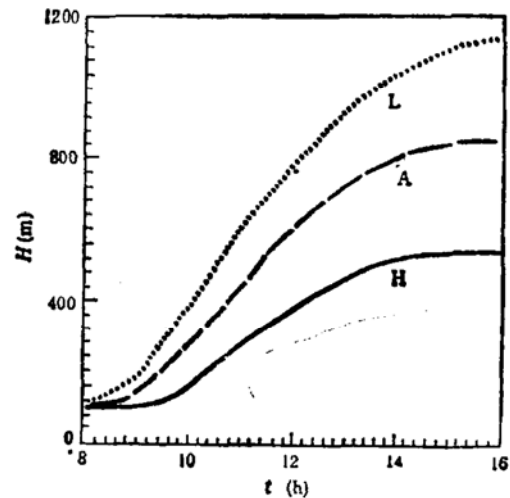


图4 烟雾层不同光学厚度对混合层高度的影响

图4表示了模拟的兰州城市烟雾层的存在对混合层发展的影响。由于受到地表湍流热通量减小和覆盖逆温层被加热的双重作用, 重污染状况下混合层的最大发展高度比轻污染状况下降低了 590m。污染大气使混合层发展受到抑制, 意味着城市大气扩散能力的减弱。因而可以认为, 城市大气气溶胶粒子浓度对大气扩散能力有反馈作用, 即气溶胶粒子浓度增加, 则混合层高度降低, 大气扩散能力减弱, 从而更有利于气溶胶粒子的积累。

由上述结果看到, 在大气自净能力较差的地区, 某些气象气候因子对大气污染物的浓度是相当敏感的。

参 考 文 献

- [1] Oke, T. R., *Boundary Layer Climates*, 2nd ed., Methuen Co., London, 1987, 280—284.
- [2] 王栋梁、邱金恒, 大气科学, 1988, 12: 75—81.
- [3] Meader, W. E., Weaver, W. R., *J. Atmos. Sci.*, 1980, 37: 630—643.
- [4] Paltridge, G. W., Platt, C. M. R., *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1976, 85—87.
- [5] Twitty, J. T., Weinman, J. A., *J. Appl. Met.*, 1971, 10: 725—731.
- [6] Holtslag, A. A. M., Ulden, A. P. V., *J. Clim. and Appl. Met.*, 1983, 22: 517—529.
- [7] Tennekes, H., *J. Atmos. Sci.*, 1973, 30: 546—549.
- [8] 陈长和、黄建国等, 科学通报, 1983, 28 (9): 546—549.