

夜间逆温层高度的预报

蒋瑞宾 张江印

(北京气象学院)

提 要

本文用一维非定常位温方程,考虑湍流垂直输送和夜间长波辐射冷却作用,导出了晴空夜间逆温层高度的预报方程,并用成都双流机场的实测资料进行了计算。结果表明预报方程的计算结果与实测情况符合较好。

一、引 言

关于夜间边界层的研究,国内外已做了许多工作。一般来讲,对平坦地形、小风晴空情况下边界层内的温度变率可以只考虑湍流的垂直热量输送和长波辐射冷却作用。Yamada^[1]曾提出一个夜间逆温高度的预报公式。他采用统计方法对实测资料拟合得出位温和长波辐射变温率与逆温高度的关系,而近地面湍流热通量则采用一个平均值,这样得到的预报方程形式比较简单,但通用性则较差。我们采用对实测资料直接计算的方法,由上一时刻逆温层的高度求取下一时刻逆温层的高度。这样做原则上适合所有平坦地形的情况和任一时间。

二、预报方程的导出

在近似满足水平均匀的平坦地形条件下,位温变化率可由下式表示:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{w'\theta'}) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r \quad (1)$$

其中 θ 和 θ' 分别为位温的平均值和涨落值, w' 为垂直速度的涨落值, $-\overline{w'\theta'}$ 为湍流热通量, $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r$ 为由于长波辐射引起的位温变化率。

将方程(1)两侧从 $z=0$ 到 $z=h$ (逆温层高度)积分得:

$$\int_0^h \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = (\overline{w'\theta'})_0 - (\overline{w'\theta'})_h + \int_0^h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r dz \quad (2)$$

变换(2)式左侧微积分顺序,则上式化为:

1986年10月21日收到,1987年3月19日收到修改稿。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h \theta dz - \theta_h \frac{\partial h}{\partial t} = (\overline{w'\theta'})_0 - (\overline{w'\theta'})_h + \int_0^h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r dz \quad (3)$$

根据成都双流机场实测资料,在稳定边界层内,位温廓线可以表示成如下的参数化形式:

$$\theta = \theta_0 + (\theta_h - \theta_0) \cdot a \left(\frac{z}{h} \right)^b \quad (4)$$

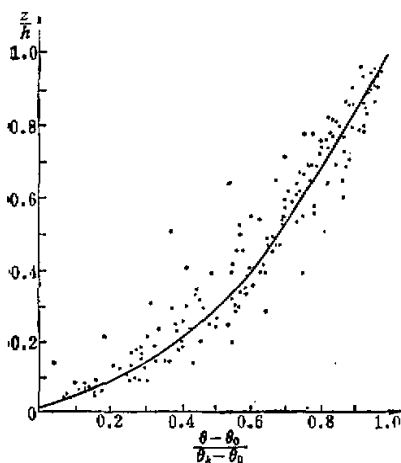


图 1 冬季晴夜成都双流机场系留探测资料参数化的位温廓线

式中 θ_0 和 θ_h 分别表示 $z = 0$ (地面) 和 $z = h$ (逆温层顶) 处的位温; $b = 0.68$, a 很接近于 1, 为满足边界条件, 我们取 $a = 1$. 实测资料分布如图 1 所示.

由(4)式积分得:

$$\int_0^h \theta dz = h(A\theta_h + B\theta_0)$$

式中 $A = \frac{a}{1+b} = 0.625$, $B = 1 - A = 0.375$.

将上式代入(3)式左边得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h \theta dz - \theta_h \frac{\partial h}{\partial t} &= B(\theta_0 - \theta_h) \frac{\partial h}{\partial t} \\ &+ h \left(A \frac{\partial \theta_h}{\partial t} + B \frac{\partial \theta_0}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式并考虑在逆温层顶端流热通量为零, 用 $(\overline{w'\theta'})_0 = -u_*\theta_*$ (u_* , θ_* 分别为摩擦速度和摩擦位温) 经整理得:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{B(\theta_h - \theta_0)} \left[\left(A \frac{\partial \theta_h}{\partial t} + B \frac{\partial \theta_0}{\partial t} \right) h + u_*\theta_* - \int_0^h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r dz \right] \quad (6)$$

考虑在地面和逆温层顶长波辐射冷却起主要作用, 即

$$\frac{\partial \theta_h}{\partial t} \approx \left(\frac{\partial \theta_h}{\partial t} \right)_r; \quad \frac{\partial \theta_0}{\partial t} \approx \left(\frac{\partial \theta_0}{\partial t} \right)_r$$

这样(6)式可写成:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{B(\theta_h - \theta_0)} \left\{ \left[A \left(\frac{\partial \theta_h}{\partial t} \right)_r + B \left(\frac{\partial \theta_0}{\partial t} \right)_r \right] h + u_*\theta_* - \int_0^h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r dz \right\} \quad (7)$$

上式即为逆温层高度的预报方程, 右端各项均可由每次实测值计算, 由此预报下一时刻的逆温层高度。预报时段可取 2—4 小时。

三、地面垂直湍流热通量的计算

对稳定层结情况, 在近地层中位温和风速廓线满足如下对数加线性律^[2]:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} + \frac{\beta}{L} (z - z_0) \right] \quad (8)$$

$$\theta = \theta_0 + \frac{\theta_*}{k} \left[0.74 \ln \frac{z}{z_0} + \frac{\beta}{L} (z - z_0) \right] \quad (9)$$

式中 z_0 为粗糙度,

$$L = -u_*^3 / \frac{g k w' \theta'}{\theta} = u_*^3 / \frac{g k \theta_*}{\theta} \text{ 为 Monin-Obukhov 长度,}$$

k 为卡曼常数,

β 为一常数.

如在近地层两高度 z_1 和 z_2 上分别测得该处风速 u_1 和 u_2 , 位温 θ_1 和 θ_2 , 则由 (8) 和 (9) 式可得

$$u_* = \frac{k[u_1(z_2 - z_0) - u_2(z_1 - z_0)]}{(z_2 - z_0) \ln \frac{z_1}{z_0} - (z_1 - z_0) \ln \frac{z_2}{z_0}} \quad (10)$$

$$\theta_* = \frac{k(\theta_2 - \theta_1)}{0.74 \ln \frac{z_2}{z_1} + \frac{\beta}{L} (z_2 - z_1)} \quad (11)$$

$$\frac{\beta}{L} = \frac{u_1 \ln \frac{z_2}{z_0} - u_2 \ln \frac{z_1}{z_0}}{u_2(z_1 - z_0) - u_1(z_2 - z_0)} \quad (12)$$

其中

由 (10)、(11)、(12) 三式即可由实测资料求出 u_* 和 θ_* , 从而确定地面垂直湍流热通量 $u_* \theta_*$.

四、 $\int_0^h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r dz$ 的计算

由于低层大气中水汽含量比 CO_2 一般大一个量级, 且水汽对长波辐射的吸收带也较宽, 因此, 在计算长波辐射变温率时我们只考虑水汽的影响, 用薄层通量法⁽³⁾, 采取比辐射率近似求取晴夜边界层内各高度上的长波辐射变温率.

在高度 z 处由于长波辐射引起的变温率为:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r = \frac{1}{\rho c_p} \frac{dF(z)}{dz} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{du}{dz} \frac{dF(z)}{du} \quad (13)$$

式中 $F(z) = F \downarrow(z) - F \uparrow(z)$ 为通过 z 高度平面向下的净辐射通量密度; c_p 为空气的定压比热; ρ 为空气密度; u 为水汽的光学路径, 用下式表示:

$$u = \int_0^z \rho q \left(\frac{p}{P} \right)^{0.9} dz = - \int_{p_z}^{p_0} \frac{q}{g} \left(\frac{p}{P} \right)^{0.9} dp \quad (14)$$

式中 q 为混合比; p_0 、 p_z 分别为地面和 z 高度处气压; g 为重力加速度; $P = 1000 \text{ hPa}$.

我们把计算区域分成若干层, 由实测资料用 (13) 式计算出各层的 $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r$, 然后求出:

$$\int_0^h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_r dz = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{r,i+1} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{r,i} \right] (h_{i+1} - h_i) \quad (15)$$

其中 $h_0 = 0$; $h_{i-1} = h_i$.

五、计算结果与实测资料的比较

1985 年 12 月 15 日至 1986 年 1 月 14 日我们在成都双流机场用系留探测系统进行了边界层垂直结构的探测。探测时间为 18 点到次日 10 点,每隔 1~2 小时探测一次,探测高度约为 500m。共获得 160 个时次风、温、压、湿的廓线资料。该地地形为平坦草地,风速一般在 1~5m/s,温度一般为 -1~7℃。

我们用 1985 年 12 月 31 日至 1986 年 1 月 1 日和 1986 年 1 月 9 日至 10 日两个晴夜 12 次实测资料进行了计算。计算时间步长取为两小时。计算 u_* 和 θ_* 时取 10m 和 20m 左右两个高度的实测值。粗糙度 z_0 根据实测资料计算取为 0.2m。

计算结果和实测逆温高度比较如图 2 和图 3 所示。由图可以看出,两者符合较好,它们最大误差不超过 18%。

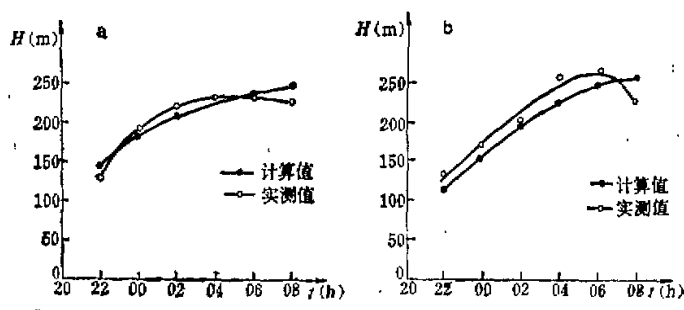


图 2 夜间逆温层高度的变化
a: 1985 年 12 月 31 日—1986 年 1 月 1 日 b: 1986 年 1 月 9—10 日

六、结 语

以上分析表明,在平坦均匀地形、晴夜小风情况下,讨论边界层的发展,可以只考虑长波辐射冷却和湍流垂直输送而忽略其它作用。由此导出的夜间逆温层高度预报方程,计算不很复杂,一般微机均可胜任,计算结果与实际情况比较接近。

本文为逆温层高度的短期预报提供一个简单、实用的方法,以供局地污染物扩散研究和机场消雾等工作参考使用。

参 考 文 献

- [1] Yamada, T., 1979, Prediction of the nocturnal surface inversion height, *J. Appl. Meteor.*, **18**, 4, 526—531.
- [2] Businger et al., 1971, Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 2, 181—189.
- [3] Garratt, J. R. and R. A. Brost, 1981, Radiative cooling effects within and above the nocturnal boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 12, 2730—2746.