

行星边界层中多极值风速廓线的研究

李兴生 朱翠娟 刘林勤 郑爱英 周明煜

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用北京325米气象塔及声雷达探测资料分析了夜间平稳天气条件下行星边界层中风速出现多极值的现象。分析指出,多极值风速与边界层中多层逆温有密切的联系,当逆温场出现多层逆温并维持一定的强度和一段时间后,便相应地出现了多层风速极大,风速极大值出现的高度在逆温顶附近或稍高。

文内还用一维非定常模式模拟了多极值风速廓线的形成。

一、前 言

在行星边界层中,一般说来,风速廓线呈爱克曼螺旋线分布,但实际风速垂直分布比较复杂,经常偏离爱克曼螺旋线,有时风速分布还出现一个极大值,甚至低空急流,在这方面已有不少工作。但是北京325米气象塔时空连续观测指出,在塔层内风速垂直分布在夜间经常可出现两个、甚至两个以上的风速极大值。风速的这种多极值现象对大气边界层内污染物的输送和扩散,飞机的起飞和降落等有着直接的影响。而多极值风速的分布问题至今还很少研究。

由气象塔观测资料并结合常规天气图及探空资料分析指出,风速的多极值与温度的多极值有密切的联系;而且,与一定的天气形势相联系,当大尺度天气形势有锋面过境时,或有高空槽线过境时、或在锋前暖区不稳定气团中,对流层中下部由位势不稳定引起强烈下沉运动时,大气层结曲线内经常出现锋面逆温或下沉逆温,逆温层附近有一个风速极大区与之相伴随。当下沉运动以及与之相伴随的风速极值进入边界层时,与近地面层的辐射逆温相伴随的风速极值间形成两个风速极值,风速大值区由塔层上部逐渐下降,最后与低层的风速极大区相合并。

另一种较频繁的风速多极值现象出现在夜间的平稳天气条件下,特别是由地面高压控制下的晴好天气,风力不大,可以发现夜间塔层内经常有两层逆温以及与之相伴随的两个风速大值区出现。本文将重点分析这类风速多极值形成的条件和机制,至于在晴天小风的平稳天气条件下边界层中温度多极值结构的形成问题,我们将另文予以讨论。

二、统计结果

这里只研究夜间平稳天气条件下风速多极值形成的统计结果,也就是只统计在晴朗夜晚,塔层内最大风速一般小于或等于5米/秒情况下风速多极值现象发生、发展的规律。统计的资料是北京325米气象塔从1979年8—9月;1979年12月至1980年2月取得的风和温度的连续观测资料。其统计结果如下:

夜间晴好天气条件下,气象塔高度内各个季节都经常可以观测到两层风速极值存在,而两层风速极值往往与两层逆温紧密联系在一起,一层是近地面层的辐射逆温,另外,在200米高度附近还有一个逆温层,这样在塔层内出现了两层温度极值。在上述统计日期内,夜间出现两层逆温为31次,其中伴随有两层风速极值为23次,因此,两层逆温建立以后出现两个风速极值的机率可达74%。两层温度极值的建立通常早于两层风速极值的建立。风速极值出现的高度在温度极值高度的附近或稍高一些部位上。

两层风速极值的出现与温度曲线的逆温强度有关,在大多数情况下,塔层内温度的垂直变化率相当于达到 $2^{\circ}\text{C}/100$ 米左右的强逆温条件时,有可能在逆温顶附近出现相应的风速极大值。

两层风速极值消失的时间也常常要早于两层逆温消失的时间,一般在清晨,下面的辐射逆温开始减弱,常常是塔上相邻二层间(约20米)的温差在 0.3°C 以下时,低层的风速极值随之减弱而消失。显然,两层风速极大维持的时间要比两层温度极值维持的时间短,一般为2—3小时,最长可达5—6小时,有时亦出现时建时消的不连续现象。表1中列举了两层逆温和两层风速极值生消过程的一些例子,可以较为清楚地反应出这种规律。

表1 塔层内温度极值和风速极值生消实例

	建 立 时 间	高 度	消 失 时 间
第一逆温层	① 79.9.10日1时30分	32米	7时60分
	② 79.9.14日17时16分	15米	15日8时60分
	③ 79.9.15日19时18分	15米	16日7时25分
	④ 79.9.16日17时12分	15米	17日9时50分
第二逆温层	① 79.9.10日5时01分	120米	9时01分
	② 79.9.15日3时10分	200米	15日9时20分
	③ 79.9.16日4时00分	160米	16日8时15分
	④ 79.9.17日3时35分	160米	17日11时01分
第一风速极值	① 79.9.10日5时05分	32米	6时60分
	② 79.9.15日4时60分	32米	15日7时25分
	③ 79.9.16日5时45分	47米	16日5时30分
	④ 79.9.16日17时45分	47米	17日6时05分
第二风速极值	① 79.9.10日5时35分	160米	6时60分
	② 79.9.15日5时35分	180米	15日8时20分
	③ 79.9.16日5时20分	160米	16日7时10分
	④ 79.9.17日5时15分	140米	17日6时20分

三、个 例 分 析

平稳天气条件出现两层风速极值的天气形势最常见的是在地面高压控制下,也有一些出现在鞍形场中心附近。

1979年9月15—16日北京地区正处在高压中心后部的晴好天气下,气象要素场有明显的局地日变化规律。从气象塔上风、温场的演变规律,可以清楚地看到两层风速极值的建立与温度场的关系:从15日晚20时开始,塔层内就有弱的两层逆温建立,两层逆温的形势时建时消。到16日4时00分,塔层内出现稳定而明显的两层逆温,第一个逆温顶高度大约在30—40米高度上,第二个逆温顶高度大约在220米高度附近,温度垂直变率也较大,塔上相邻两层(约20米)的温差可达 $0.4-0.5^{\circ}\text{C}$,两层逆温于7时20分消失。15日白天至24时,塔层内风向均为偏南风,之后,在塔的低层和中部间或出现一些偏北风,至16日03时以后,塔的低层(40米高度以下)和中部(140米附近)分段出现了较为稳定的偏北风层,尤其是塔的中部偏北风较厚,达80—90米,它一直维持到7时10分消失。这段偏北风的维持与山区地形局地环流的演变有关,显然与上述4时00分至7时20分期间两层逆温的建立就有明显关系,风向的转换先于两层逆温建立约1个半小时。15日白天至午夜,风力一直很小,但当两层逆温建立以后约一个半小时(即16日5时20分左右),塔层中部的偏北风增大到2米/秒以上,并在塔层内形成两层风速极值,图1即为这段时间塔层内的风、温廓线。为简单起见,这里只给出5时25分至6时15分期间每隔10分钟一张的风、温曲线,从中可以清楚地看到与两层逆温相配合的两层风速极值区:第一个风速极值在40—50米的高度附近,第二个风速极值在140米附近,风速极值的位置略高于逆温层顶。从上述风、温廓线的演变规律与位置高度可以较为清楚地看到它们之间的相互关系。

两层逆温与两个风速极值的关系从声雷达回波图片上可以直观地看到。图2即是1979年8月28日20时至29日01时声雷达回波照片,图例指出,从19时以后,除在60—70米高度内有一层逆温回波外,在200米高度附近又有一层逆温回波。23时45分之后,除在100米附近有一强逆温回波外,在200米附近还有一逆温回波。4时02分以后,上层回波开始下降,并在100米高度范围内维持明显的两层逆温。分析塔层内的温度

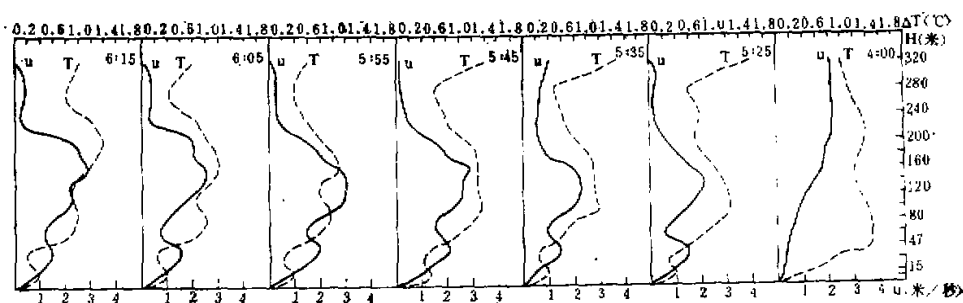


图1 1979年9月16日5时20分—6时20分塔层内风、温廓线

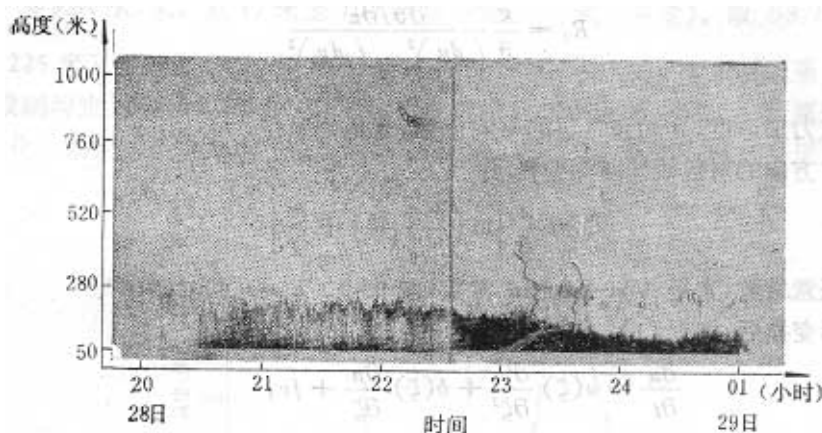


图2 1979年8月28日20时至29日01时声雷达回波照片

探测廓线后可以看到,从28日19时至29日晨08时一直有两层逆温存在,时强时弱,这种层结结构与声雷达图片上逆温回波的位置十分吻合。23时之后,风速垂直分布廓线在塔层中出现多极值,尤其是在01—03时之间,风速两极值的结构更清楚、稳定,它与温度两层逆温的位置配合一致,图中曲线就是塔上直接测量到的风温廓线与声雷达回波位置的配合情况,点曲线为温度廓线,实线为风廓线。

四、两层风速极值的一维非定常数值模拟

统计结果表明,夜间两层逆温建立后约1小时左右经常出现两层风速的极值;换言之,两层逆温的维持导致了两层风速极值的建立。因此,这里仅仅考虑在两层逆温建立和维持的情况下,讨论两层风速极值形成的原因。考虑的方程是水平均匀一维非定常问题, x 轴沿等压线方向,并引入地转风 u_g ,则基本方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

其中 u, v 分别为平行和垂直于等压线方向的风速分量, f 是柯氏参数, K 为湍流交换系数。取 K 的形式为^[1]:

$$K = l^2 \left[\left(\frac{du}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{R_i}{R_{ic}} \right) \quad (3)$$

其中

$$l = k(z + z_0) / \left(1 + \left(\frac{z}{z_m} \right)^{5/4} \right) \quad (4)$$

这里的 $z_m = 736 u_* \times 10^{-4} f^{-1}$, z_0 为粗糙度高度, u_* 为摩擦速度, R_{ic} 为临界里查逊数,取0.25。 R_i 为里查逊数,定义为:

$$R_i = \frac{g}{\bar{\theta}} \frac{\partial \theta / \partial z}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2} \quad (5)$$

其中 g 是重力加速度, $\bar{\theta}$ 为该气层的平均位温, θ 是位温.

引入 z 方向的对数线性座标变换^[2]:

$$\zeta = \frac{A}{k} \left[\ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + \frac{z}{\lambda} \right] \quad (6)$$

其中 A 为任意常数, k 是 Von-Kármán 常数, 取 0.40, $\lambda = 0.00027 u_g f^{-1}$.

经座标变换后, 方程 (1), (2) 可以改写成:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a(\zeta) \frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} + b(\zeta) \frac{\partial u}{\partial \zeta} + f v, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a(\zeta) \frac{\partial^2 v}{\partial \zeta^2} + b(\zeta) \frac{\partial v}{\partial \zeta} - f(u - u_g), \quad (8)$$

其中

$$a(\zeta) = K \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} \right)^2, \quad (9)$$

$$b(\zeta) = K \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} \right)^2 \cdot \frac{\partial K}{\partial \zeta}. \quad (10)$$

对方程求数值解, 采用等间距差分网格, 方程的差分格式取如下形式:

$$\frac{u_i^{t+1} - u_i^t}{\Delta t} = a_i^t \frac{u_{i+1}^{t+1} - 2u_i^{t+1} + u_{i-1}^{t+1}}{(\Delta \zeta)^2} + b_i^t \frac{u_{i+1}^{t+1} - u_{i-1}^{t+1}}{2\Delta \zeta} + f v_i^{t+1} \quad (11)$$

$$\frac{u_i^{t+1} - v_i^t}{\Delta t} = a_i^t \frac{v_{i+1}^{t+1} - 2v_i^{t+1} + v_{i-1}^{t+1}}{(\Delta \zeta)^2} + b_i^t \frac{v_{i+1}^{t+1} - v_{i-1}^{t+1}}{2\Delta \zeta} - f(u_i^{t+1} - u_g) \quad (12)$$

其中自变量 u, v 右上角的符标表示积分时间, 右下角的符标表示空间网格的位置, Δt 表示时间积分步长, $\Delta \zeta$ 表示空间网格间距.

边界条件:

$$\zeta = 0, \quad u = v = 0. \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{A}{k} \left[\ln \frac{z_h + z_0}{z_0} + \frac{z_h}{\lambda} \right], \quad u = u_g, \quad v = 0 \quad (14)$$

其中 h 表示边界层顶高度.

计算步骤如下:

首先从方程 (7)、(8) 算出中性层结条件时的解 $u_i^{(0)}, v_i^{(0)}$ 作为方程 (11)、(12) 的初值, 由 $u_i^{(0)}, v_i^{(0)}$ 通过 (5) 式和 (3) 式算得 $K_i^{(0)}$. (5) 式计算时 $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 取已知的固定不变的两层逆温的分布值.

将上述初值和边界条件 (13), (14) 代入方程 (11)、(12) 进行迭代计算, 若迭代值满足 $|u_i^{t+1}[v] - u_i^{t+1}[v-1]| \leq \varepsilon$ 与 $|v_i^{t+1}[v] - u_i^{t+1}[v-1]| \leq \varepsilon$ 时, 表示该一积分时间的迭代完毕, 其中方括号内的符标 v 表示迭代顺序. 计算中为了提高低层的分辨率, 取空间网格 $n = 120$ 点, 时间步长为 1 秒.

计算时的参数取 $z_0 = 5$ 厘米, $u_g = 3$ 米/秒, 温度层结从地面至 47 米呈逆温分布,

取 $\frac{\partial \theta}{\partial z} = +0.04^\circ\text{K}/\text{米}$; 从 47 米至 100 米呈中性分布(或弱稳定), 取 $\partial \theta / \partial z = 0$; 从 100 米至 225 米又呈逆温分布, 取 $\partial \theta / \partial z = +0.004^\circ\text{K}/\text{米}$; 从 225 米以上至 1 公里呈中性层结(或弱稳定), 取 $\partial \theta / \partial z = 0$, 温度层结整层分布如图 3a 所示, 在计算过程中不随时间 t 变化。初始时刻的风场随高度呈对数线性分布, 如图 3b 中点曲线所示。

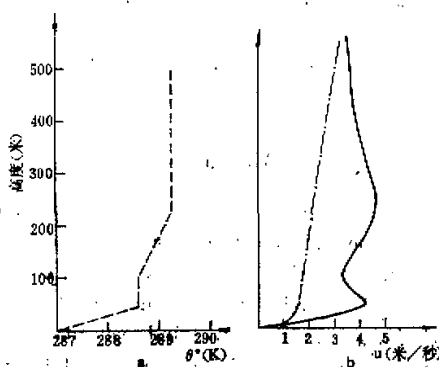


图 3 温度场和风场的垂直廓线分布

当计算进行到 112 分钟时, 风速分量 u 在低层出现了明显的两个极值(如图 3b 中实线所示), 一个极值为 4.2 米/秒位于 45 米高度处, 另一个极值为 4.7 米/秒位于 235 米高度处。两个风速极值的位置正好略高于逆温极值的位置, 而两个逆温极值的位置分别位于 40 米和 225 米。计算表明, 温度层结的分布直接影响交换系数 K 值曲线的分布形式, 计算进行到上述时刻时, K 值曲线同样出现两个极值。由计算方程可知, K 随高度的分布形式在两层风速极值的形成过程中起着十分重要的作用。

两层逆温的存在逐渐影响里查逊数 R_i 的分布, 在逆温存在的高度内 R_i 数为正值, 在中性层结高度内 R_i 数基本为零。因此, 两层逆温促使 R_i 数出现两个极值。由 (3) 式可知, R_i 数的大小又直接影响 K 值的分布, R_i 数为正值时 K 值减小; 换言之, 在逆温高度内 K 值受到抑制, 湍流交换减弱, 结果 K 值在两层逆温情况下也出现两个极值, 这样的分析和计算结果是吻合的, 交换系数 K 在逆温顶附近的值最小, 由此动量不断由上向下传送, 在逆温顶附近堆积; 另一方面因湍流摩擦在逆温顶附近不断减小, 最后运动方程 (1)、(2) 式右端项变得不平衡, 出现了地转偏差, 这将造成风速矢在方向上有一个加速度^[3], 在湍流摩擦不断减小时风速出现超地转, 结果在两层逆温顶附近分别出现了风速极值。

上述模式仅仅探讨了两层逆温对两层风速形成的关系, 但实际上风场和温度场是相互影响的, 特别是两层风速极值形成后将对温度场起反馈作用, 关于风温场之间的相互作用问题将另作研究。

参 考 文 献

- [1] Blackadar, A. K.. Modeling the nocturnal boundary layer, The symposium on atmospheric turbulence diffusion and air quality, p. 46—49, 1976.

[2] Hangen, D. A., Workshop on micrometeorology, p. 222, 1973.

[3] 李兴生、叶卓佳、刘林勤, 夜间低空急流的分析研究 (即将发表).

A STUDY ON MULTI-LEVEL WIND VELOCITY PROFILE IN THE PLANETARY BOUNDARY LAYER

Li Xing-sheng Zhu Cui-juan Liu Lin-qin et al.

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, the multi-level wind velocity in the nocturnal steady state PBL is analysed, using the data of the 325 meter meteorological tower and acoustic sounder. It is indicated that the multi-level wind velocity is always associated with multi-level inversion. When a multi-level inversion with a significant strength exists and lasts a considerable period of time, a multi-level wind velocity occurs correspondingly. The height of the wind velocity maximum is near the top of the inversion.

The formation of the profile of the multi-level wind velocity is simulated with a one-dimensional non-steady model.