

夜间低空急流的分析研究

李兴生 叶卓佳 刘林勤

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用北京 325 米气象塔取得的连续观测资料,分析了 1979 年 9 月 5 日夜间低空急流风温场的时空演变过程,这种低空急流的极值在夜间达到最大,其极值位置与逆温层顶的生长密切配合。低空急流是超地转的,超地转气流有一个惯性振荡周期。

低空急流的发展是起伏式的。急流的消散较快,当 $Ri \leq 0.25$ 达到切变不稳定的临界条件时加速崩溃。

一、引 言

大气边界层内水平风速的垂直分布常常在几百米的高度上出现一个显著的极大值,即低空急流。低空急流是大气边界层的一种重要现象,它对国民经济和国防建设有重要的现实意义:急流下部的强风速切变对飞机的起飞着陆至关重要^[1],这种强风速切变甚至对超音速飞机也有威胁作用^[2]。它还影响火箭和导弹发射的准确率^[2]。低空急流对污染物的输送有明显的影响^[3]。另外低空急流和强天气有密切的关系。风的极大值还影响着森林火灾的蔓延^[4]。

Y. Izumi (1964)^[5] 等利用美国西达山 (Cedar Hill) 1420 英尺的高塔对夜间低空急流的生成和消散做了细致的分析,认为夜间低空急流的崩溃主要和日出后低层增热对流混合有关;但实际观测表明,急流的生命期有长有短,而日出后太阳对地面加热只是一部份低空急流崩溃的外部原因。本文利用北京 325 米气象塔 1979 年 9 月 5—6 日的资料对低空急流的生成,特别是低空急流加速崩溃的内部因子作了进一步的分析研究。

二、天气形势

1979 年 9 月 5 日 14 点地面天气图上有一条冷锋位于太原、石家庄一线,北京处于锋前暖区,有小阵雨。5 日 17 点地面天气图上冷锋已过北京,锋面位于承德、天津、太原一线,北京天气转晴,20 点锋面移到山海关、德州一线,北京处于偏北气流中(图 1)。9 月 5 日 20 点 850 毫巴以及 700 毫巴高空图上的槽线均位于山海关、济南一线,北京处于槽后偏北气流中。

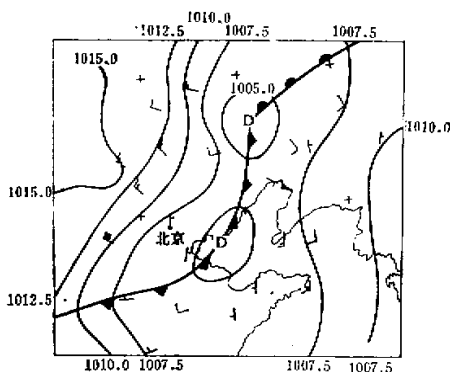


图1 1979年9月5日23点地面天气形势图

因此, 9月5—6日的低空急流是属于偏北气流的低空急流。

三、气象塔资料

北京325米气象塔位于德胜门外马甸附近, 风速、风向、温差等感应器分别装在离地面8、15、32、47、65、80、102、120、140、160、180、200、240、280以及320米等十五层高度从塔身伸出来的活动伸臂上, 另外在地面还有地面绝对温度仪。塔上输出资料由数据自动化处理系统处理^[7]。

塔上风及温差资料每小时正点前取十分钟, 每分钟各层取一次数据, 因此十分钟取十次风及温差廓线的资料, 将该十次数据平均作为十分钟平均, 以此代表该小时的气象要素平均状态。9月5日23点至6日01点增加了资料输出次数, 在这2小时内, 除上述正点取数外, 还增加了每隔10分钟取数一次的记录。

图2表示9月5日21点至9月6日06点的温度、风速廓线变化图。9月5日17点地面辐射逆温开始出现; 至20点逆温顶离地面15米, 温差 2.3°C 。21点逆温顶上升到47米, 22点逆温顶继续上升到120米。23点中层冷却, 上层明显增暖, 在240米高度处一小时增温 1.5°C , 温度廓线在325米以下出现二个逆温中心, 一个位于15米, 另一个位于240米, 120米与240米之间的温差从22点的 -1.0°C 到23点变为 $+1.1^{\circ}\text{C}$ 。5日24点至6日01点中下层增暖, 上层冷却, 逆温层增厚, 但强度减弱, 接近中性。03点至05点整层温度下降, 逆温层顶下降至120米。03点地面至120米的温差达 1.9°C , 04点达 3.4°C , 05点达 3.6°C 。06点整层温度显著下降, 逆温层顶继续下降至47米, 逆温强度减弱, 温差达 2.9°C 。07点逆温消失。

另外, 从风速廓线变化来看, 5日22点风速廓线出现极值, 高度120米, 与逆温顶位置一致, 风速极值为7.1米/秒, 地面风速为1.6米/秒。23点下层风速显著减小, 上层风速随着逆温层分层增加很快, 最大风速出现在上层逆温层顶之上, 达11.4米/秒。24点上层风速继续显著增大, 最大风速为17.5米/秒, 位于逆温层顶之上的240米高度处, 地面风速增加到3.1米/秒。6日01点的风速继续增大, 风速极值达19.0米/秒, 高度降至180

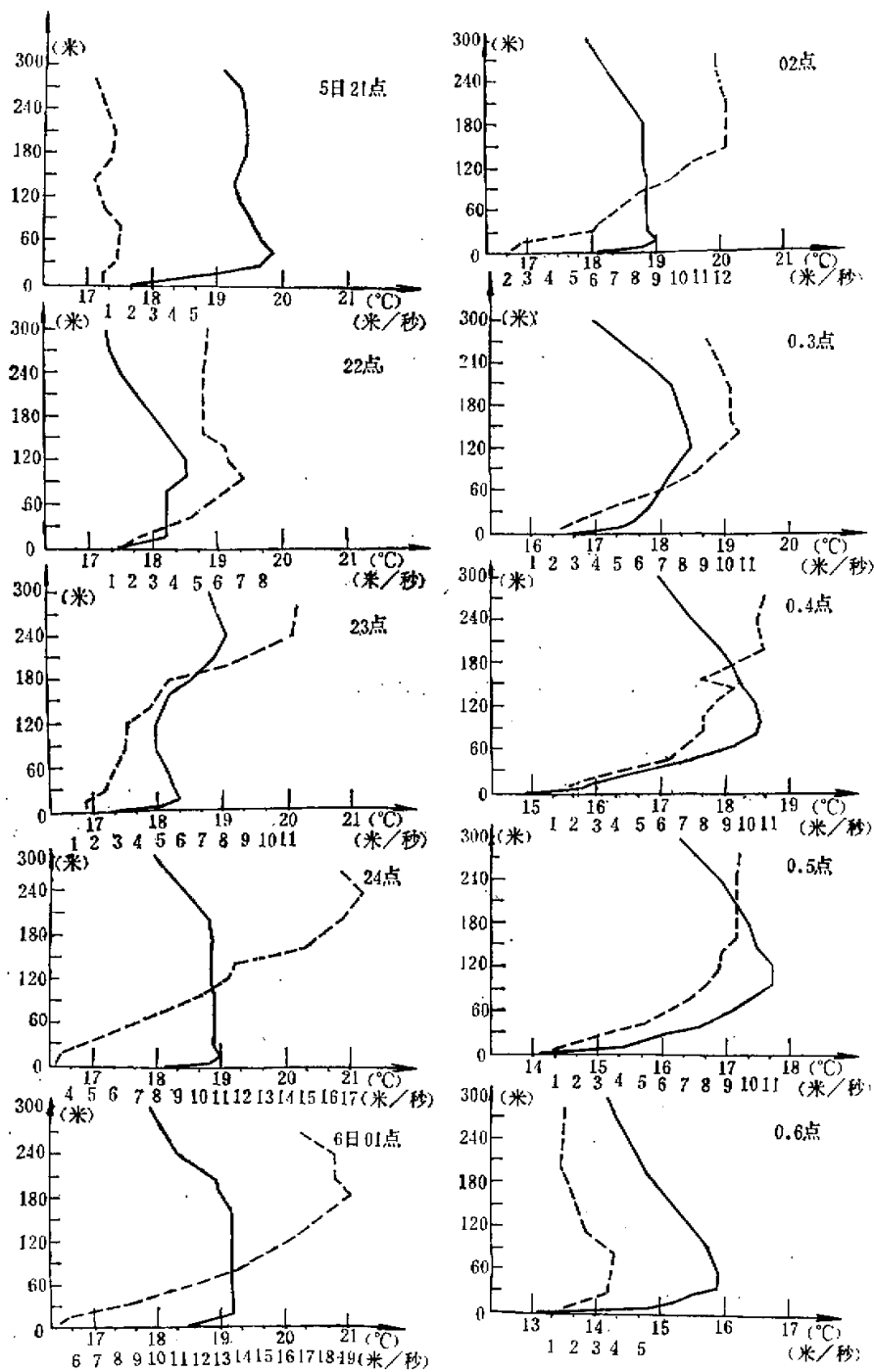
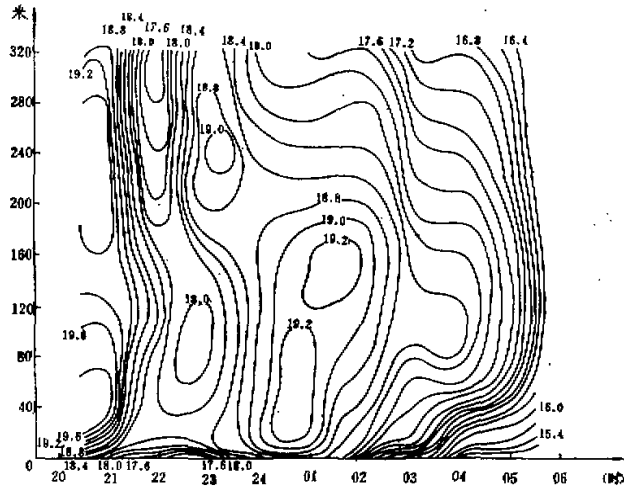


图2 1979年9月5日21点至6日06点温度风速廓线变化图。实线代表温度廓线,虚线表示风速廓线

米,与逆温层顶高度一致,地面风速增至 5.4 米/秒。02 点开始风速显著减弱,极值风速 02 点为 12.3 米/秒,03 点为 10.6 米/秒,高度均在 140 米。04 点有两个风速极值分别为 9.1 米/秒和 10.8 米/秒,高度为 140 米和 200 米,05 点极值风速继续下降到 9.5 米/秒,高度位于 180 米。06 点整层风速大幅度下降,极值风速已降到 4 米/秒左右,低空急流完全崩溃。

图 3 是温度的时空分布图,22 点前上下层温度比较均匀,垂直梯度很小。22 点上层有小股冷空气下沉,23 点该股冷空气中心已影响到 100 米—120 米,图 3 中 23 点温度廓线中层变冷,廓线出现两个逆温极值,可能就是这个原因。23 点至 6 日 02 点,上层空气继续下降增温,底层温度略有增暖,造成上下二个逆温中心合并,因此在 160 米以下是一个较均匀的暖中心。02 点以后,暖中心减弱,并向下移动,03—04 点中心位置在 100 米左右,05 点后上下温度梯度大大减弱,温度等值线成垂直分布。



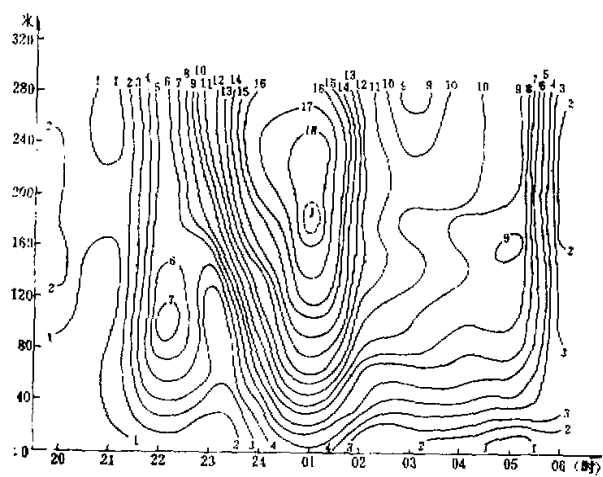


图 4 风速时空分布图

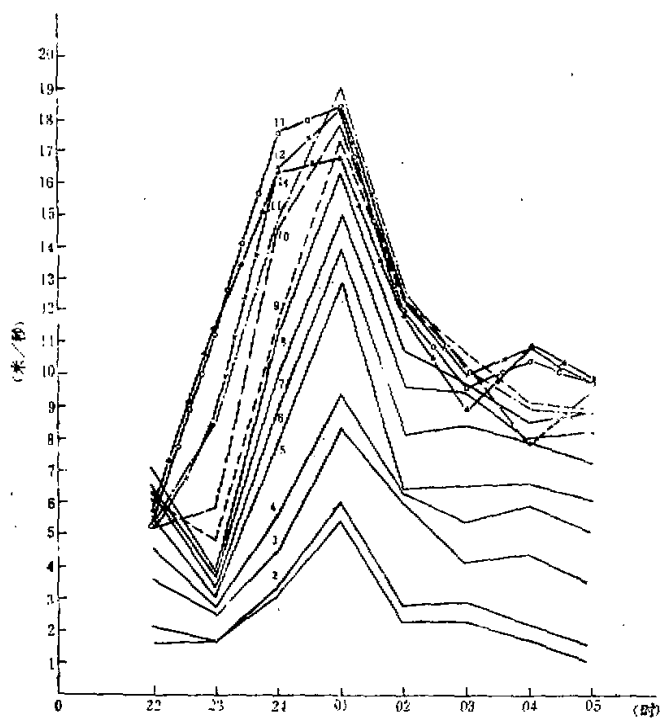


图 5 各层风速的时间演变

四、分析和讨论

9月5日17点由于太阳下山地面辐射冷却,逆温层开始形成,20点以后逆温层逐渐上升加强,塔低层湍流交换受到抑制,下传动量开始在逆温层顶堆积,风速廓线在低层形成极值。23点塔中层冷却,上层下沉增暖,因此上层稳定度大大加强,动量在逆温层顶继续堆积,上层风速显著加强,24点至6日01点塔中层增温,逆温层变厚,但强度减弱,风速在塔中、上层继续显著加强,值得指出的是,这种风速加强,从23点至6日01点每10分钟间隔的记录点划曲线来看,风速的急剧上升呈波动状,其周期约几十分钟。6日01点低空急流在180米高度达最大值为19.0米/秒,从以上的温度场和风场演变可以清楚地看到,由于逆温层的不断加强和增厚,风速极值开始形成和加强,并随着逆温层顶的抬升,极值位置亦随之上升。24点后逆温层加厚但强度减弱,渐趋弱稳定状态;而急流继续加强,风垂直切变也大大加强,23点8米与180米之间的水平风速垂直切变为 0.034秒^{-1} ,而6日01点该两层之间的风速垂直切变已达到 0.08秒^{-1} 的可见程度,这时急流促使空气质点垂直方向的交换加强,这种混合作用对风速极值起光滑作用。我们计算了180米以下的Ri数的时间演变规律,定义Ri为:

$$Ri = (g/\bar{\theta})(d\theta/dz) / \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

Ri为里查逊数, g 是重力加速度, $\bar{\theta}$ 是平均位温, $d\theta/dz$ 为温度层结, du/dz 为风速切变。计算了5日22点至6日05点15米至180米的Ri数演变值(表1),从表中可以看到,Ri值在这段时间内先降后升,5日24点至6日02点的Ri值大大小于0.25,已达到 $Ri \leq 0.25$ 切变不稳定的临界值^[3],湍流由此将加强。因此低空急流从形成、加强到最盛时,由于风速垂直切变的不断加强,上下混合也相继加强,逆温减弱,Ri达到临界切变不稳定时,急流加速崩溃,由图5可以清楚地看到,从6日01点至02点急流极值减弱三分之一强。之后,逆温层顶下降,直到05点后日出,逆温消散,低层风速极值彻底崩溃。

表1 1979年9月5日22点至6日05点北京气象塔15米至180米高度Ri数的演变值

时 间	22	23	24	01	02	03	04	05
Ri	1.00	0.32	0.06	0.06	0.17	0.26	0.32	0.33

为什么有为数不少的低空急流出现在夜间,Blackadar^[9]认为这是边界层内地面摩擦的日变化引起的,它造成了边界层内风速矢的日变化。为简化起见,考虑运动完全是水平的,并假定水平气压梯度力不随高度和时间变化,所以,运动方程可以写成

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - 2\mathbf{\Omega} \wedge \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (2)$$

方程右端白天处于准平衡状态,日落前后湍流摩擦逐渐减小,方程右端变得不平衡,也就是说地转偏差随时间变化,日落后,地面辐射逆温形成和发展,湍流摩擦由此迅速减弱,当摩擦项与方程其它项相比可以忽略时,则方程(2)可以变为

$$\frac{dV'}{dt} = -ifV' \quad (3)$$

其中 $V' = (u - u_g) + i(v - v_g)$ 。这里的 u, v 是全矢量 V 在 x, y 方向的分量; u_g, v_g 是地转风在相应方向的分量。 f 是柯氏参数。

方程(3)的解为: $V' = V'_0 e^{-ift}$ 。即在复平面内地转偏差矢量作等幅顺时针旋转的惯性振动,其周期 $T = 2\pi/f$ (如图6所示)。因此,这种振动可使风速在夜间达到超地转,而形成低空急流。

我们将120米和200米的风速矢进行了矢量平均;5日23点至6日17点的风速矢端迹图见图7。图中还画出了5日20点地面和850毫巴间的平均地转风矢量,可以看出,

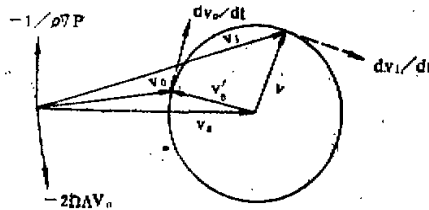


图6 由湍流摩擦日变化引起的风速惯性振动

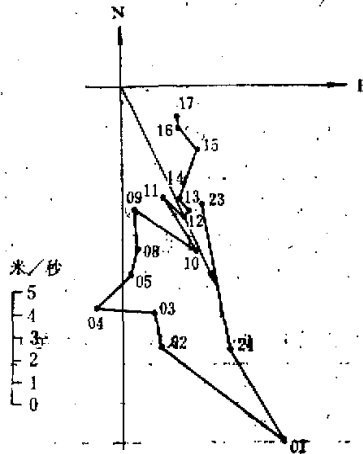


图7 1977年9月5日23点至6日17点风速矢端迹图

5日23点后至6日04点止的风速是超地转的,实测风有近似的惯性振动周期,并顺时针旋转。由图7还可以看到,低空急流极大值出现在半夜01点;考虑到北京是中纬度地区,取柯氏参数 f 为 10^{-4} 秒,不难算得,出现超地转气流极大值的时间应该是日落时间加二分之一的惯性振动周期,约02点,这和上面实际出现的周期是十分相近的,因此这种惯性振动可以用傍晚后摩擦减弱,湍流衰减来解释;当边界层内水平风速垂直切变达到临界切变不稳定时,湍流交换又将加强,它减弱了上述的线性加速作用。表1得到的计算值就是这两种作用的结果,根据上述的物理机制,5日24点超地转气流加强,由此,水平风速的垂

直切变也加强, 这使湍流摩擦又逐渐起作用, 反过来减弱了超地转气流的加强, 所以 5 日 24 点至 6 日 01 点, 急流的极值从 240 米的 17.5 米/秒变为 180 米的 18.9 米/秒只增加了 1.4 米/秒, 24 点后急流极值虽略有加强, 但湍流摩擦的耗散作用明显加强, 超地转气流受到抑制。

在夜间有逆温的情况下, 经常可以观测到风速在逆温层顶出现一个相应的极值, 如果只考虑正压大气的情况, 这个极值的大小和地转风以及地转偏差的大小有关, 而夜间低空急流只是这种现象中的一个突出例子。

致谢: 本文承周明煜同志指正, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Neyland, L. J., Change without notice, *Flying Safety*, 14, p. 16—20, 1956.
- [2] Dutton, M. J., Vertical wind shear in the lowest 600 meters at shoeburyness, *Mct. Mag.*, 104, p. 260—275, 1975.
- [3] Rider, L. J., Low-level Jet at white Sands missile range, *J. Appl. Met.*, 5, p. 283—287, 1966.
- [4] Kaimal, J. C. and Y. Izumi, Vertical velocity fluctuations in a nocturnal low-level jet, *J. Appl. Met.*, 4, p. 576—584, 1965.
- [5] Byram, G. M., Atmospheric conditions related to blowup fires, *Station paper No. 35*, 1954, Southeast Forest Experimental station, Asheville, N.C.
- [6] Izumi, Y., The evolution of temperature and velocity profiles during breakdown of a nocturnal inversion and a low-level jet, *J. Appl. Met.*, 3, p. 70—82, 1964.
- [7] 李兴生、郑达洲、张卫华、吴家麟、朱晋判, 320 米气象塔的自动遥测系统, *气象学报*, 第 99 卷, 第 1 期, 第 70—81 页, 1981.
- [8] Drasin, P. G., The stability of a shear layer in an unbounded heterogeneous inviscid fluid 4, p. 214—224, 1958.
- [9] Blackadar, A. K., Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of the nocturnal inversion. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 38, p. 283—290, 1957.

AN ANALYTICAL RESEARCH ON THE LOWER NOCTURNAL JET

Li Xing-sheng Ye Zhuo-jia Liu Lin-qin

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Detailed continuous information on wind and temperature in the lower atmosphere layer observed at the 325 meters meteorological tower during the evolution and the breakdown of a lower nocturnal jet in the night of 5 September 1979 is analysed. A maximum of the wind speed is observed in the night. The maximum of the wind speed is closely relative to the growth of the top of the nocturnal inversion. The lower jet is supergeostrophic, it is suggested that a period of inertial oscillation is induced.

The evolution of the lower jet is fluctuated. The lower jet is rapidly breakdown when $Ri \leq 0.25$ reach to it's critical condition of the shearing instability.