一次平流雾边界层风场和温度场特征分析

宋润田 金永利

(北京市气象局, 北京 100089)

摘要 利用多普勒声雷达所获取的时间、空间(垂直方向)较为密集的实时资料,分析了1997年12月18日平流雾的温度场和水平风场特征,指出分布于逆温主体内系统性较强下沉运动是逆温增强和维持的主控因子,分布于逆温层和近地层内的系统性上升运动是逆温大幅减弱的主控因子。

关键词 平流雾 声雷达回波强度 逆温层 水平风 垂直运动

1 大尺度环境背景条件

1997年12月17~19日凌晨,北京处在华北地形槽下弱的辐合区中,单站探空17日20:00,混合层高度达410.6 m。逆温强度(γ)为5.84℃/100 m、湿层[($T-T_d$)≤4℃)]厚度达239.4 m。受其影响,北京地区山前平原和怀(柔)密(云)谷地的15个区县出现了持续48 h之久的大雾天气,本次大雾的温度场为多层逆温下的混合层结构[1]。

2 声雷达回波图像及水平风特征

以$0.05<V\leqslant 3.2$代表强逆温主体所对应的回波,参考强逆温外围对应的回波($0<V\leqslant 0.05$)的位置和厚度等特征,从声雷达回波时空剖面(图1)上不难看出逆温的分层结构和波动特征。综观声雷达回波结构,结合水平风时空剖面上风的垂直分布特征及其两者之间的相互关系,可以认为本次大雾时边界层逆温的发展变化可以分为两个阶段,即逆温稳定维持阶段和逆温较大幅度减弱阶段。

2.1 逆温稳定维持阶段

在此阶段(18日01:30~09:40),除近地表逆温(下称近地层逆温),始终相对稳定少变之外,其以上逆温不论从形成原理和外形结构,宏观上应属一层。但如结合水平风时空分布特征,同时考究回波演变,也不难看出在多数时段回波所具有的较为明显的分层结构。其中①01:30~3:40较为明显的分为两层,强度逐渐增强。②03:50~05:30上述两层逆温合并后下沉,强度明显增强,于05:10~05:30与近地层逆温在200 m附近下沉合并,强度达到最强;05:30以后,与近地层逆温下沉合并的中上层逆温成一体大幅度抬升,于06:20~06:30强逆温主体顶高超过350 m,强度有所减弱。③07:20~08:10合并的中上层逆温主体再度趋于分裂,其强度均有所增强;08:10以后,两层逆温同时缓慢抬升,其强度也大幅度减弱,至09:40逆温顶高超过350 m。

水平风时空分布特征(图2):①01:30~05:40(除01:50),自下而上均为一致的偏北风;②05:40以后,在水平风时空剖面上半部,仍保持相当厚度的偏北风,而其下半部总体上为相对较弱的偏南风所控制。③01:30~09:40在水平风时空剖面上半部的偏北气流($v\geqslant 6$ m/s)中,依时序间隔10 min挑取风速的极大值v_{max},其v_{max}的均值达10.72 m/s。其中02:10~03:20在260 m及其以上有20~40 m厚、$v\geqslant 10$ m/s的大风层,高度少变,中心风速极值达12 m/s;03:40~07:40大风层($v\geqslant 10$ m/s)内风速明显增强、厚度也明显加大,03:50~07:40(除07:10)大风层内

中心风速增至 12 m/s 以上,04:00 ~ 06:40 大风层内中心风速极值连续达 14 m/s。大风层最小厚度为 60 m,最大厚度为 160 m; 08:00 ~ 08:30 大风层内风速减小为 10 m/s,厚度维持在 20 ~ 40 m,高度维持在 280 ~ 300 m 之间。

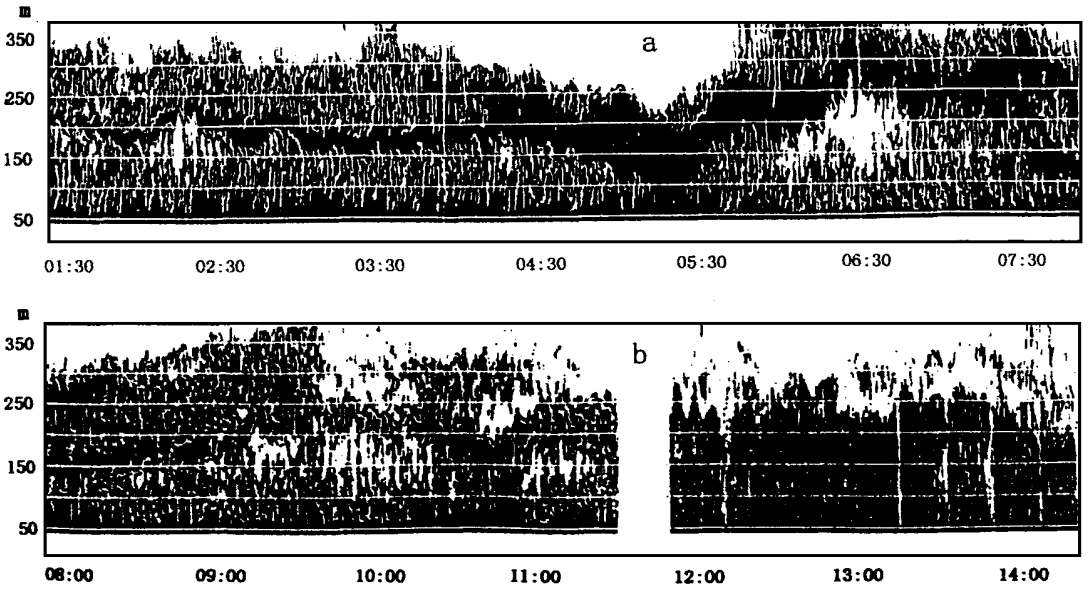

图 1 18 日 01:30 ~ 14:00 声雷达回波时空剖面图 (a) 01:30 ~ 07:30 (b) 08:00 ~ 14:00

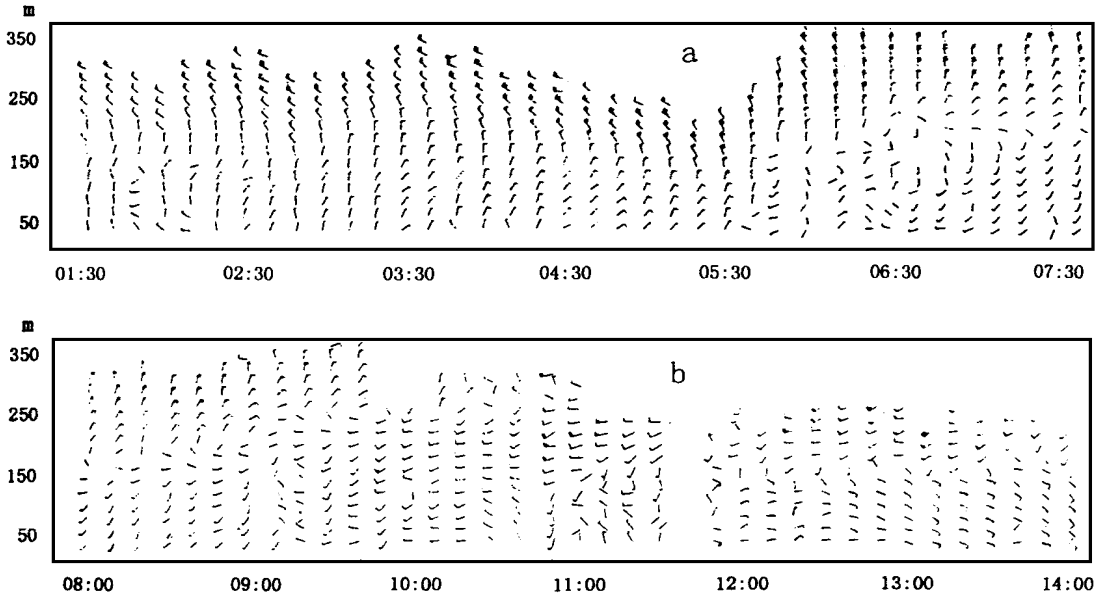

图 2 18 日 01:30 ~ 14:00 声雷达测风时空剖面图 (a) 01:30 ~ 07:30 (b) 08:00 ~ 14:00

纵观 18 日 01:30 ~ 09:40 声雷达回波图像,不论位于近地层逆温之上的强逆温主体成两层或一层结构,在水平风的时空剖面上半部对应的逆温层顶附近始终存在一支厚度不等的较为强劲的偏北气流。09:40 以后位于逆温层顶附近较为强劲的偏北气流趋于消

失,上层逆温也随之消失。

19 日 02:00 前北京处在地面冷锋前暖区华北地形槽下弱的辐合区内,17 日 20:00,北京单站探空 920 hPa(756 m)的风为 6 m/s(315°),18 日 02:00 时北京低空探测 300 m 和 600 m 的风分别为 10 m/s(330°)和 16 m/s(309°),18 日 08:00 时 300 m 和 600 m 的风分别为 4 m/s(278°)和 7 m/s(298°)。由此可知 18 日 09:40 以前在试验基地(东郊机场)的水平风时空剖面上半部始终维持的较为一致的,其 v_{max} 高度与逆温层顶相近的偏北气流及北京探空和低探所测得的低空风是一致的,均属于系统性的较为强劲的低空偏北气流。而位于这支偏北气流下的逆温显然是由系统性偏北气流下沉增温作用而形成的下沉逆温。是较为强劲的偏北气流与其对应的逆温相伴出现的过程,地面处在暖区华北地形槽下弱的辐合区内,由边界层内较为强劲的系统性偏北气流产生下沉增温作用而形成的下沉逆温,对逆温的稳定维持是至关重要的。

偏北气流越强对应产生的下沉增温作用越强,与其对应的逆温强度也越强。从图 1 可以看出,18 日 02:10 ~ 03:20 随着位于 260 m以上的大风层的出现,其中上层逆温同时增强;03:40 ~ 07:40 随着大风层内风速的增强,厚度增加,中上层逆温同时进一步增强,逆温主体合并,逆温层厚度随大风层厚度的增加而增加。08:00 ~ 08:50 随着大风层风速的减弱,大风层厚度减小,中上层逆温也随之减弱,即下沉逆温强度、厚度的变化与逆温层顶附近较为强劲的水平风速强度及其厚度的变化密切相关,具有明显的脉动性。

近地层逆温始终处在弱的均一风场之中,其发生湍流混合作用远远小于地面辐射冷却作用,比较而言,地面的长波辐射(主要是冷却)作用是近地层逆温稳定维持的重要因素。而在位于中低层逆温之上由较强的动力下沉作用而形成的下沉逆温层内,热量传输方式与近地层逆温不同,主要是湍流混合,而其本身处在较强风切变之下,湍流不易发生发展;同时它也能像盖子一样阻挡上部动量和热量的下传,使得湍流不能在低层稳定大气中发生发展,对近地层即低层逆温的稳定维持也是至关重要的。

2.2 逆温大幅度减弱阶段

18 日 09:40 以后,原位于中低层逆温之上的与偏北气流相伴出现的下沉逆温除 10:10 ~ 11:00在 250 ~ 350 m 有弱的($0.05 < V \leqslant 0.8$)的回波再现之外,其余时次均彻底消散。其逆温总体上已为双层结构,除近地层逆温位置少动外,09:40 以前原位于由偏北气流下沉作用而形成下沉逆温之下的中层逆温基本维持在 150 ~ 250 m,对应回波破碎为狭长条状,强度较逆温稳定维持阶段明显减弱。12:00 以后,逆温自下而上 4 次被击穿破坏。但 10:10 ~ 11:00 出现于 150 ~ 200 m 的较强回波是与顶部再度出现的、与弱的偏北风相联系的下沉逆温残余密切相关的。

失去与较为强劲的偏北气流相伴出现的下沉逆温之后,原位于下沉逆温之下的中层逆温(除 10:10 ~ 11:00 之外)彻底裸露,逆温的总体强度大幅度减弱。从图 1b 可见 240 m以下出现大片 $v \geqslant 4$ m/s 的偏西风或偏东风,动量已经下传,湍流得以发生发展。18 日 08:00 以后受太阳长波辐射的影响,气温大幅度上升,受近地层热力作用和湍流混合的共同作用,逆温强度也大幅度减弱。

3 逆温发展变化的控制因子

影响温度层结发展变化的因子除了加热和冷却、冷暖平流,还有垂直运动[2]。利用声雷达提供的 01:30 ~ 14:00 间隔 10 min、垂直间隔 10 m 的回波强度水平风时空剖面资料,①用正点前 10 min 某一高度平均回波强度作为正点某高度的回波强度,进行等强度线分析;②间隔 10 min 对每一高度的空间风进行水平风和垂直运动(v_z)的分解,并对 v_z 进行分析;③利用分解的水平风,求出平均风对平均温度的平流量作为温度平流,分析冷暖平流的时空分布。

3.1 逆温稳定维持阶段

图 3 为 18 日 01:30 ~ 14:00 中上层逆温对应的回波强度、垂直运动、温度平流时空分布。令 $V = 0.5$ 为强逆温主体所对应的回波强度，$V = 0.05$ 为逆温层顶所对应的回波强度。图 3 中位于近地层逆温之上、$V \geqslant 0.5$ 的等值线围区即为强逆温主体，01:30 ~ 07:30 在强逆温主体区域即近地层逆温之上的逆温层内，基本为冷平流（$RT_m < 0$）所控制。较强冷平流（$RT_m = -10.0 \times 10^{-5}$ ℃·s/m²）特征线随强逆温主体时空分布趋势从中穿过，其较强的系统性的冷平流（$RT_m \leqslant -10.0 \times 10^{-5}$ ℃·s/m²）主要分布于强逆温主体上部，强中心（$RT_m \leqslant -50.0 \times 10^{-5}$ ℃·s/m²）多分布于逆温层顶附近。此时段回波强度并没有因逆温层内存在较强的冷平流而减弱。

07:40 ~ 09:40 强逆温主体区域的上部，为系统性的较强冷平流所控制，但较强冷平流特征线抬升至 220 m 以上。强冷平流中心分布在逆温层顶部，冷平流控制区比 07:30 之前明显抬升。以下除个别时次（09:10）基本为暖平流所控制。

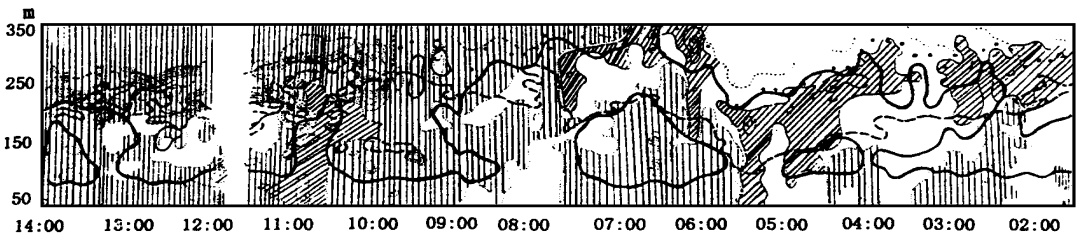

图 3 18 日 01:30 ~ 14:00 中上层逆温对应的回波强度、垂直运动、温度平流时空分布（斜线阴影区：$v_z \leqslant -0.1$ m/s 下沉运动区（间隔为 0.1），竖线阴影区：$v_z \geqslant -0.0$ m/s 的上升运动区（间隔为 0.1），粗点线：$RT_m \leqslant -50.0 \times 10^{-5}$ ℃·s/m² 的强冷平流中心，粗断线：$RT_m \leqslant -10.0 \times 10^{-5}$ ℃·s/m² 的冷平流特征线，粗实线：$V \geqslant 0.5$ 的强逆温主体对应的回波强度特征线，虚线：暖平流 $RT_m \geqslant 50.0 \times 10^{-5}$ ℃·s/m² 包围的区域，细点线：逆温层顶对应的回波强度（$V = 0.05$）特征线）

以上分析表明：逆温稳定维持阶段，逆温层内基本为系统性的较强的冷平流控制时，与其对应的区域并没有出现相应回波强度随之减弱的状况，此阶段温度平流并非是逆温发展变化的控制因子。

垂直运动的时空变化特征：01:30 ~ 07:40 除图 3 下半部竖线阴影区为较强上升运动（$v_z \geqslant 0.0$ m/s）区外，其余均为下沉运动所控制。其较强下沉运动特征线（$v_z = -0.1$ m/s）除 04:00 ~ 05:30 的少数时次（这时冷平流特征线也降至最低）之外，其余的绝大多数时次均随强逆温主体的时空分布趋势位于较强冷平流特征线的上侧（图中斜线阴影区），其强下沉中心多位于逆温层顶附近。图 3 下半部面积较大、上升运动较强的竖线阴影区均与回波强度 $0.0 = V \leqslant 0.05$ 弱回波组成的区域相一致。

07:40 ~ 09:40，原位于较强冷平流特征线上侧的较强下沉运动特征线已不复存在，这时在逆温层顶出现较强的系统性上升运动，在强逆温主体至近地层呈现出在大片系统性上升运动区镶嵌着零散、孤立的弱下沉运动。09:10 ~ 09:40 发展为上下均为较强的上升运动区所控制。与其相对应，原总体分为 3 层时的中上层逆温，明显同步趋于减弱，于 09:30 上层趋于消散。

在逆温稳定维持阶段，系统性较强的冷平流和系统性较强的下沉运动同时存在于强逆温主体，其冷平流对逆温强度有减弱作用，而

（下转 50 页）

(上接 39 页)

下沉运动(增温)对逆温强度有明显增强作用,位于近地层逆温之上的中上层逆温从 02:10 以后同步增强,到 04:10 以后强度继续增强合并下沉,05:40 以后抬升稍有减弱,07:20 以后短时增强再度分裂,其整个变化过程中,主控因子是下沉运动。

3.2 逆温大幅度减弱阶段

09:40 以后,原来连续的较强冷平流特征线在逆温层顶短时段出现后消失,位于其上部的较强冷平流厚度变薄,或较强冷平流区呈孤立片状分布。11:00 ~ 14:00 逆温主体处在暖平流区,大多数时次在逆温主体内暖平流随高度增加,在逆温层顶有较强的暖平流($RT_m \geqslant 50.0 \times 10^{-5}$ °C·s/m^{-2})中心,其逆温主体理应增强。v_z 在 09:40 以后,除少数时段,其剖面上下基本为上升运动区所控制,尤其近地层上升运动增强是构成逆温大幅减弱的主控因子。只有少数时段,当逆温处在弱的垂直运动区内,冷暖平流才显示其对逆温的减弱和增强作用。

4 小结

在逆温稳定维持阶段,分布于逆温主体内系统性的较强下沉运动是逆温增强和维持的主控因子。分布于逆温之下的系统性的较强上升运动有使逆温减弱抬升的作用。

在逆温大幅度减弱阶段,分布于逆温层顶、底的近于贯通的和近地层内的系统性上升运动区是逆温大幅减弱的主控因子。

参考文献

1 吕乃平,邓青山,丁春林.边界层大气的混合层结构.见:中国科学院大气物理研究所编.声雷达和大气边界层探测.北京:科学出版社,1982.25 - 34