

典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征

赵德山 洪钟祥

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文分析了北京市郊一类型辐射逆温。发现逆温强度不仅随时间的变化是起伏性的,而且随高度是分层的。所以,在时-空剖面图上通常呈现为多个分离的逆温强度中心。逆温层厚度的发展常常具有爆发性特征,逆温层顶多为周期性波动状态。逆温层内部湍流强度的时-空变化是不连续的,动量和热量的输送在时间上是阵性的,在高度上是分层的。

作者认为这些特征主要是由于逆温层内部风场和温度场之间的相互作用决定的。

一、引 言

详细地研究城市边界层辐射逆温的生消规律及其特征,对于探讨城市空气污染有着极其重要的意义。此外,由于辐射逆温常常造成低空能见度的恶化和很强的低空风切变,对于飞机起飞和降落的安全亦特别重要。

近年来,数值模拟夜间边界层的工作越来越多 (Businger 和 Arya, 1974; Blackadar, 1976; Brost 和 Wyngaard, 1978; Zeman, 1979),然而,夜间边界层的观测研究却还是相当不完善的。其中,对于极为重要的辐射逆温的研究也是如此。尤其是对于辐射逆温生消过程中的一些重要特征、形成的物理机制还迫切需要作更精细的观测和研究。例如,辐射逆温的多层性、辐射逆温层厚度发展的爆发性、辐射逆温层内部动量和热量的输送等等,都是很有意思的课题。

本文使用北京北郊中国科学院大气物理研究所的 325 米高气象塔,于 1979 年 8 月 23 日到 9 月 4 日观测到的一类型辐射逆温的资料,着重对辐射逆温生消过程中的一些爆发性特征进行了分析和研究。

二、场地和资料

325米高专用气象塔位于北京北郊元朝土城旧址,恰好处在市区和郊区之间。塔上装有 15 层观测仪器,高度分别为 9.7、15、33、48、63、80、103、120、140、160、180、200、240、280 和 320 米。观测仪器的详细情况可参考有关文献^[1]。

1980年5月19日收到修改稿。

本文分析的四个辐射逆温例子,是在 8 月 23—24 日,8 月 24—25 日,8 月 27—28 日和 9 月 1—2 日观测的。它们基本上均属于冷锋过境后天气晴朗、小风条件下形成的典型辐射逆温,并且在逆温生消的全过程中均为典型的北京地区地方性风场所控制。

使用的风速和温度资料是 10 分钟平均的;其中 9 月 1—2 日的逆温资料是连续观测的,每 15 秒钟观测一次,其它均为每小时定点观测。

三、典型辐射逆温的主要特征

根据上面四个典型辐射逆温例子分析(结果如图 1、2、3、4 所示),指出辐射逆温生消过程大致可以划分为三个阶段:生成阶段、发展阶段和消散阶段。下面分别叙述各阶段的主要特征。

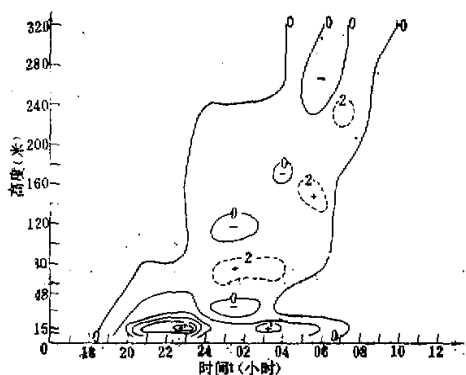


图 1 温度垂直梯度随时间和高度的变化(1979.8.23—24)

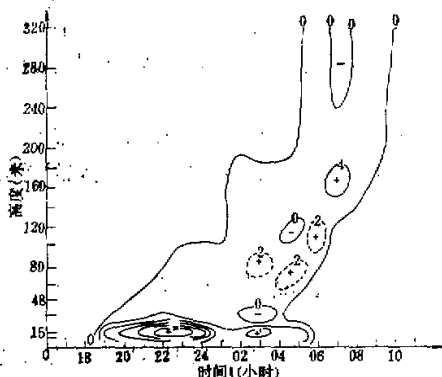


图 2 温度垂直梯度随时间和高度的变化(1979.8.24—25)

1. 生成阶段 由图 1—4 均可以看到,在日落前大约 18 点前后辐射逆温首先由地面开始生成,然后随着时间逐渐加强变厚,通常在 22 点前后形成第一个贴地最强逆温中心,中心高度位于 10 米上下。虽然,各次逆温生成和达到第一个最强逆温中心的时间、强

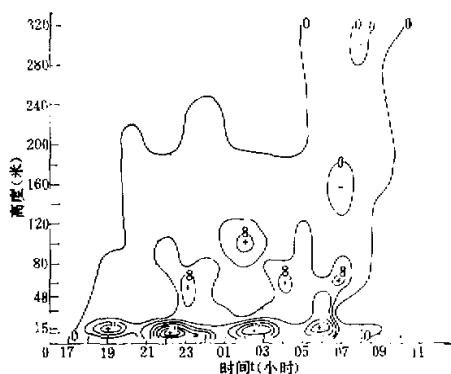


图3 温度垂直梯度随时间和高度的变化 (1979.8.27—28)

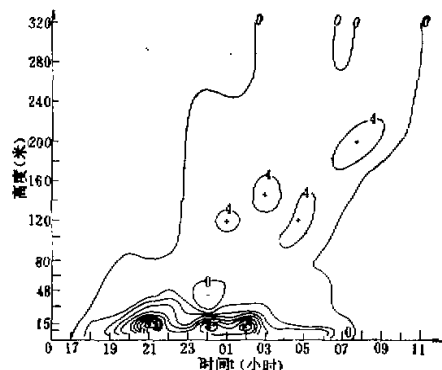


图4 温度垂直梯度随时间和高度的变化(1979.9.1—2)

度都不尽相同,但是有一共同的特点是在形成第一个最强逆温中心之前 1—2 小时内, 30 米以下的低层总具备小风(小于 2 米/秒)或静风条件。而且,这一条件出现得越早维持的时间越长,第一个最强逆温中心的强度也就越强。因此,天气晴朗、小风或静风是贴地辐射逆温强中心形成的先决条件。这一点从辐射逆温生成的物理机制和逆温层内热量输送的方式来看是不难理解的。因为,辐射逆温主要是由于夜间地表向大气的长波辐射,使地表和贴地一薄层空气温度降低而形成的。然而,在低层稳定大气中热量输送的基本方式是湍流混合,辐射作用除了在贴地一薄层内能影响热量输送外,一般来说远远小于湍流混合作用。这就是说辐射作用决定着地表和贴地一薄层空气的温度,湍流混合作用则决定着地表温度变化所能影响的气层的厚度和反映这种变化的速度。实验证明湍流混合是和风速垂直切变直接相关。所以,总起来说贴地层辐射逆温的强度变化主要取决于地面长波辐射和湍流混合作用大小的对比。当辐射作用超过湍流混合作用时,逆温强度加强,否则趋于减弱。上述低层小风或静风条件,正是该层大气极为稳定,湍流运动极弱、湍流混合作用小于地面辐射作用的必要条件。

2. 发展阶段 这个阶段的主要特征有三个。第一个特征是辐射逆温的强度不仅随

时间的变化是起伏性的,而且随高度是分层的。所以,在时-空剖面图上常常可以看到多个分离的逆温强度中心。这一特征在图 1—4 中表现得十分明显。首先我们可以看到,在大约 40 米以下始终存在着一个最强的逆温层,尽管逆温强度随时间的变化是起伏性的。例如,在 22 点和 03 点前后常常出现逆温强度的极大值,在它们之间还有多个次强值。而且这些极强值的中心高度均位于 10 米上下,我们把这层逆温称为辐射逆温主层—简称主层;此外,在大约 50—200 米之间还常常出现第二层甚至第三层辐射逆温。虽然这种多层逆温特征维持的时间不是很长,而且是间断的;但是在本场地的观测资料中,它的存在却是十分明显的。我们称它为辐射逆温付层—简称付层,其中心强度与主层相比是很弱的。

应该指出,至今山谷中辐射逆温的多层特征已被公认,形成的物理机制也比较清楚。例如,我们于 1968—1973 年在 13 个山谷中的观测^[2],美国内华达地区的观测^[3]等都已证实。然而,在比较均匀平坦的地区这方面的资料还很少,尤其是塔上的直接观测更少。本文和北京西郊的观测研究^[4]证明,城市市郊辐射逆温是分层的,但仍然不能简单地推广到均匀平坦地区,从而得出辐射逆温分层的普遍性结论。

第二个特征是辐射逆温层厚度的发展常常是爆发性的。这在图 1, 2, 4 上表现得很明显。可以看到,最初当逆温由地面开始生成以后,逆温层厚度随时间逐渐加厚,通常在 1—2 小时内加厚到大约 80—100 米左右,以后便在 1—2 小时内基本上维持这一厚度。然而,辐射逆温层厚度的再发展常常表现出阶梯状的爆发性特征,即辐射逆温层厚度发展到最高点是由几次在很短时间内的急剧加厚完成的。例如 9 月 1—2 日的逆温(见图 5),从连续观测的资料可以准确地确定,第一次逆温层厚度的爆发性加厚发生在 22 时 35 分到

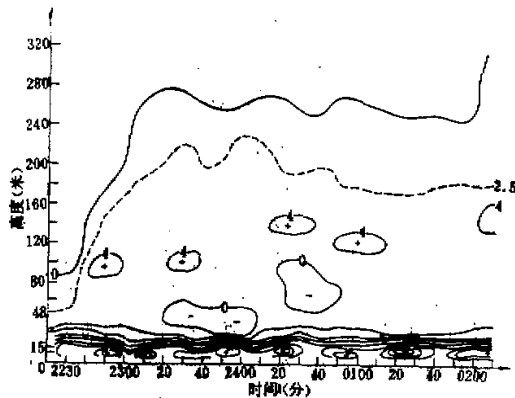


图 5 温度垂直梯度随时间和高度的连续变化(1979.9.1—2)

23时 05 分之间,在大约 30 分钟内,逆温层厚度由大约 80 米加厚到大约 260 米,即加厚了大约 180 米,在这之后直到 02 点约三个小时内,逆温层厚度基本上波动于 260 米上下。第二次爆发性加厚发生在 02 点,在大约十几分钟的时间内,逆温层厚度由 260 米加厚到 320 米以上(逆温层顶超过了本次观测高度)。虽然,在其它几个例子中逆温层厚度爆发性加厚的时间和强度不尽相同,但是都十分明显地证明,辐射逆温层厚度的发展不一定像平均状态所揭示的那样是逐渐加厚的,而常常表现出阶梯状的爆发性加厚的特征可能更具有

普遍意义。

第三个特征是逆温层顶经常呈现为不同周期、不同振幅的波动状态。首先由图 5 的连续观测资料看到,逆温层顶的波动周期大约为 10—20 分钟,振幅为 30—40 米。从其它的例子还可以看到波动周期更长、振幅更大的情况。总之,这一特征对于辐射逆温来说,并不是一种特殊的现象,近年来大量的声雷达探测更形象地显示出这一特征。这是稳定条件下经常发生的重力内波的反映。

3. 消散阶段 该阶段的主要特征是,辐射逆温层的消散首先是以主层逆温强度的迅速减弱开始的,日出后不久主层便会完全消散。与此同时,付层底不断抬高,到 11 点前后才完全消失。值得注意的是,在主层完全消散之前,主层和付层之间就已出现几十米甚至达 100 米厚的不稳定层结,使得付层变成所谓的夹层,以致于当主层完全消散之后,立即形成上有逆温盖子的不稳定层结,这是日出以后直至中午低层大气经常出现的状态。这一特征从图 1—4 都可以看到。

四、逆温层内部动量和热量的输送

正如上节所述,典型辐射逆温在生消过程中其强度不仅随时间变化是起伏性的,而且随高度是分层的,所以在时-空剖面图上通常出现多个分离的逆温强度中心。逆温层厚度的发展也常常呈现出阶梯状的爆发性过程。不仅如此,我们分析了水平风速场表明,水平风速的大小和逆温强度两者随时间的变化具有很好的相互制约关系,见图 6 (其中虚线表示风速)。而且特别应该注意的是,逆温强度中心和风速中心的削弱过程与形成过程相比,是非常急剧的变化过程,即缓慢形成而急剧削弱。

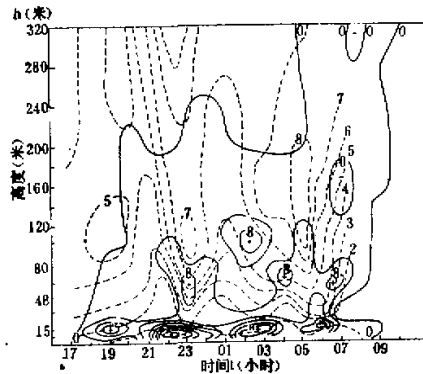


图 6 温度垂直梯度(实线)、风速(虚线)
随时间和高度的变化(1979.8.27—28.)

根据以上这些特征可以推断,在辐射逆温层中湍流运动在时-空剖面图上都是不连续的。因而动量和热量的输送随时间可能是一种间歇的阵性过程,随高度是分层的。

近年来人们开始注意到逆温层中动量和热量的这种输送特征。例如, Schubert (1977)^[5]

分析了声雷达探测资料,指出在晴朗的夜间边界层中从层流运动到湍流运动是一种急剧地跃迁过程。Carson 等(1978)^[6]在模拟稳定条件下表面湍流通量时,认为在稳定条件下湍流混合作用可能不是连续的。Mahrt 等(1979)^[7]研究了夜间边界层的垂直结构,指出湍流运动随高度是不连续的。

为了进一步证实我们上面的推断,仍以 8 月 27—28 日的逆温为例,计算了梯度里查逊数 R_i 随高度的分布和 40 米以下的低层 R_i 随时间的变化。计算公式如下

$$R_i = \frac{g}{T_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} / \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \simeq \frac{g}{T_0} \frac{(z_2 - z_1)(T_2 - T_1)}{(u_2 - u_1)^2}$$

其中 g 是重力加速度, T_0 是地面绝对温度, T_2 , T_1 和 u_2 , u_1 分别为高度 z_2 , z_1 处的温度和平均风速。计算结果见图 7 和图 8。

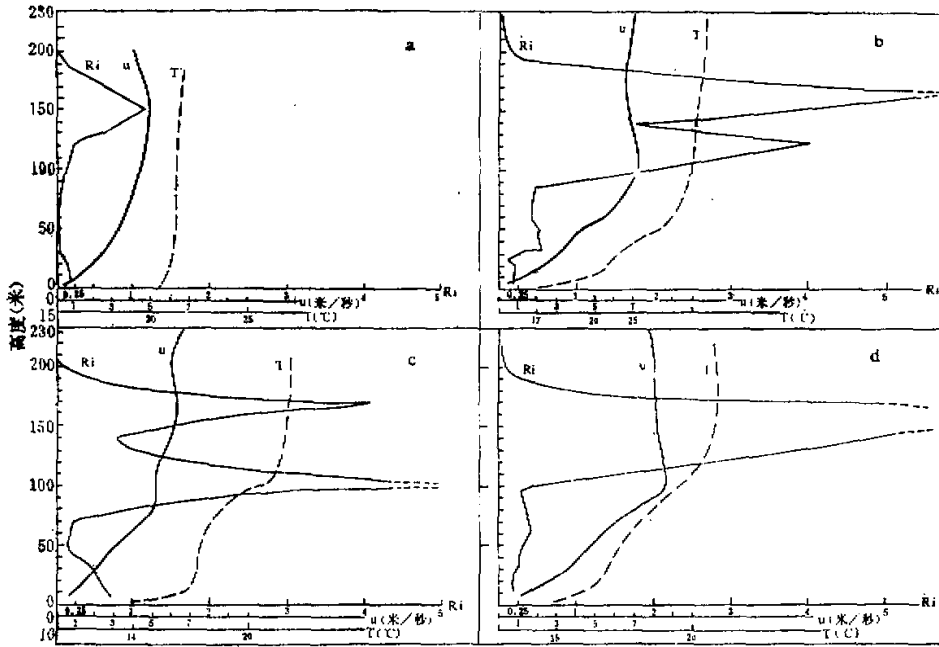


图 7 u , T , R_i 的垂直廓线

首先,由图 7 可见,在夜间辐射逆温层中 R_i 的垂直分布和 Mahrt 等(1979)的结果相类似。图 7a 表明在 20 点,只有从地面到 120 米这一层, $R_i < 0.25$ (临界里查逊数),湍流混合作用比较强,动量和热量向下输送可以达到地面。同样从图 7b 和图 7d 上可以看到,在 23 点和 05 点只有在 30 米以下的低层和 200 米以上的高层,存在着较强的湍流混合作用 ($R_i < 0.25$)。图 7c 则表明在 02 点,只有在大约 40—70 米之间和 200 米以上存在着较强的湍流混合作用 ($R_i < 0.25$)。在这些时刻的其它层 $R_i > 0.25$,说明这些层湍流混合作用很弱,甚至根本不存在湍流运动。总之,图 7 清楚地表明,在夜间辐射逆温层内,湍流运动随高度是不连续的,因而湍流混合作用随高度也必然是分层的,从而决定了

动量和热量的输送随高度也是不连续的。

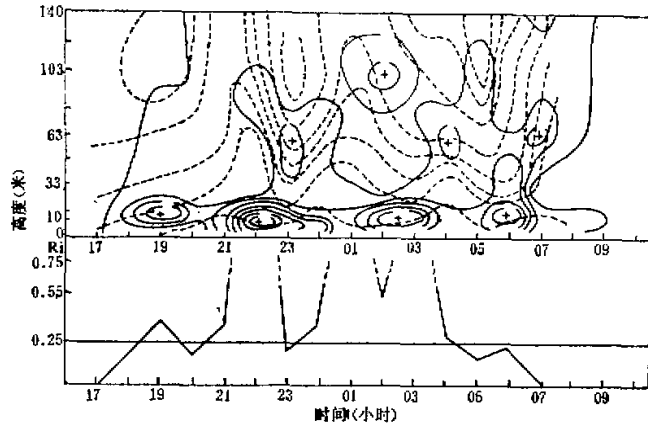


图 8 40 米以下大气层的 R_i 随时间的变化

图 8 表示的是湍流运动随时间的变化。由图可见,在大约 40 米以下的低层内,在 18、20、23、05—06 点几个时刻 $R_i < 0.25$ 。而在这几个时刻之间更长的时间里 $R_i > 0.25$ 。这表明在 40 米以下的低层逆温中,大部分时间湍流运动很弱,甚至不存在湍流运动而以层流运动所代替。湍流运动的存在和发展只是在以上几个短暂的时刻,以一种间断的阵性状态出现。因而,它决定了动量和热量的向下输送随时间的变化,必然是一种间歇状的急剧的阵性过程。

所以,总结图 7 和图 8 所示,我们便会清楚地看到辐射逆温层内湍流运动、动量和热量输送的一种非常重要的时-空特征。尤其是如果将这一特征和辐射逆温生消过程中所表现出来的一些重要特征相对照,我们便会从它们的一致性中不难想象,辐射逆温生消过程中一些重要特征正是逆温层内湍流运动时-空特征的必然结果。然而,我们认为造成上述逆温层内湍流运动、动量和热量输送的时-空特征的主要原因,是由辐射逆温层中风场和温度场之间相互作用的关系决定的。其物理机制是,当日落后由于地面的长波辐射冷却形成辐射逆温后,随着逆温强度的不断加强,贴地一薄层内湍流运动逐渐削弱,在这一层上部动量由于受到这一贴地薄层逆温的阻挡不能向下输送,便在逆温层上部不断堆积起来,从而使得这里风速逐渐加大,尤其是使该处的风速切变更加迅速地发展起来。然而,正是由于这种风速切变的迅速加大,反过来使得该层的梯度里查逊数 R_i 迅速减小,当 R_i 减小到临界值 0.25 以下时,便满足了 Kelvin-Helmholtz 切变不稳定条件^[8],使该层内湍流运动急剧地产生和加强,从而湍流混合作用突然增大,随之便会引起动量和热量爆发性地向下输送达到地面。伴随着这一动力过程的是低层温度、风速在几十分钟内发生剧烈地变化,逆温中心强度迅速削弱,逆温层厚度急剧加厚,风速和风速切变迅速减小,结果很快使得切变不稳定条件消失。从而又重新恢复到该层逆温开始发展时的情况,于是贴地逆温强度再次开始逐渐加强,随后又重演上述过程,形成典型辐射逆温生消过程中观测到的一些爆发性特征。

五、结 论

本文通过上述四个典型辐射逆温例子的分析,揭示了辐射逆温的一些重要特征如下:

1. 典型辐射逆温一般在日落前首先由地面开始生成。天气晴朗、小风或静风是贴地一薄层辐射逆温加强的先决条件。在日出后主层逆温开始迅速消散,同时付层底不断抬高,到 11 点前后才完全消失。因而当主层完全消失时,立刻形成一层上有逆温盖子的不稳定层结,逆温付层变为所谓的夹层。

2. 辐射逆温强度不仅随时间的变化是起伏性的,而且随高度辐射逆温是分层的。所以,在时-空剖面图上通常出现多个分离的逆温强度中心。而且,在逆温层内湍流运动和动量、热量的输送随时间和高度的变化都是不连续的,尤其是在时间上呈现出一种间歇状的阵性爆发过程。

3. 辐射逆温层厚度的发展常常具有爆发性加厚的特征。逆温层顶多为周期性波动状态。

4. 辐射逆温层内风场和温度场之间具有相互作用的关系。这正是辐射逆温生消过程中一些重要特征形成的主要原因。

致谢: 本文在分析研究过程中曾得到周明煜同志的帮助,并与张锡福、王立治等同志进行过有益的讨论,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 李兴生、郑达洲、张卫华、吴家麟、朱晋钊等, 325 米气象塔的自动遥测系统(待发表)。
- [2] 中国科学院大气物理研究所, 山区空气污染与气象。科学出版社, 1—6, 1978。
- [3] Dunsmon, H. and Fransioli, P., Observations of multiple layer inversions with gravity waves in a Sierra Basin, *Conf. on Sierra Nevada Meteor.*, June, 19—21, 1978。
- [4] 北京西郊环境质量评价协作组, 石景山区大气污染动态规律的研究, 1977 年。
- [5] Schubert, J. F., Acoustic detection of momentum transfer during the abrupt transition from a laminar to a turbulent atmospheric boundary layer. *J. Appl. Meteor.*, 16(12), p. 1292—1297, 1977。
- [6] Carson, D. J. and Richards, P. J. R., Modelling surface turbulent fluxes in stable condition. *Boundary-Layer meteor.*, 14(1), p. 67—81, 1978。
- [7] Mahrt, L., Heald, R. C., Lenschow, D. H. and Stankov, B. B., An Observational study of the structure of the nocturnal boundary Layer. *Boundary-layer meteor.*, 17(2), p. 248—264, 1979。
- [8] Drazih, P. G., The stability of a shear layer in a unbounded heterogeneous inviscid fluid, *J. Fluid. Mech.*, 4, p. 214—228, 1958。

SOME BURST CHARACTERISTICS DURING THE PROCESS OF OCCURRING AND DISSIPATING OF TYPICAL RADIATION INVERSION

Zhao De-shan Hong Zhong-xiang

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In this paper, a typical radiation inversion in the north suburbs of Peking is analysed. It is found that inversion intensity is not only fluctuating with time but also sandwiched with height. Hence, many centres of inversion intensity is discovered in the time-height section. Thickening of the inversion layer usually has the characteristic of burst, the top of the inversion layer is in periodic waveform. The time-height variation of turbulent intensity in the inversion layer is incontinuous, the transfer of momentum and heat is gusty with time and sandwich with height.

The authors believed that these characteristics are mainly due to interaction between wind and temperature in the inversion layer.