北京城市重烟尘雾与水雾过程的边界层结构

周小刚[1,2] 王 强[1]

(1 中国气象局培训中心 ,北京 100081 ;2 北京大学物理学院 ,北京 100871)

摘要 分析 1999 年 11 月 1 日至 12 月 20 日北京城市雾综合性观测试验中 5 次雾过程的实测资料 ,对如何区分重烟尘雾与水雾过程给出了判定方法 ,并对重烟尘雾与水雾过程的边界层结构特征作了探讨 。主要结论为 :从能见度 、相对湿度 、长波辐射平衡 3 个方面可以区分重烟尘雾过程和水雾过程 ;由于重烟尘雾和水雾的物理化学性质差异很大 ,对城市大气边界层结构产生的影响也不同 ,因此造成它们在相对湿度 、逆温层 、风速分布 、水汽变化等方面也有很大差异 。

关键词 重烟尘雾 水雾 边界层廓线

引言

随着城市化进程加快 ,城市雾呈增多趋势 , 雾的危害不仅会造成交通事故增多 ,同时会加重空气污染的程度 ,因此城市雾的研究愈来愈受到重视 。由于雾发生在边界层中 1 ~ 200 m 以下的高度 ,常规高空气象探测方法对边界层的探测精度和分辨率不能满足雾的研究需要 ,如没有特定的探测 ,难以获得其详细的观测资料 ,虽然国内曾组织过对西双版纳 、重庆雾等的探测研究[1] ,但对于北京这个人口众多 、三面有山环绕的国际型大城市中雾的探测还不多见 。1999 年 11 月 1 日至 12 月 20 日 ,由中国气象局培训中心组织 ,其它一些相关科研单位参加 ,进行了北京城市雾的综合性观测方式验 ,本文利用试验所取得的资料 ,对城市重烟尘雾和水雾的边界层结构特征作了分析 ,以揭示北京城市雾的形成机理 。

1 资料来源

试验期间 ,以城南郊北京观象台为主站 ,采用系留气球探测系统(美国 AIR 公司的 TS-2A 型系留气球探测系统 ,包括飞艇式气球 、悬挂式探空仪 、电动绞车 、地面无线电接收机和信息处理系统) ,探测了大气边界层温度 、湿度 、风随高度的分布和雾顶高度 ,并进行了能见度和辐射测量等有关观测 。在试验期间 ,共有 5 次雾过程 ,日期分别是 :11 月 5 ~ 6 日 、11 月 11 ~ 12 日 、11 月 19 ~ 21 、11 月 21 ~ 23 日 、12 月 14 ~ 15 日 。

2 重烟尘雾与水雾过程的判定

目标物的水平能见度小于 1 km ,称为雾[2] 。其中由大量浮游在近地面空气中的微小水滴或冰晶所组成的气溶胶系统称为水雾 ;而主要由干粒子组成的气溶胶系统称为重烟尘雾 。由于目前在气象观测规范中并没有区分这两种不同性质的低能见度 ,一般统称为雾 。但重烟尘雾和水雾的物理化学性质差异很大 ,对城市大气边界层结构产生的影响也不同 ,因此区分这两种过程是非常重要的 。根据试验资料 ,认为从能见度 、空气湿度 、长波辐射平衡 3 个要素 ,可以较好地区分重烟尘雾和水雾过程 。通过比较 ,发现试验期间前 3 次能见度小于 1 km 的过程是由干粒子造成的较严重的低能见度天气 ,即重烟尘雾过程 ;后 2 次是近年来较为罕见的重雾过程 ,能见度最低时只有约 10 m ,属水雾过程 。这与国外的一些研究认为[3] ,在较浓水雾产生前 ,大部分都能观测到重烟尘雾过程也是相符的 。

国家自然科学基金(40275006) 和北京市自然科学基金(8981002) 项目资助

作者简介 :周小刚 ,女 ,1964 年生 ,副教授 ,主要从事大气动力学及大气边界层的教学与研究

收稿日期 :2003 年 6 月 1 日 ;定稿日期 :2003 年 10 月 24 日

2.1　能见度

在有重烟尘雾和水雾的时候,能见度都很低。但水雾形成后能见度会发生突变,并较快地降低,消散时,能见度在很短时间段内迅速提高。而对于主要以干粒子影响能见度的重烟尘雾过程,能见度的变化远不如水雾有突发性。水雾形成时能见度的突变是由于水雾在形成时会出现爆发性发展过程[4],而水雾的消散主要是由于太阳辐射加热造成,此过程发展较快,从而造成能见度的突变。

2.2　相对湿度

当空气中水汽浓度达到或接近饱和时,如果存在凝结核,水汽就会在凝结核上凝结,形成悬浮的小水滴,从而使能见度降低。而在重烟尘雾过程中,由于主要是空气中悬浮的干粒子影响能见度,因此相对湿度较低。

2.3　长波辐射平衡

分析辐射测量资料发现,在水雾发展过程中,长波辐射基本保持平衡状态,但是在重烟尘雾的情况下,长波辐射一般处于不平衡状态。造成这一现象的原因是:水滴是红外长波辐射的强吸收体和强发射体,当空气中水滴达到一定浓度时,地面发射的长波辐射全部被水滴吸收,同时以自身温度向外发射长波辐射,在雾层内水滴温度基本相同,使长波辐射处于平衡状态。这一过程的发生非常快,而雾在形成时发展也是很快的,因此会观测到辐射发生突变的现象。而对于悬浮在低空的干粒子,其对长波辐射的吸收远比水滴弱,因此在重烟尘雾的情况下,长波辐射不会发生突变,也不处于平衡状态。

为验证水雾过程中长波辐射基本保持平衡这一现象,在 2001 年 2 月的补充试验中,分别独立测量向上和向下的长波辐射,同样得到在水雾形成前和消散后,长波辐射处于不平衡状态,而在水雾维持期间(20 至 23 日),长波辐射基本达到平衡状态(图 1)。

3　城市重烟尘雾与水雾过程的边界层结构

由于城市重烟尘雾和水雾的形成机理不同,从而造成它们的边界层特征有很大差异,下面主要从相对湿度、逆温层、风速、水汽随高度的分布来分析它们的边界层结构特征。

3.1　相对湿度

相对湿度的空间分布是雾的宏观特征最直观的体现,但在研究工作中,测量边界层内湿度变化是边界层探测的难点。在目前条件下,系留气球探测系统是最有效的探测设备。

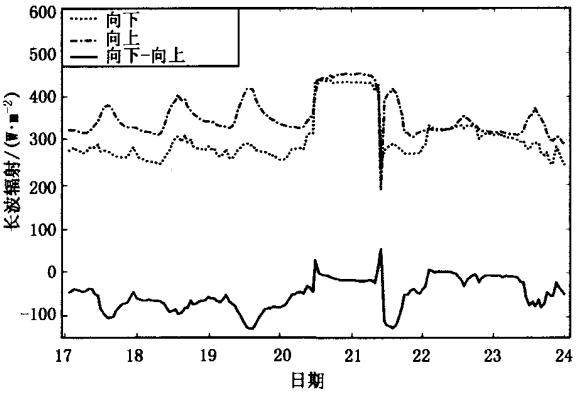

图 1　2001 年 2 月 17 ~ 23 日长波辐射

在重烟尘雾造成的低能见度情况下,空气未达到饱和,随着夜间逆温层加强和降温过程,近地面相对湿度会有所增加,但仅在地面附近的薄层内湿度较大。随高度升高,相对湿度很快降低(图 2a)。水雾的形成和消散都有突变性,相对湿度随高度变化的廓线最清楚地表现出雾层的演变过程。

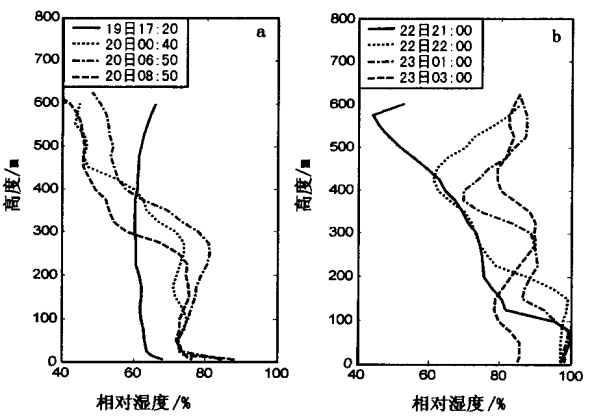

图 2　11 月 19 ~ 20 日(a)和 22 ~ 23 日(b)相对湿度廓线

从相对湿度廓线变化(图 2b)上清楚地看到水雾的雾层发展过程。水雾在接近地面的一定高度上首先形成,雾层内相对湿度保持饱和状态直到雾消散。雾顶附近相对湿度发生突变,随高度升高相对湿度急剧减小,雾顶以上比较干燥。在雾生成初期雾顶抬升,雾层不断加厚。雾消散时,首先从近地面开始相对湿度降低,雾滴蒸发、消失,雾底抬升;同时,雾顶下降,雾层减薄,逐渐消散。

3.2　逆温层

逆温层的形成是由于地面辐射冷却,带动贴近

地面的空气降温,并通过大气湍流等动力过程,使上层空气也逐渐降温,形成上层温度高,下层温度低的特殊层结结构。一般情况下,日落后逆温从地面附近开始形成,前半夜不断加强,上下层温差加大,逆温层厚度增加。在早晨太阳升起后,太阳辐射对地面加热,地表温度升高,并将热量传送给近地面空气,空气温度升高,使下层空气温度高于上层空气温度,逆温层消失。

图 3a 是重烟尘雾过程的夜间温度廓线变化过程,在夜间,温度廓线向低温方向偏移,表示降温过程中下层比上层降温快。夜间逆温层稳定发展,逆温层顶高度增加平缓,后期甚至降低,降温减缓;日出时地面增温,形成强递减温度梯度,逆温层脱离地面,抬升、变薄,逐渐消散。

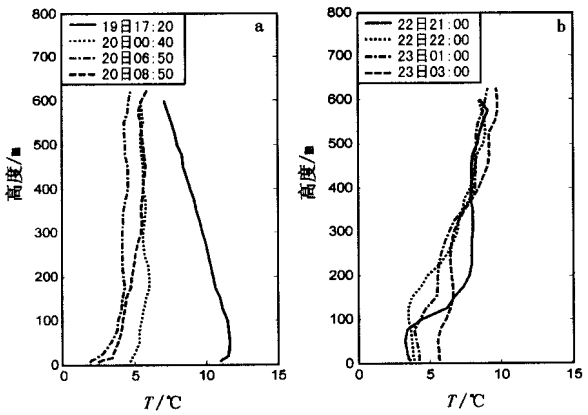

图 3 11 月 19 ~ 20 日(a)和 22 ~ 23 日(b)温度廓线

在有水雾形成的夜间(图 3b),边界层结构变得复杂,并伴随着水雾的发展而变化。图 3b 表示了在水雾过程中温度层结的变化过程。最突出的特征是:雾层内没有逆温,逆温层抬升到雾顶以上。从 11 月 22 ~ 23 日雾顶高度与逆温层变化(图 4)可进一步看出,逆温层底略低于雾顶,二者的变化趋势基本一致。

水雾在近地面形成,雾层内温度随高度降低的梯度接近湿绝热递减率,反映出在雾层内处于饱和湿绝热平衡状态。并且从 22 日 21:00 到次日 03:00,雾层内的温度不但没有降低,还稍有提高。这表示雾层内没有降温,即地表面没有辐射冷却,这与重烟尘雾过程有很大差别。尽管逆温层仍然存在,但是已抬升到了雾顶以上,而且在接近雾顶时逆温梯度加大,最大逆温梯度出现在雾顶附近。在这次重水雾过程中,上部有深厚的逆温层,逆温梯度较均匀,并小于雾顶以上逆温梯度,同时,在整个过程中,温度的升降都比较小。

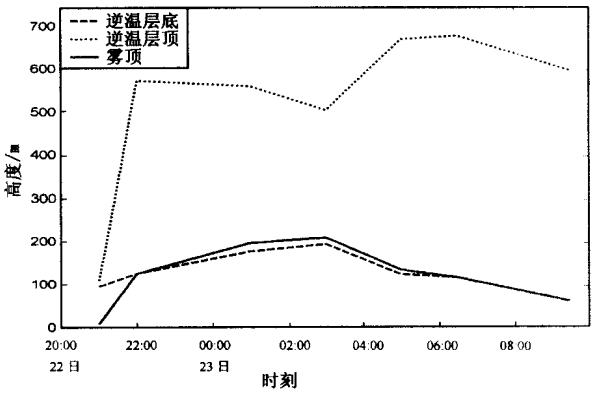

图 4 11 月 22 ~ 23 日雾顶高度与逆温层变化

日出后水雾雾层脱离地面抬升、变薄、消散,地面加热迅速。23 日 05:00 ~ 11:00,近地面温度很快升高,温度随高度递减,低层温度廓线向高温方向移动,越接近地面,温度升高越快,温度廓线逐渐成倾斜直线。在水雾消散的过程中,下层温度层结有明显的规律性变化,上层温度层结变化不大。

水雾的这种典型变化过程是由雾发展阶段能量传输过程决定的,逆温层的变化是能量传输过程的直观体现。雾发生、发展中主要的能量过程可以概括为辐射传输能量、水汽和水滴相变潜热传递能量、湍流传输能量 3 种基本过程。

(1)辐射传输。辐射逆温是城市水雾的主要成因,辐射过程影响着水雾发展的全过程。在水雾形成时辐射冷却是基本过程,这时候的辐射体主要是地面,冷却从下部开始。水雾形成后,雾滴是强辐射体,这时在雾层内的任何高度上,辐射基本是各向同性的,雾内部处于长波辐射平衡状态。而在雾顶处,则形成新的辐射面,向上发射较强的长波辐射。由于接收辐射较弱,形成以雾顶为主体的较强的辐射冷却。日出后,雾顶成为接收太阳辐射的受热面,雾顶温度升高,同时,以长波辐射形式传递能量,使整个雾层加热,加快雾的消散过程。因此,辐射传输是影响雾层温度分布和变化的主要过程。

(2)潜热释放能量。水雾形成和发展阶段,雾层内部发生水汽凝结过程,释放大量的潜热,造成边界层下层温度升高,使得逆温减弱,雾层整体温度不再降低,甚至表现出升温。在雾顶附近,主要是水滴蒸发过程,通过吸收潜热,使雾顶附近空气温度降低,

造成雾顶以上逆温增强,逆温梯度加大。因此尽管雾层内含水量不大,但相变潜热的影响很大。

(3) 湍流输送。湍流运动是边界层内传输动量和能量的主要形式之一。城市热源分布的不均匀和城市复杂下垫面的动力作用,使城市边界层湍流运动十分复杂,从而成为影响能量传输的重要因素。湍流运动的强弱主要取决于气层的稳定度,在较强的逆温层内,湍流运动相对较弱,但在水雾形成后,雾层内逆温消失,气层稳定度降低,有利于湍流运动。湍流运动可以在雾层内传输热量和水汽通量。对热量的传输会促使雾内稳定度向近中性转化,对水汽的传输会使水汽由密度较高的区域输送到密度较低的区域,当雾滴附近发生水汽凝结而使水汽密度降低时,湍流传输可以源源不断地补充水汽,从而维持凝结过程的持续进行,也不断传输潜热。

3.3　风速分布

由于北京城市水雾的主要类型为辐射雾和平流辐射雾[5],因此风对水雾的形成和分布有重要影响。在北京城区和近郊区,西南气流往往会带来较丰富的水汽,西南气流移动到冷却较快的城区下垫面上,很有利于水雾的形成。受到北京三面环山地形的影响,从西北方向吹来的风是从山顶翻越过来的下坡风,相对干燥,不利于水雾的生成和发展。因此,边界层内风的分布反映了天气背景的特点。

从天气形势的发展变化来看,11 月 19 ~ 23 日天气形势可分为 3 个阶段。19 ~ 21 日 20:00 为第 1 阶段;21 日 20:00 至 22 日 20:00 为第 2 阶段;22 日 20:00 至 23 日为第 3 阶段。在 850 hPa 天气图上可看出,影响北京地区的环流形势在第 1 阶段为较平直的西风气流,第 3 阶段是较强的偏南气流,第 2 阶段则是由偏西气流向偏南气流的环流转变阶段。因此在 19 ~ 20 日的重烟尘雾过程中,华北地区高空受西风气流控制,无水汽输送,相对而言湿度较小。22 ~ 23 日的浓雾过程中,华北地区高空受西南气流控制,有较强的水汽输送。

从边界层风速分布(图 5a) 来看,重烟尘雾过程中风速随高度的分布没有明显的规律性,并且在重烟尘雾存在的大部分时间内,边界层中风速不大,无明显的边界层急流。但值得注意的是在夜间 00:50 的风速廓线有较大的风速存在。而图 5b 中,在贴近地面的水雾雾层内有 2 ~ 3 $m \cdot s^{-1}$ 的微风,随着高度升高,风速略有增大,但在整个雾层内,风速不是很大,雾顶以上风速较大。一般认为,贴近地面的微风是辐射雾的重要特征之一,这是由于近地面微风起到加强湍流活动和加快水汽交换的作用。而且在很多情况下,雾顶以上直到逆温层顶,会出现低空急流。在有水雾的情况下,急流层内最大风速在 10 $m \cdot s^{-1}$ 以上,通常急流层较薄,最大风速层高度在雾顶以上。急流层一般维持时间不长,最多几个小时,午夜前后生成,后半夜消失,其存在时间比雾的存在时间要短。

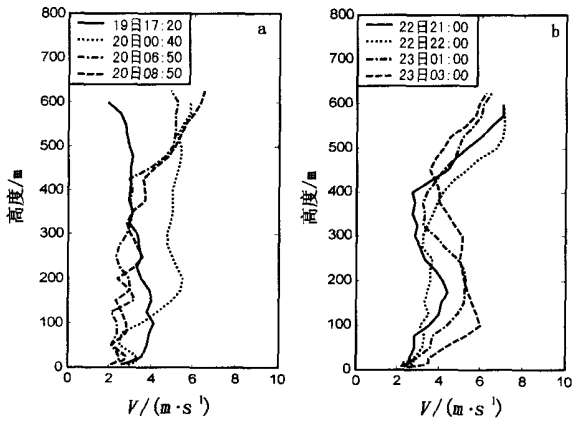

图 5　11 月 19 ~ 20 日(a) 和 22 ~ 23 日(b) 风速廓线

边界层急流是边界层研究的重要课题,其对飞机起降的影响有时是灾难性的,对城市环境也有重要影响。边界层急流对雾的生消过程发生影响的物理机制尚不清楚,雾对边界层急流的影响也还没有确切的解释。关于城市夜间边界层风,尤其低空急流的规律仍然有待于进一步研究。

3.4　水汽分布

边界层内水汽分布状况对雾的形成和发展有重要影响。空气中的水汽主要来源于地表面液态水的蒸发,通过空气流动输送到整个边界层。一般而言,近地面水汽密度相对较高,并随高度升高水汽密度减小。重烟尘雾情况下的边界层水汽分布(图 6a) 即是这种情况。

而在水雾情况下(图 6b) 的边界层内,由于雾顶以上有逆温层出现,稳定层结使得水汽难以扩散,逆温层像一个盖子,把地面蒸发的水汽封闭在逆温层内,造成水汽浓度偏大。并且在湍流作用下,逆温层内水汽浓度随高度会稍增加。逆温层顶以上,水汽密度随高度迅速减小。水雾形成后,对水汽分布和传输产生很大影响。雾内的水处于相变的平衡态,水汽浓

度达到饱和状态的高值,整个雾层内的水汽浓度是由空气温度控制的。观测表明,雾顶以上的一定高度内水汽浓度较大,这与相对湿度随高度的变化不同。在 11 月 22 ~ 23 日的过程中,水雾发展的大部分时间里,雾顶以上一定高度内,水汽密度在雾顶部有突变,并随高度降低。但在雾消散阶段,雾顶以上水汽密度有明显增大,并一直延伸到逆温层顶。

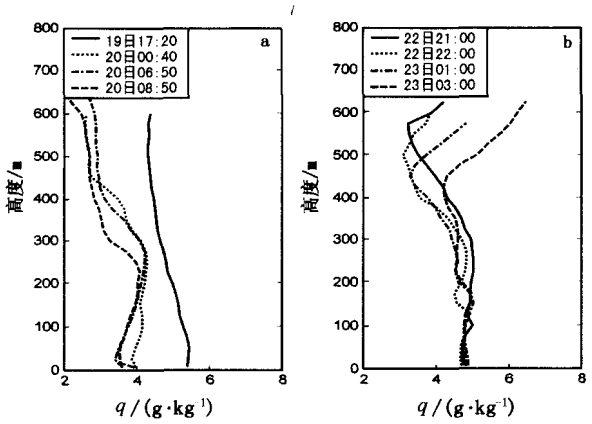

图 6 11 月 19 ~ 20 日(a)和 22 ~ 23 日(b)比湿廓线

在水雾过程中,雾的液滴和水汽的关系是动态平衡。雾滴的维持和增大要靠水汽的凝结,水汽是由下垫面蒸发或平流输送来的,水汽浓度增大会有利于雾滴增长,又通过大的雾滴沉降回到地面。雾滴表面水的蒸发补充空气中的水汽,使雾滴变小,在雾顶,水汽会不断向上层大气扩散,下层水汽向上输送补充或雾滴蒸发提供水汽。蒸发和凝结是不断发展的过程,维持着雾层内水汽的饱和状态。随着条件的变化,主导的过程会发生变化,影响着水雾生成发展或消散,简单地说,增湿降温有利于雾形成、发展,降湿增温有利于雾消散。在水雾消散阶段,雾滴蒸发成为主导过程,在雾的底层和顶层形成界面,并使界面附近保持较高的水汽浓度。这时,雾顶以上的逆温层内,雾顶是一个蒸发面,使得水汽向上传输,并且上层温度较高、饱和差大,形成了水汽浓度随高度增大的特殊情况。

4 结语

根据对重烟尘雾和水雾过程的区分及边界层结构特征分析,得出如下结论:

(1)可以从能见度的变化程度、地面相对湿度是否达到饱和、长波辐射是否基本达到平衡 3 个方面来判定重烟尘雾和水雾过程。

(2)由于重烟尘雾主要是悬浮在空气中的干粒子影响能见度,而水雾主要是悬浮在空气中的水滴影响能见度。因此,除贴地层外,边界层中重烟尘雾的相对湿度较水雾的相对湿度低得多,水雾维持期间,雾层内的相对湿度基本维持饱和。

(3)重烟尘雾过程中夜间逆温层由地面开始稳定发展,逆温层顶随高度平缓抬升,日出后逆温层消失。在有水雾形成的夜间,最突出的特征是雾层内没有逆温,逆温层抬升到雾顶以上。这种逆温层结构主要由辐射传输能量、水汽和水滴相变潜热传递能量、湍流传输能量这 3 种基本过程决定的。

(4)边界层内风的分布反映了天气背景的特点,在 11 月 19 ~ 20 日的重烟尘雾过程中,华北地区高空受西风气流控制,无水汽输送,相对湿度较小。11 月 22 ~ 23 日的浓雾过程中,华北地区高空受西南气流控制,有较强的水汽输送。从边界层风速分布来看,重烟尘雾过程中风速随高度的分布没有明显的规律性,并且在重烟尘雾存在的大部分时间内,边界层中风速不大,无明显的边界层急流。而水雾过程中,在整个雾层内,风速不是很大,而雾顶以上有边界层急流存在,它对水雾的生消过程发生影响的物理机制尚不清楚。

(5)重烟尘雾情况下的边界层水汽分布是近地面水汽密度相对较大,并随高度升高而减小。而在水雾情况下的边界层内,雾顶以上的一定高度内水汽浓度较大,水汽密度在雾顶部有突变,并随高度降低。但在雾消散阶段,雾顶以上水汽密度明显增大,并一直延伸到逆温层顶。这是由雾的液滴和水汽的动态平衡关系决定的。

一定的天气背景是重烟尘雾和水雾形成的基本条件,但城市影响也非常重要。下垫面的热力、动力过程,对局地环流、边界层都会产生决定性的影响。城市下垫面的复杂性使城市雾在水平面上发展更加不均衡,不同区域雾的分布、发生时间和状态特征会不同,但雾层内外的边界层结构和物理过程应是基本趋于相同的。

参考文献

1 李子华. 中国近 40 年来的雾研. 气象学报,2001,59(5):616 - 623

2 孙奕敏. 灾害性浓雾. 北京:气象出版社,1994.148

3 Heintzenberg J, Wendisch M, Yuskiewicz B, et al. Characteristics of haze, mist and fog. Beitr. zur Phys. Der Atmos., 1998, 71: 21 - 31

4 李子华,黄建平,孙博阳,等. 辐射雾发展的爆发性特征. 大气科学,1999,23(5):623-631

5 吴洪,柳崇健,邵洁,等. 北京地区大雾形成的分析和预报. 应用气象学报,2000,11(1):123-127

Boundary Layer Characteristics of Urban Heavy Smog and Fog in Beijing

Zhou Xiaogang[1,2]　Wang Qiang[1]

(1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081;
2 Shool of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Urban heavy smog is a serious environmental problem. Based on the field observation in Beijing from November 1 to December 20 of 1999, differences between heavy smog and fog are analyzed, and the structures of the atmospheric boundary layer for heavy smog and fog are discussed. Some results are founded. For example, heavy smog and fog can be distinguished from visibility, relative humidity and long-wave radiation equilibrium. The differences of heavy smog and fog in physical and chemic natures induce the boundary layer profile differences in relative moisture, inversion layer, wind speed, vapor, etc.

Key words: heavy smog, fog, boundary layer profile

欢迎订阅《气象科技》、《气象科技合作动态》、《中国气象科学研究院年报》

《气象科技》刊载对大气科学各领域发展水平的综合评述、大气科学领域和相关科学领域的专题研究论文,并报道城市环境、大气探测、气象业务与服务方面的新方法、新技术和新成果。《气象科技》为大 16 开本双月刊,全年订价:60 元。《气象科技合作动态》介绍各国气象局的综合概况及我国与其他国家在气象科技领域的合作、交流情况,双月刊,全年订价:30 元。《中国气象科学研究院年报》(中英文对照),反映该院研究和技术领域内的新成果和新进展以及该年度内的重大学术活动,每年 1 期,订价:30 元。

联系地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号中国气象科学研究院,《气象科技》编辑部
邮政编码:100081,电话:(010)68407256,**Email:**qxkj@cams.cma.gov.cn
户名:中国气象科学研究院,账号:65100050526100860 13,开户行:北京建行白石桥支行