

基于 L 波段雷达探空资料的南京低空逆温特征

夏敏洁^{①*},周文君^②,裴海瑛^①,戴竹君^①^① 南京市气象局,江苏 南京 210000;^② 盐城市气象局,江苏 盐城 224000

* 联系人,E-mail:361076475@qq.com

2017-01-23 收稿,2017-03-21 接受

江苏省自然科学基金(BK20130111);江苏省气象局重点项目(KZ201405);江苏省科技支撑计划社会发展重大研究(BE2012771);无锡市科技发展资金社会发展项目(CSE11N1301);江苏省省级环保科研课题(2014021);国家科技支撑计划(2014BAC22B04);江苏省气象局预报员专项(JSYBY201615);江苏省气象局预报员专项(JSYBY201604)

摘要 利用2010—2015年南京市逐日的08时(北京时间,下同)和20时L波段雷达探空秒级数据资料,研究南京市边界层内(2 km以下)接地逆温和悬浮逆温的出现频率、逆温层厚度以及逆温强度等,对该地区低空大气逆温特征变化进行了详细分析。结果发现:南京市逆温日的发生频率较高,达81.68%,其中接地逆温23.9%,悬浮逆温71.8%,早间发生频率高于晚间,月分布均表现为盛夏季节频率低,秋冬季节发生频率高。逆温层厚度也是夏季最薄,冬季到初春厚度较大;早间的逆温层厚度大于晚间的逆温层厚度,悬浮逆温厚度大于接地逆温厚度。南京市逆温强度夏季小,冬季大,有明显的季节变化趋势。逆温强度早晚差异较小,但接地逆温平均逆温强度是悬浮逆温的1.5倍。逆温强度达到 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 的强逆温有50%以上出现在冬季。通过计算污染物浓度与逆温强度的相关性,发现污染物浓度($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO)与逆温强度有很好的正相关性,由此说明低空大气逆温层结状况对空气质量有一定影响。

关键词

逆温强度;
逆温频率;
接地逆温;
悬浮逆温

对流层大气中,一般情况下温度随着高度呈递减趋势,但是经常在某一层或多层出现气温不随高度变化或气温随高度升高的现象,气象上将气温随高度无变化的大气层结称之为等温层,将气温随高度升高的层结称为逆温层。大气温度的层结变化从一定程度指示了大气层结稳定度,而等温层和逆温层都表示大气层结稳定。根据逆温层的形成原因可将其分为:辐射逆温、平流逆温、下沉逆温、锋面逆温等;根据逆温层底高的高度可将逆温层分为:接地逆温、悬浮逆温,悬浮逆温也分为低悬逆温和高悬逆温(盛裴轩等,2003)。其中边界层内的低空逆温是表征大气稳定度的重要指标之一,较暖而轻的空气位于冷的下垫面上,形成一种极稳定的逆温层,抑制低层的污染物、水汽、烟尘的垂直扩散能力,使近地面

层污染物不断堆积,同时也使低空能量不断积聚,污染物堆积浓度升高引起区域范围内的空气污染,危害人们的身体健康(刘端阳等,2014;程念亮等,2015),而低空大气能量不断积聚在夏季也容易产生强对流灾害性天气,对人们生活出行产生一定影响(张振秀,2015)。

目前,国外很多地区都已开展了利用高空气象观测资料分析逆温层特征的研究(Whiteman et al., 1999; Schichtel et al., 2001; Senaratne and Shooter, 2004; Hudson and Brandt, 2005; Kassomenos et al., 2014)。Milionis and Davies(2008)利用高空气象观测资料对比分析相同的大气环流背景下沿海与内陆地区逆温层结的变化特征,Bian and Chen(2008)利用探空资料对比分析了北京上空的对流层逆温特

引用格式:夏敏洁,周文君,裴海瑛,等,2017.基于L波段雷达探空资料的南京低空逆温特征[J].大气科学学报,40(4):562-569.

Xia M J, Zhou W J, Pei H Y, et al., 2017. Characteristic analysis of lower-level temperature inversion over Nanjing based on L-band radar data[J]. Trans Atmos Sci, 40(4): 562-569. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170123001. (in Chinese).

征,发现其与同纬度的北美地区逆温结构相似。另外,也有很多国外学者着力于分析逆温层结特征对大气环境、大气污染的影响(Gillies et al., 2010)。国内也有很多学者利用探空资料、常规气象资料等分析大气温湿层结特征(秦泉, 2015; 杨茜等, 2016),利用高空气象观测资料分析边界层结构特征与污染预测模式的研究(杜荣光等, 2011; 张雪玲和陈润浩, 2011; 赵建华等, 2013; 王跃思等, 2014)。郑庆锋和史军(2011)利用上海宝山站的 L 波段雷达探空资料,统计分析该地区近 20 a 逆温要素特征变化及边界层气候变化特征。龙时磊等(2013)利用短期气候资料以及高空探测资料对逆温的气候特征和大气污染状况进行对比分析。同时也有根据气象条件具体分析过程性、区域性雾、霾的形成、维持和消散机制(张小曳等, 2013; 廖晓农等, 2014; 周文君等, 2016)。近几年,国内外已有学者利用新型气象观测仪器,如:微波辐射计、激光雷达等用于分析边界层特征变化(Zhang et al., 2014; 李力等, 2016),但是新仪器的观测仍有一定的误差,需要和探空资料进行校正和对比分析(吴蕾等, 2014)。

本文主要研究南京市边界层内低空逆温特征变化(2 km 以下),通过 2010—2015 年 6 a 内 08 时(北京时间,下同)和 20 时的 L 波段雷达探空观测资料秒级数据,深入系统地分析南京市低空逆温层结构变化特征及演变规律,包括:逆温频率、逆温层厚度以及逆温强度。同时,根据南京市环境监测中心站提供的污染物浓度资料,初步分析了逆温要素与污染物浓度的相关关系。

1 资料与方法

所选资料为南京国家基本气象站(118.9°E, 31.9°N, 海拔高度为 36 m) L 波段雷达探空观测资料秒级数据,根据《高空气象探测规范》进行取值。选用资料时段为 2010 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日逐日北京时 08 时和 20 时两次施放的 GTS1 型数字式探空仪的探测资料,利用 L 波段(1 型)高空气象探测系统数据处理软件对数据进行处理,得到逐日两个时次的逆温资料。污染物浓度资料为南京市环境监测中心站提供,所选时段为 2014—2015 年逐日 08 时和 20 时的国控点采集数据的小时浓度均值。

本文讨论边界层 2 km 以下低空逆温,根据逆温层底高将其分为接地逆温和悬浮逆温。逆温统计要素有:1)逆温日:只要 08 时或 20 时任一时刻出现逆

温,计为一个逆温日;2)逆温层底高 H_1 ,逆温层顶高 H_2 ,分别用逆温层起始高度和终止高度减去本站海拔高度而得,其中接地逆温的逆温层底高为 0 m;逆温层厚度为 $\Delta H = H_2 - H_1$,单位为 m;由于低空可能出现多层逆温,既可能出现接地逆温,也可能出现多层悬浮逆温,因此多层逆温的逆温层厚度选择厚度最大的一层;3)逆温层温差为 $\Delta T = T_2 - T_1$,单位为℃, T_2 为逆温层顶温度, T_1 为逆温层底温度;4)逆温强度,用 I 表示: $I = \Delta T / \Delta H \times 100\%$,表示逆温层内每升高 100 m 温度的升高值,单位为℃/hm。为了便于分析,文中将逆温强度分为 6 个等级,见表 1。

2 南京市低空大气逆温特征

2.1 低空逆温频率

利用南京市探空资料 2010—2015 年共 1 916 d (缺失资料已剔除)中逐日的探空资料分析发现,08 时出现逆温的日数为 1 530 d,出现频率为 79.6%, 20 时出现逆温的日数为 1 357 d,出现频率 70.8%,低空逆温日为 1 565 d,出现频率高达 81.7%,其中接地逆温的出现频率为 23.9%,悬浮逆温的出现频率为 71.8%。

从逆温频率的月变化(图 1)来看,接地逆温和悬浮逆温均表现为盛夏季节少,秋冬季节发生频率高的特点。其中,08 时接地逆温在 12 月发生频率最高,8 月频率最低;20 时接地逆温在 10 月发生频率最高,6 月频率最低;08 时悬浮逆温在 7 月、8 月发生频率明显偏低,其他时间发生频率均较高;20 时的悬浮逆温与逆温总出现频率一致,均呈现两头高中间低的 V 型结构,即夏季逆温出现频率低,冬季逆温出现频率高的特征。而出现这种特征的原因与南京地区的季节气候特征密切相关。众所周知,逆温的形成与气象条件、气象要素变化、地形等都密切相关,可分为辐射逆温、平流逆温、下沉逆温、锋面逆温等,其中辐射逆温最为常见,而太阳辐射的日变化是辐射逆温形成的关键要素。在南京地区,冬季天气形势较为稳定,多为沿海槽后西北气流控制,天气晴好,湍流作用较弱,白天吸收太阳辐射地面增温,夜间地面不断向大气发射长波辐射加热大气,而地面冷却降温,有利于形成较强的辐射逆温。而夏季天气复杂,湍流加强,多不利于形成较强逆温。因此,逆温出现频率表现出明显的季节变化特征。

低空逆温的垂直结构特征表现为:逆温厚度薄且多层,早晨的逆温频率和层次明显大于夜晚。根据分析发现:08 时出现多层逆温的频率为 31.5%,

逆温多为1~3层,最多4层,仅19次;20时出现多层逆温的频率为27.6%,逆温多为1~2层,最多也是4层,仅10次。

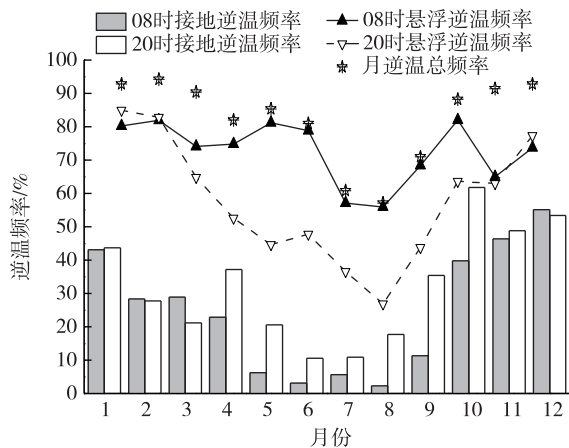


图1 2010—2015年08时和20时逆温频率的逐月变化
Fig.1 Monthly average frequency of temperature inversion at 08:00 and 20:00 BST during 2010—2015

2.2 逆温厚度

逆温层厚度一定程度反映了特殊层的时空分布特征及逆温强度。根据南京站6a的资料分析表明,08时低空逆温平均厚度较20时大,其中08时低空逆温层年平均厚度为258.6 m,3月的平均逆温厚度最大为334.6 m,8月最薄,月平均厚度为165 m,6a中08时逆温层厚度极大值出现在2010年3月5日,为1068 m。20时逆温层年平均厚度为205 m,月平均最大值出现在2月,为294.5 m,月平均最小值也是出现在8月,为122 m,6a中20时逆温层厚度极大值出现在2011年12月30日,为934 m。从图2可以看出,08时和20时的逆温厚度月变化趋势基本一致,但08时平均逆温厚度比20时逆温厚度大。出现这种现象的原因可能是:白天受太阳辐射影响,地面增温,湍流较强,即使有逆温层,受湍流影响也会有所减弱;夜间地面随着辐射冷却不断降温,湍流减弱,逆温层厚度不断增大,直到次日日出之前,逆温层厚度达到最大值,因此早间的逆温层厚度比晚间的逆温层厚度大。此外,逆温层的厚度与风速也有密切关系,夜间湍流较弱,风速减小,更有利于使逆温得到发展。

从图3中可以看出,接地逆温和悬浮逆温的逆温层厚度月变化趋势与逆温频率月变化趋势较一致,但接地逆温平均逆温层厚度小于悬浮逆温。08时接地逆温的平均逆温层厚度为232.5 m,20时接地逆温的平均厚度为106.4 m,08时接地逆温平均

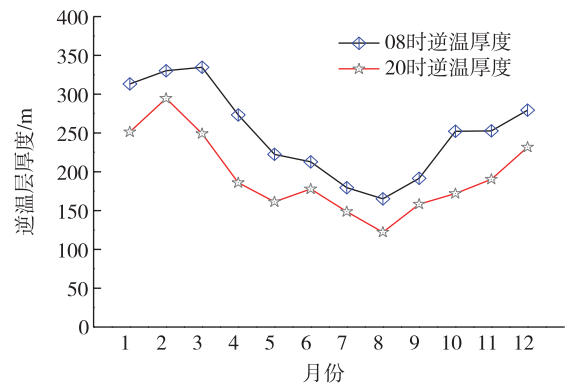


图2 2010—2015年08时和20时逆温层厚度的逐月变化
Fig.2 Monthly average inversion thickness at 08:00 and 20:00 BST during 2010—2015

厚度约为20时的2倍。08时接地逆温月平均最大值为279 m,出现在3月,月平均最小值仅72 m,出现在8月。08时悬浮逆温的平均厚度为250 m,20时悬浮逆温的平均厚度233 m,最大月平均厚度为355 m,出现在3月。

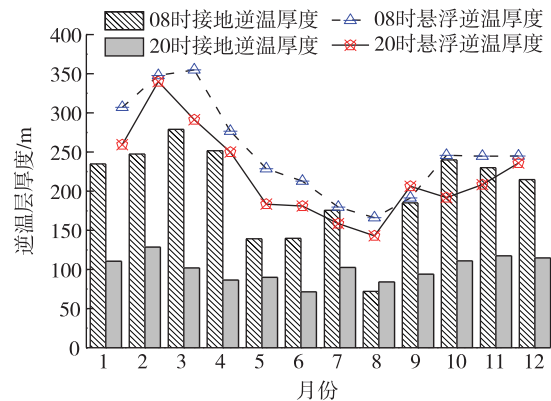


图3 2010—2015年08时和20时接地逆温和悬浮逆温的逆温层厚度变化
Fig.3 Monthly average ground inversion thickness and suspended inversion thickness at 08:00 and 20:00 BST during 2010—2015

总体来看,南京市夏季逆温层厚度最薄,冬季到初春逆温层厚度较大;悬浮逆温厚度大于接地逆温厚度,早间的逆温层厚度大于晚间的逆温层厚度。

2.3 低空逆温强度

逆温层内温度垂直递减率称为逆温强度,它是大气层结稳定度的重要指标之一。南京市逆温强度夏季小,冬季大,有明显的季节变化趋势。08时平均逆温强度为1.12 °C/hm,20时平均逆温强度为1.22 °C/hm,早晚差异并不大,但接地逆温平均逆温强度是悬浮逆温平均逆温强度的1.5倍。从

2010 年到 2015 年南京市边界层内逆温强度的月变化分布(图 4)可以看出:悬浮逆温强度随季节变化差异较小,但接地逆温强度有明显的季节变化趋势,6 月接地逆温强度达到最小值,12 月接地逆温平均强度最大,两个时次的接地逆温都呈 V 状分布,但数值差异很小,也就是早晚逆温强度差异很小。

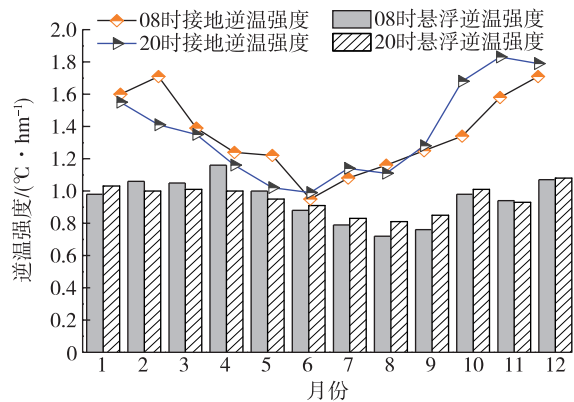


图 4 2010—2015 年 08 时和 20 时接地逆温和悬浮逆温的逆温强度变化
Fig.4 Monthly average ground inversion intensity and suspended inversion intensity at 08:00 and 20:00 BST during 2010—2015

为了进一步分析逆温强度的变化,文中将逆温强度分为 6 个等级,从表 1 中可以看出:两个时次均是逆温强度 1 级出现频率最高,其次为 2 级,逆温强度达到 2.0 °C/hm 以上的 5 级和 6 级仅有不到 10%,两个时次随着逆温强度等级的升高都呈由多到少的趋势。其中 08 时逆温强度最大值为 5.87 °C/hm,出现在 2014 年 11 月 18 日,20 时逆温强度极大值为 6.0 °C/hm,出现在 2014 年 1 月 1 日。表 2 给出了每个月强逆温(逆温强度大于 2 °C/hm)出现的频次,从表中可以看出:强逆温(5 级、6 级)基本都是出现 10 月到 3 月,其中 12 月最多,1 月、2 月和 11 月次之,也就是强逆温多数(50%以上)出现在冬季。

表 1 08 时和 20 时各等级逆温强度的出现频率
Table 1 Frequency of inversion at each grade at 08:00 and 20:00 BST %

逆温强度等级	08 时出现频率	20 时出现频率
1 级[0,0.5]	31.8	37.9
2 级(0.5,1.0]	30.8	27.6
3 级(1.0,1.5]	19.1	16.3
4 级(1.5,2.0]	10.5	8.3
5 级(2.0,2.5]	4.3	4.5
6 级(2.5,∞)	3.5	5.4

表 2 强逆温出现频次的月分布
Table 2 Monthly distribution of strong inversion frequency

月份	频次
1 月	23
2 月	20
3 月	10
4 月	8
5 月	8
6 月	6
7 月	0
8 月	0
9 月	4
10 月	14
11 月	21
12 月	34

2.4 逆温要素的年变化

表 3 是 2010—2015 年低空逆温层厚度、强度及发生频率的年际变化,可以看出:逆温层发生频率的年际变化趋势不是特别明显,基本维持在 65% ~ 85%;逆温层厚度在 2010—2012 年逐年下降,且逆温强度也有所减弱;而 2013—2015 年的逆温强度相对于 2010—2012 年有明显的增强。南京地处我国东部地区,近年来随着城市化的发展,高层建筑物不断增多,气候环境也发生了变化。根据常规气象观测资料计算发现,2010—2012 年南京站平均风速为 2.7 m/s,而 2013—2015 年南京站平均风速为 2.3 m/s。低空风速的大小与逆温产生的强弱有直接关系,风速较大时,空气上下混合较强,不利于逆温的形成。而 2010—2012 年的雨日较 2013—2015 年的雨日多,尤其是 2012 年雨日最多为 125 d,2013 年雨日最少为 88 d,2014 年雨日也较常年略偏少,为 96 d。总而言之,2013—2015 年较 2010—2012 年低空平均风速减小,雨日减少,受整个气候背景的影响,2013—2015 年的逆温强度较之前有所增强。

3 逆温特征与污染物浓度的关系

杜荣光等(2011)、龙时磊等(2013)在研究逆温层与污染物浓度的关系时指出:污染物浓度与逆温层底高呈明显的负相关,而与逆温强度成正相关。逆温层就像一层“棉被”盖在污染物的上方,使大气湍流减弱,污染物不能在垂直方向上得到扩散,使近地面浓度积聚升高。大气层结越稳定,污染物的稀释扩散能力越弱,往往就容易造成严重的污染天气。

表 3 2010—2015 年低空逆温层厚度、强度及发生频率的年际变化

Table 3 Interannual variations of averaged thickness, intensity and frequency of low-level inversion during 2010—2015

年份	08 时逆温 频率/%	20 时逆温 频率/%	08 时逆温层 厚度/m	20 时逆温层 厚度/m	08 时逆温强度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$)	20 时逆温强度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$)
2010	77.9	77.3	300	232	1.11	1.15
2011	81.8	69.8	255	206	1.03	1.16
2012	80.4	68.2	245	199	1.05	1.1
2013	83	73.5	274	211	1.18	1.3
2014	76.7	67.6	237	186	1.21	1.34
2015	78.8	72.3	244	198	1.18	1.27

3.1 南京市逆温频率与颗粒物浓度的变化

通过分析逆温要素与污染物浓度的变化关系,发现接地逆温的发生频率的月变化与污染物浓度的月变化有较好的一致性,尤其是 08 时的接地逆温频率正相关性更好,由此也说明了逆温频率与污染物浓度密切相关。图 5 给出了 2014 年到 2015 年 08 时、20 时接地逆温出现频率与相应时间内颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10})浓度的月变化,由图可见:逆温频率较高时对应的污染物浓度也较高,夏季逆温频率低,污染物浓度也相对较低,冬季逆温频率高,污染物浓度也达到最高值,污染物浓度的月变化趋势也呈两头高中间低的 V 型结构。这些充分说明了近地层逆温对污染物浓度变化的影响,也就是低空逆温对污染物的垂直扩散有明显的抑制作用。

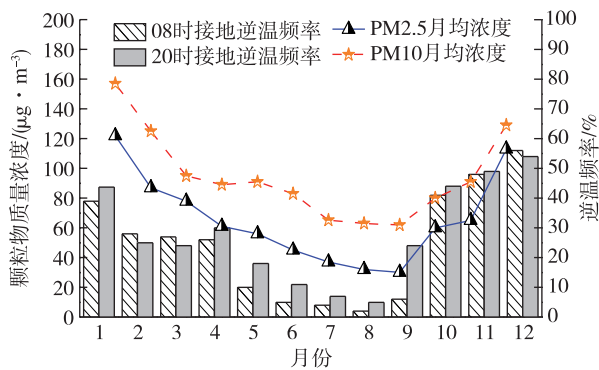


图 5 2014—2015 年 08 时和 20 时接地逆温频率与污染物质量浓度的逐月变化

Fig.5 Monthly average of ground inversion frequency and pollutant mass concentration at 08:00 and 20:00 BST during 2014—2015

3.2 低空大气逆温强度与污染物浓度的变化

逆温强度和逆温层厚度一定程度反映了特殊层的时空分布特征,都是大气层结稳定度的重要指标。

为了更好地分析逆温要素与污染物浓度之间的关系,利用 2014 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日逐日 08 时、20 时的探空资料和南京市环境监测中心站逐日 08 时、20 时的污染物小时浓度共 1 344 个样本(有效数据为 672 d),对污染物浓度与逆温强度、厚度分别进行相关分析。从表 4 可以看出:颗粒物浓度(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)的变化与逆温强度的变化呈很好的正相关性($\alpha=0.01$),二氧化硫、二氧化氮和一氧化碳的浓度变化也与逆温强度呈正相关。而臭氧与逆温强度呈负相关,这与臭氧在清晨和夜间的浓度特征有关。臭氧具有明显的光化学特征,即正午浓度高,夜间浓度低。在 08 时和 20 时臭氧的光化学生成很弱,此时臭氧浓度会受到滴定作用的影响表现为臭氧的消耗。当逆温强度比较大时,边界层更加稳定,消耗臭氧的前体物堆积会促进臭氧消耗反应的进行,从而进一步使臭氧浓度降低。因此臭氧浓度在 08 时和 20 时与逆温强度呈现反相关。逆温层厚度与颗粒物浓度(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)、 NO_2 、 CO 也呈正相关($\alpha=0.05$),但相关性没有逆温强度的相关性好, SO_2 和 O_3 未通过显著性检验。

由于雨雪天气会对空气中的污染物有一定的湿清除作用(周彬等,2015),在讨论逆温要素与污染物浓度的相关性时,会造成一定影响。因此根据常规气象观测资料,整理出非雨雪天气的探空资料和污染物浓度共 936 个样本(有效数据为 468 d),分析非雨雪天气下逆温要素与污染物浓度的相关性。从表 4、表 5 对比来看,剔除雨雪天气后的逆温强度与污染物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 和 CO)浓度之间相关性更显著,可以说明低空逆温对污染物的垂直扩散有明显的抑制作用。综上所述,逆温强度对空气质量预报有一定的指示意义。

表 4 逆温要素(逆温强度、逆温厚度)与污染物质量浓度的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between pollutant mass concentration and inversion factors (inversion intensity and thickness)

逆温要素	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
逆温强度	0.467 ¹⁾	0.483 ¹⁾	0.291 ²⁾	0.401 ²⁾	-0.343 ²⁾	0.448 ²⁾
逆温厚度	0.271 ²⁾	0.204 ²⁾	0.091	0.105 ²⁾	-0.072	0.118 ²⁾

注:1)表示通过 0.01 信度的显著性检验;2)表示通过 0.05 信度的显著性检验。

表 5 剔除雨雪日后逆温要素(逆温强度、逆温厚度)与污染物质量浓度的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between pollutant mass concentration and inversion factors (inversion intensity and thickness) excluding the rainy days

逆温要素	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
逆温强度	0.549 ¹⁾	0.589 ¹⁾	0.345 ¹⁾	0.458 ¹⁾	-0.423 ²⁾	0.511 ²⁾
逆温厚度	0.322 ²⁾	0.285 ²⁾	0.111	0.089	-0.067	0.153

注:1)表示通过 0.01 信度的显著性检验;2)表示通过 0.05 信度的显著性检验。

4 结论与讨论

1)南京市低空逆温的垂直结构特征表现为:逆温厚度薄且多层,早晨的逆温频率和层次明显大于夜晚;逆温发生频率较高,出现接地逆温的频率为 23.9%,悬浮逆温的频率为 71.8%,且均表现为盛夏季节少,秋冬季节高的特点。

2)逆温层厚度夏季最薄,冬季到初春较大;早间的逆温层厚度大于晚间,悬浮逆温厚度大于接地逆温厚度。

3)逆温强度夏季小,冬季大;08 时平均逆温强度与 20 时差异很小,但接地逆温平均逆温强度是悬浮逆温的 1.5 倍,逆温强度大于 2℃/hm 的强逆温多数(50%以上)出现在冬季。

4)通过计算污染物浓度与逆温强度的相关性发现:颗粒物浓度(PM₁₀和 PM_{2.5})与逆温强度、逆温层厚度都有很好的正相关性,二氧化硫、二氧化氮和一氧化碳的浓度变化也与逆温强度呈正相关。由此说明了近地层逆温对污染物浓度变化的影响。

致谢:感谢南京市环境监测中心站提供污染物监测资料。

参考文献(References)

Bian J C,Chen H B,2008.Statistics of the tropopause inversion layer over Beijing[J].Adv Atmos Sci,25(3):381-386.

程念亮,李云婷,张大伟,等,2015.2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J].环境科学研究,28(2):163-170. Cheng N L,Li Y T,Zhang D W,et al.,2015.Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J].Res Environ Sci,28(2):163-170.(in Chinese).

杜荣光,齐冰,郭惠惠,等,2011.杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J].气象与环境学报,27(4):49-53. Du R G,Qi B,Guo H H,et al.,2011.Characteristics of atmospheric inversion temperature and its influence on concentration of air pollutants in Hangzhou,Zhejiang Province[J].Journal of Meteorology and Envirnmnt,27(4):49-53.(in Chinese).

Gillies R S,Wang S,Booth M R,2010.Atmospheric scale interaction on wintertime intermountain west low-level inversions[J].Wea Forecasting,25(4):1196-1210.

Hudson S R,Brandt R E,2005.A look at the surface-based temperature inversion on the Antarctic Plateau[J].J Climate,18(11):1673-1696.

Kassomenos P A,Paschalidou A K,Lykoudis S,et al.,2014.Temperature inversion characteristics in relation to synoptic circulation above Athens, Greece[J].Environmental Monitoring and Assessment,186(6):3495-3502.

李力,张蓬勃,戴竹君,等,2016.利用微波辐射计对南京 2013 年 12 月霾天大气温湿结构的探测分析[J].气候与资源研究,21(1):8-16. Li L,Zhang P B,Dai Z J,et al.,2016.Using microwave radiometer data to detect and analyze the atmospheric temperature and moisture structure of the haze weather of Nanjing in December 2013[J].Climatic and Environmental Research,21(1):8-16.(in Chinese).

廖晓农,张小玲,王迎春,等,2014.北京地区冬夏季持续性雾—霾发生的环境气象条件对比分析[J].环境科学,35(6):2031-2044. Liao X N,Zhang X L,Wang Y C,et al.,2014.Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J].Environ Sci,35(6):2031-2044.(in Chinese).

刘端阳,张靖,吴序鹏,等,2014.淮安一次雾霾过程的污染物变化特征及来源分析[J].大气科学学报,37(4):484-492. Liu D Y,Zhang J,Wu X P,et al.,2014.Characteristics and sources of atmospheric pollutants during a fog-haze process in Huai'an[J].Trans Atmos Sci,37(4):484-492.(in Chinese).

龙时磊,曾建荣,刘可,等,2013.逆温层在上海市空气颗粒物积聚过程中的作用[J].环境科学与技术,36(6L):104-109. Long S L,Zeng J R,Liu K,et al.,2013.Impact of temperature inversion layer on accumulation process of particulate matters in Shanghai[J].Environment Science and Technology,36(6L):104-109.(in Chinese).

- Milionis A E, Davies T D, 2008. A comparison of temperature inversion statistics at a coastal and a non-coastal location influenced by the same synoptic regime [J]. *Theor Appl Climatol*, 94(3/4): 225-239.
- 秦泉, 2015. 冬季乌鲁木齐逆温时空变化特征及其大气环境效应[D]. 南京: 南京信息工程大学: 4-8. Qin Q, 2015. Urumqi winter inversion temporal variation and atmospheric environment effect[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology: 4-8. (in Chinese).
- Schichtel B A, Husar R B, Fallke S R, et al., 2001. Haze trends over the United States, 1980—1995[J]. *Atmos Environ*, 35(30): 5205-5210.
- Senaratne I, Shooter D, 2004. Elemental composition in source identification of brown haze in Auckland, New Zealand[J]. *Atmos Environ*, 38(19): 3049-3059.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等, 2003. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社: 239-242. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al., 2003. *Atmospheric Physics*[M]. Beijing: The Peking University Publishing House: 239-242. (in Chinese).
- 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等, 2014. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. *地球科学进展*, 29(3): 338-396. Wang Y S, Zhang J K, Wang L L, et al., 2014. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Advances in Earth Science*, 29(3): 388-396. (in Chinese).
- Whiteman C D, Bian X, Zhong S, 1999. Wintertime evolution of the temperature inversion in the Colorado Plateau Basin[J]. *J Appl Meteor*, 38(8): 1103-1117.
- 吴蕾, 陈洪滨, 康雪, 2014. 风廓线雷达与 L 波段雷达探空测风对比分析[J]. *气象科技*, 42(2): 225-230. Wu L, Chen H B, Kang X, 2014. Comparison between wind profile and L band upper-air meteorological sounding system[J]. *Meteor Sci Tech*, 42(2): 225-230. (in Chinese).
- 杨茜, 高阳华, 杨世琦, 等, 2016. L 波段雷达资料在雾的边界层逆温特征中的应用[J]. *高原山地气象研究*, 36(3): 71-75. Yang Q, Gao Y H, Yang S Q, et al., 2016. Application of L-band Radar radiosonde data to the boundary layer inversion characteristic analysis in the fog[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 36(3): 71-75. (in Chinese).
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N, 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Science China: Earth Science*, 57: 26-35.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等, 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 58: 1178-1187. Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al., 2013. Factors contribution to haze and fog in China[J]. *Science China*, 58(13): 1178-1187. (in Chinese).
- 张雪玲, 陈润浩, 2011. 南阳边界层逆温特征分析[J]. *气象与环境科学*, 34(S): 116-119. Zhang X L, Chen R H, 2011. Inversion characteristic analysis of Nanyang Boundary layer[J]. *Meteor Environ Sci*, 34(S): 116-119. (in Chinese).
- 张振秀, 2015. 昆明地区对流层中下层逆温分析[D]. 昆明: 云南大学: 15-20. Zhang Z X, 2015. The analysis of temperature inversion in the low and middle troposphere in Kunming[D]. Kunming: Yun Nan University: 15-20. (in Chinese).
- 赵建华, 张强, 王胜, 等, 2013. 西北干旱区夏季大气边界层逆温强度和高度的频率密度研究[J]. *高原气象*, 32(2): 377-386. Zhao J H, Zhang Q, Wang S, et al., 2013. Studies on frequency density of inversion intensity and height of atmospheric boundary layer in arid region of northwest China[J]. *Plateau meteorology*, 32(2): 377-386. (in Chinese).
- 郑庆锋, 史军, 2011. 上海地区大气贴地逆温的气候特征[J]. *干旱气象*, 29(2): 195-200. Zheng Q F, Shi J, 2011. Temperature inversion characteristics of lower atmosphere over Shanghai[J]. *J Arid Meteor*, 29(2): 195-200. (in Chinese).
- 周彬, 刘端阳, 魏建苏, 等, 2015. 降水对气溶胶颗粒物清除作用的初步分析[J]. *长江流域资源与环境*, 24(S1): 160-170. Zhou B, Liu D Y, Wei J S, et al., 2015. A preliminary analysis on scavenging effect of precipitation on aerosol particles[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(S1): 160-170. (in Chinese).
- 周文君, 平海波, 刘端阳, 等, 2016. 江苏盐城地区一次持续雾霾天气过程的综合分析[J]. *气象*, 42(7): 838-846. Zhou W J, Ping H B, Liu D Y, et al., 2016. Analysis of the sustained fog-haze event in Yancheng[J]. *Meteor Mon*, 42(7): 838-846. (in Chinese).

Characteristic analysis of lower-level temperature inversion over Nanjing based on L-band radar data

XIA Minjie¹, ZHOU Wenjun², PEI Haiying¹, DAI Zhujun¹

¹Nanjing Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210000, China;

²Yancheng Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Yancheng 224000, China

The temperature inversion in the boundary layer is an important indicator of atmospheric stability. The strong inversion may result in the accumulation of pollutants in the lower layer. In addition, the accumulation of strong inversion energy can also cause severe convective weather. All of these have a huge impact on the production of human life. In order to analyze the characteristics of temperature inversion in the boundary layer (below 2 km) o-

ver Nanjing City, this paper used the daily L-band radar data at 08:00 BST and 20:00 BST from 2010 to 2015. The frequency, intensity and thickness of ground temperature inversion and suspended inversion were analyzed in detail. The results reveal that the frequency of temperature inversion is high over Nanjing, up to 81.68%, including 23.9% ground inversion and 71.8% suspended inversion. The frequency of temperature inversion at 08:00 BST is higher than that at 20:00 BST. The temperature inversion occurs mostly in autumn and winter and rarely in summer. The inversion thickness is the lowest in summer and the maximum in winter and early spring. The inversion thickness at 08:00 BST is larger than that at 20:00 BST. The thickness of suspended inversion is larger than that of ground inversion. This phenomenon is due to the change of solar radiation. Solar radiation increases temperature at day time and strengthens the turbulence, resulting in the inversion weakened or disappeared. On the contrary, the ground temperature gradually decreased at night with the turbulence weakening, which resulting in the inversion intensity and thickness strengthened. The inversion intensity is weak in summer and strong in winter, which has an obvious seasonal variation. There is a little difference in inversion intensity between 08:00 BST and 20:00 BST. But the average of ground inversion intensity is 1.5 times of suspended inversion intensity. Most of strong inversion with intensity higher than $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ happened in winter. Based on the daily monitoring data of mass concentration of air pollutants in 2014 and 2015, the paper analyzed the relativity of pollutant mass concentration and inversion elements (inversion intensity and inversion thickness). The results reveal that the mass concentrations of pollutants (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 and CO) are in positive correlations with the inversion intensity and thickness. In other words, the stronger the inversion layer, the higher the pollutant mass concentration. The mass concentration of ozone is in a negative correlation with the inversion intensity and thickness, which is related to the diurnal variation of ozone mass concentration. Therefore, the atmosphere inversion in the low layer is one of important factors that influence the air quality. The changes of the inversion elements (inversion intensity and thickness) have certain directive significance to air quality forecast.

temperature inversion intensity; frequency of temperature inversion; ground inversion; suspended inversion

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170123001

(责任编辑:张福颖)