

陆春松,牛生杰,岳平,等. 2011. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J]. 大气科学学报,34(1):58-65.

Lu Chun-song, Niu Sheng-jie, Yue Ping, et al. 2011. Observational research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing[J]. Trans Atmos Sci, 34(1):58-65.

## 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析

陆春松<sup>1</sup>, 牛生杰<sup>1</sup>, 岳平<sup>2,3,4</sup>, 岳治国<sup>5</sup>, 项磊<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 3. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

4. 中国气象局 干旱气候变化与减灾重点开放实验室 甘肃 兰州 730020; 5. 陕西省人工影响天气中心, 陕西 西安, 710014)

**摘要:** 2006年冬季在南京北郊盘城利用系留气球探测系统、自动气象站等仪器对雾日和非雾日的边界层进行了监测, 对比分析了两者的边界层结构。结果表明, 非雾日主要为单层贴地逆温, 并时常出现短时的双层结构, 雾发展成熟时逆温则脱离地面。与非雾日相比, 雾日平均雾顶之上温度日较差增大, 雾顶之下则减小。平均风速的时间—高度分布在雾日和非雾日类似, 在稳定性边界层中风速随高度出现一个或者两个极大值区。温度和比湿在非雾日没有显著的对对应性, 而在雾体内具有较好的对应关系, 在雾顶升降过程中反相关。较强的逆温、较低的温度和较小的近地层风速是南京冬季成雾的背景条件。

**关键词:** 雾; 多发期; 边界层; 冬季; 南京

**中图分类号:** P426.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-7097(2011)01-0058-08

## Observational research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing

LU Chun-song<sup>1</sup>, NIU Sheng-jie<sup>1</sup>, YUE Ping<sup>2,3,4</sup>, YUE Zhi-guo<sup>5</sup>, XIANG Lei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Physics & Environment, China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 3. Opening Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster, Lanzhou 730020, China;

4. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

5. Center of Weather Modification of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China)

**Abstract:** An observation was carried out in the winter in 2006 at Pancheng, northern suburb of Nanjing, using tethered balloon system, automatic weather station and other instruments. The boundary layer structures on fog and fog-free days are analyzed and compared. Results show that on the fog-free days the temperature inversions are mainly single-layer ones, sometimes with short duration double-layer structures, while the fog mature stage inversions are free from the ground. Compared with the fog-free days, the temperature diurnal range above the average fog top on fog days is larger while the below one is smaller. The time-height cross section of average wind speed on the fog days is similar to that on the fog-free days. In the stable boundary layer, the wind speed profiles have one or two maximum values. The average wind speed profiles on fog days are similar to those on the fog-free days. No remarkable relationship exists between the temperature and specific humidity profiles on the fog-free days. Differently, these two parameters have a good correspondence between each other in the fog body whereas

收稿日期: 2010-06-12; 改回日期: 2010-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40775012; 41075008); 中国气象局气象行业专项(GYHY(QX)2007-6-26); 江苏省高校自然科学基金重大项目(06KJA17021; 08KJA170002); 江苏省自然科学基金重点项目(BK2007727); 江苏省青蓝工程云雾降水物理学与气溶胶研究创新团队项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX09B\_226Z)

作者简介: 陆春松(1982—), 男, 江苏吴江人, 博士生, 研究方向为云雾物理化学, luchunsong110@gmail.com.

they vary oppositely during the ascent and descent of the fog top. The stronger temperature inversion, lower temperature and smaller near-surface-layer wind speed are background for the winter fog formation in Nanjing.

**Key words:** fog; high incidence period; boundary layer; winter; Nanjing

## 0 引言

大气边界层是整个地球大气层中最复杂,也是最关键的部分之一(张强等,2004)。它是人类生活和生产活动的主要空间,地气之间的物质、能量和各种通量的交换以及大气污染等都主要发生在这里,全球变化的区域响应以及地表变化和人类活动对气候的影响也是通过大气边界层过程来实现的(胡非等,2003)。诸多学者对非雾日边界层结构进行了大量的观测研究(蒋维楣和苗世光,2004;徐祥德等,2004;岳平等,2008)。雾是边界层内的重要天气现象,严重影响了交通运输、输变电路等的正常运行,引起人们极大的关注。30多年以来,国外进行了多次大规模的雾外场观测研究(Pilie et al., 1975; Roach et al., 1976; Fuzzi et al., 1992; Gultepe et al., 2009)。中国雾的研究也日趋增多,比较大的计划有:沪宁高速公路雾研究(黄建平等,1998;李子华等,1999),重庆辐射雾观测(Li et al., 1994;何友江等,2003),西双版纳雾研究(黄玉生等,2000;濮梅娟等,2001),南岭平流雾野外观测(吴兑等,2004)和北京冬春季雾的观测研究(王凯等,2006)等。这些项目对雾日的边界层结构进行了广泛而深入的分析,揭示了不同地区雾过程中边界层气象要素的演变规律。

南京是一个迅速发展的大城市,其边界层研究很受重视,取得了丰硕的成果。沈觉成和楚涤修(1990)利用南京北郊300 m高处的等容球资料,计算了湍流强度、自相关系数、湍流积分尺度及湍谱等湍流统计特征。沈觉成和吴息(1991)根据南京城乡边界层500 m内的温度资料,分析了不同稳定度时的温度廓线特征。苏秀娟等(1993)提出了利用常规气象资料估算对流边界层特征尺度的方法。刘立忠和徐抗英(1998)利用低空探测资料揭示了南京近郊初冬大气边界层风温场在不同天气条件下的特征。魏鸣等(2007)对比了南京多普勒雷达晴空回波资料与实际的气象观测资料,探讨了边界层回波与湍流混合特性之间的关系。刘红年等(2008)利用市郊边界层资料,揭示了南京城区“热岛”、“干岛”及风速小等特征。毛敏娟等(2006)分析了南京

城区气象激光雷达资料,提出了一种边界层高度的确定方法并揭示了地面气象环境对边界层日变化的影响。此外,长江三角洲地区秋冬季节是浓雾的高发时期(周自江等,2007),黄建平等(1998)及李子华等(1999)分析了发生在南京地区的一次浓雾过程,结果表明,随着雾的形成和发展,逆温层抬至雾顶之上,强度增强;雾区为相对湿度的高值区,同时又是比湿的低值区;低空急流出现在雾形成之前和雾发展初期,雾发展后便消失。

为了进一步揭示南京地区非雾日边界层结构的普遍规律以及更加全面地认识雾日边界层结构的特殊性,2006年冬在南京北郊盘城利用系留气球探测系统、自动气象站等仪器对边界层进行了观测,对比分析了南京冬季雾日与非雾日的边界层结构,以期促进雾的消机制研究并为雾的预警预报提供一些参考。

## 1 观测场地及仪器

2006年11月30日—12月15日及12月24—27日,在南京北郊盘城进行了雾的观测研究,该采样点位于长江以北,南京江北化学工业园附近,海拔22 m,经纬度分别为118.7°E、32.2°N(Lu et al., 2010; Niu et al., 2010a)。观测项目包括边界层结构、地面常规气象要素、雾滴谱、气溶胶粒子谱、雾水采样等。

边界层探测采用芬兰Vaisala公司生产的系留气球探测系统(DigiCORA III)。一般而言,1~3 s产生一组数据,包括气压、温度、相对湿度、海拔高度、风速、风向、电池电量、位温、露点温度、比湿、混合比等。在风速等天气条件允许的情况下,非雾日一般3 h观测一次,出现雾时加密观测,间隔1~1.5 h,每次探测时间40 min左右,高度一般在600~1000 m之间。温度、相对湿度、气压、风速、风向传感器的分辨率分别为0.1 °C、0.1%、0.1 hPa、0.1 m/s、1°。

地面常规气象要素的观测采用ICT国际有限公司生产的自动气象站(EnviroStation™),每个传感器都有16位的分辨率和1%~3%的精度。可以根据用户需要设置传感器采集时间间隔,最小为

1 s, 最大为 1 h, 本次探测中每隔 30 min 获得地表气温、相对湿度、风速、风向等要素值。

## 2 非雾日的平均边界层特征

### 2.1 平均温度廓线

图 1 为观测期间非雾日平均温度、平均风速和平均比湿的时空剖面图。700 m 左右, 温度日较差很小。随着高度降低, 日较差增大, 近地层最高最低气温分别出现在 13:30—15:00(北京时间, 下同)和 03:00—05:30 左右, 温差达到 6.7 °C。日落(17:00 左右)之后存在近地层逆温, 次日在太阳辐射作用下消散。为了更深入地分析边界层温度廓线的演变规律, 表 1 给出了非雾日每一个典型逆温的生消过程。晴天时, 逆温出现及消散时间分别在 16:30—18:50 及第二日 09:50—11:20 之间, 持续时间为 15~18.5 h。多云或阴天时, 云的存在削弱了地面及近地层长波辐射的降温作用, 逆温形成时间推后, 如 11 月 4 日、6 日, 平均出现时间(21:50)比晴天时(17:30)晚 4.3 h; 在逆温的消散阶段, 由于天气条件转为少云或轻雾, 云对到达地面的太阳辐

射的削弱作用不明显, 故消散时间没有显著的推迟, 逆温持续时间平均减少 3.7 h。逆温单层结构较普遍, 4/8 的个例有双层结构出现, 但维持时间较短, 大部分(3/4)在 5 h 以下。从强度来看, 上层逆温强度较弱, 其最大强度均小于近地层逆温。可见, 南京地区冬季主要为单层逆温, 并时常出现短时的双层结构。

### 2.2 平均风速廓线特征

如表 2 所示, 在探测得到的 8 次逆温生消过程中, 风速廓线在各个阶段呈现出不同的特点。生成阶段: 近地层风速随高度递增, 中高层趋于均匀化(5/8); 维持阶段: 风速出现了一个或者两个极大值区(定义为风速极大值超出上方和下方相邻气层极小值 2 m/s 以上(Andreas et al., 2000; 李炬和舒文军, 2008)); 逆温消散阶段和无逆温阶段: 特征类似于生成阶段, 但发生的概率更大(6/7)。上述特征在平均风速的时空剖面图上也有很好的体现(图 1b), 并且从 2008 年南京市区和郊区的同步边界层资料(张礼春等(2009)中图 1c 和图 4)来看, 也存在类似的现象。一般而言, 逆温形成时, 近地层稳定性

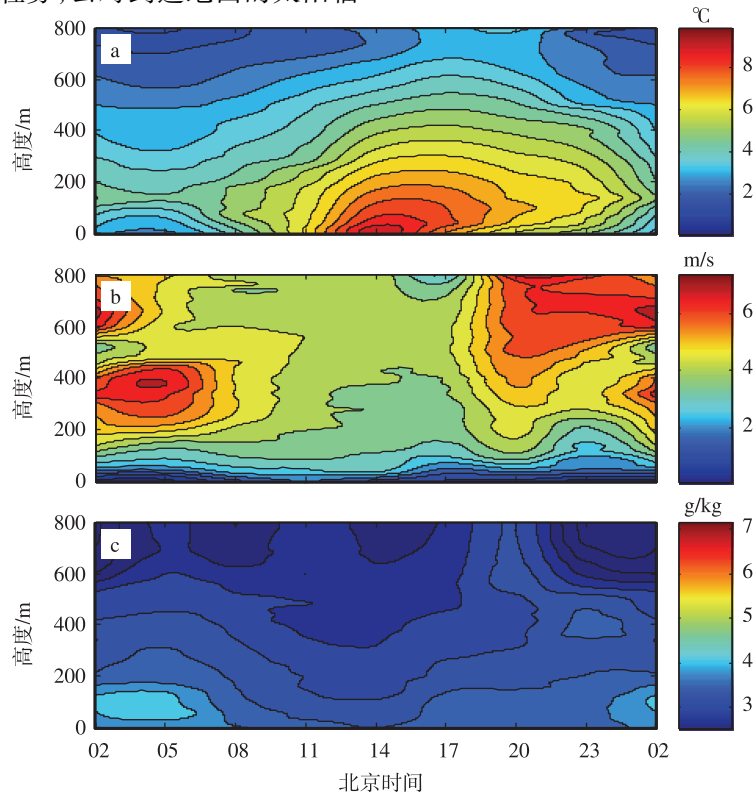


图 1 2006 年 11 月 30 日—12 月 15 日非雾日平均温度(a; 单位: °C)、平均风速(b; 单位: m/s)和平均比湿(c; 单位: g/kg)的时空剖面

Fig. 1 The height-time cross-section of (a) average temperature(°C), (b) average wind speed(m/s) and (c) average specific humidity(g/kg) of the fog-free days from November 30th to December 15th, 2006

表 1 非雾日典型逆温特征

Table 1 The characteristics of typical temperature inversions on the fog-free days

序号	生消时间	维持时间/h	厚度范围/m	强度范围/( $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ )	天气实况
1	11.30 17:20—12.01 09:50 (12.01 01:40—04:40) <sup>2)</sup>	16.3 (3) <sup>2)</sup>	20~200 (120~120) <sup>2)</sup>	1.22~10.74 (0.70~0.84) <sup>2)</sup>	晴
2	12.01 16:30—12.02 11:00 (12.01 00:30—11:00) <sup>2)</sup>	18.5 (10.5) <sup>2)</sup>	40~100 (60~220) <sup>2)</sup>	0.68~2.30 (0.26~0.33) <sup>2)</sup>	晴
3	12.03 18:50—12.04 09:50 (12.04 02:40—07:40) <sup>2)</sup>	15 (5) <sup>2)</sup>	20~120 (120~140) <sup>2)</sup>	0.23~4.63 (0.48~0.68) <sup>2)</sup>	晴到少云
4	12.04 21:20—12.05 10:00	12.7	40~180	0.43~1.71	多云转少云
5	12.06 16:30—12.07 11:20 (12.06 16:30—18:30) <sup>2)</sup>	18.8 (2) <sup>2)</sup>	120~420 (80~80) <sup>2)</sup>	0.43~1.92 (0.83~0.83) <sup>2)</sup>	雨、后出现轻雾
6	12.09 22:20—12.10 11:50	13.5	60~180	0.68~1.22	阴、后出现轻雾
7	12.10 17:20—12.11 11:20	18	20~120	0.92~7.73	晴、后出现轻雾
8 <sup>1)</sup>	12.14 17:00—	$\geq 16$	40~340	1.11~6.27	晴

注:1) 12.14 逆温消散阶段未观测到;

2) ()内的数字表示双层逆温出现时上层逆温的相关参量值。

增强,但逆温之上仍为不稳定层;逆温消散时和无逆温存在时,边界层结构则多为对流性边界层。在这三个阶段,湍流发展旺盛,动量交换充分,中高层风速趋于均匀化(随高度等值分布),这符合对流性边界层的普遍特征(盛裴轩等,2003)。同时,由于下垫面的摩擦作用,近地层风速始终较小,无明显的日变化特征。逆温的维持阶段为稳定性边界层,在逆温顶之上往往存在风速的极大值(赵德山和洪钟祥,1981)。01:00—07:00和19:00—次日04:00分别在250~450 m和450~800 m气层出现极大值,大于7 m/s(图1b)。

表 2 非雾日典型逆温生消过程中的风速廓线特征

Table 2 The characteristics of wind speed vertical profiles during the formation/dissipation processes of typical temperature inversions on the fog-free days 次

	近地层风速递增, 中高层趋于均匀化 <sup>1)</sup>	存在一个或 两个极大值区	趋于线 性化 <sup>2)</sup>	合 计
逆温形成阶段	5	2	1	8
逆温维持阶段		8		8
逆温消散阶段	6	1		7
无逆温阶段	6	1		7

注:1)“趋于均匀化”表示风速随高度变化不大,趋于等值分布;

2)“趋于线性化”表示风速随高度呈线性增加趋势。

### 2.3 平均比湿廓线特征

如表3、4所示,非雾日有逆温存在时,近地层逆温下比湿出现极大值的情况占43/62(包含2个“其

他”类型);相应地,平均比湿的时空分布(图1c)表明,水汽在稳定边界层中累积,近地层易形成逆湿现象,01:30—06:30近地层出现比湿的弱极大值区。没有逆温存在时,比湿趋于均匀化(随高度等值分布)的情况占主导(21/37),此外“低层递减,中高层趋于均匀化”和“中低层趋于均匀化,高层递减”两种类型均占6/37。图1c表明11:00—15:00为比湿的低值区,14:00地面比湿仅3.52 g/kg,并且0~800 m等值线稀疏,这主要是因为此时属于对流性边界层,湍流促使边界层内水汽向上输送,导致0~800 m气层比湿减小。值得指出的是,非雾日的大多数情况下,湿度较小,无论是逆湿区域还是递减区域,其幅度均较小。对比图1a、c可知,非雾日边界层内比湿和温度的时空分布没有明显的对应性。

由以上的分析可知,观测点夜间的逆温强度和厚度都比较大,温度较低,且近地层风速始终较小,这些都是利于雾生成的背景条件(Niu et al., 2010b)。然而,雾的形成是一个非常复杂的过程,与热力、动力、辐射、气溶胶、微物理过程和地表状况有紧密联系(Gultepe and Milbrandt, 2007),虽然观测点紧邻长江,夜间逆温层下比湿也有所累积,但仍然较小。在水汽条件满足时易形成浓雾,本次观测中2006年12月11—12日和12月13—14日两次雾过程主要受前期降水的影响,地表湿润,水分蒸发,大气中水汽增加(陆春松,2008;陆春松等,2010),而12月24—27日雾过程的水汽来源主要是

表 3 非雾日有逆温存在时的比湿特征

Table 3 The characteristics of specific humidity with temperature inversions on the fog-free days							次
	近地层逆温下存在极大值, 中高层趋于均匀化	近地层逆温下存在极大值, 中高层递减	递减	低层递减,中高层 取得极大值	低层递减,中高层 趋于均匀化	其他	合计
发生次数	28	13	11	3	4	3	62

表 4 非雾日无逆温存在时的比湿特征

Table 4 The characteristics of specific humidity without temperature inversions on the fog-free days					次
	趋于 均匀化	低层递减,中高层 趋于均匀化	递减	中低层趋于均匀 化,高层递减	合计
发生次数	21	6	4	6	37

暖湿气流的输送(陆春松等,2008)。

### 3 雾日边界层结构的特殊性

#### 3.1 雾日边界层结构的平均分布

图 2 为观测期间 3 场浓雾过程中(2006 年 12 月 11—12 日,12 月 13—14 日,12 月 24—27 日)温

度、风速和比湿的时空剖面图。这三次浓雾雾顶的平均高度为 392 m,以此为分界点把 0~800 m 分为雾顶之上和雾顶之下两部分。雾日的平均温度分布与非雾日相比(图 1a、2a),雾顶之上气层在白天和夜间温度均升高,这与雾顶之上往往存在低悬逆温有关,而该逆温的形成与诸多因子有关,如雾顶的长波辐射降温(李子华等,1999)、下沉运动(宋润田和金永利,2001;陆春松,2008;陆春松等,2008)、暖平流(陆春松等,2008;严文莲等,2009)等。白天,雾日雾顶之下气层温度比非雾日低,这是由于雾顶对太阳辐射的反射作用导致到达雾顶之下的太阳辐射减少的缘故;夜间,雾顶之下气层温度则比非雾日高,主要是由于雾发展过程中潜热释放,同时雾层的

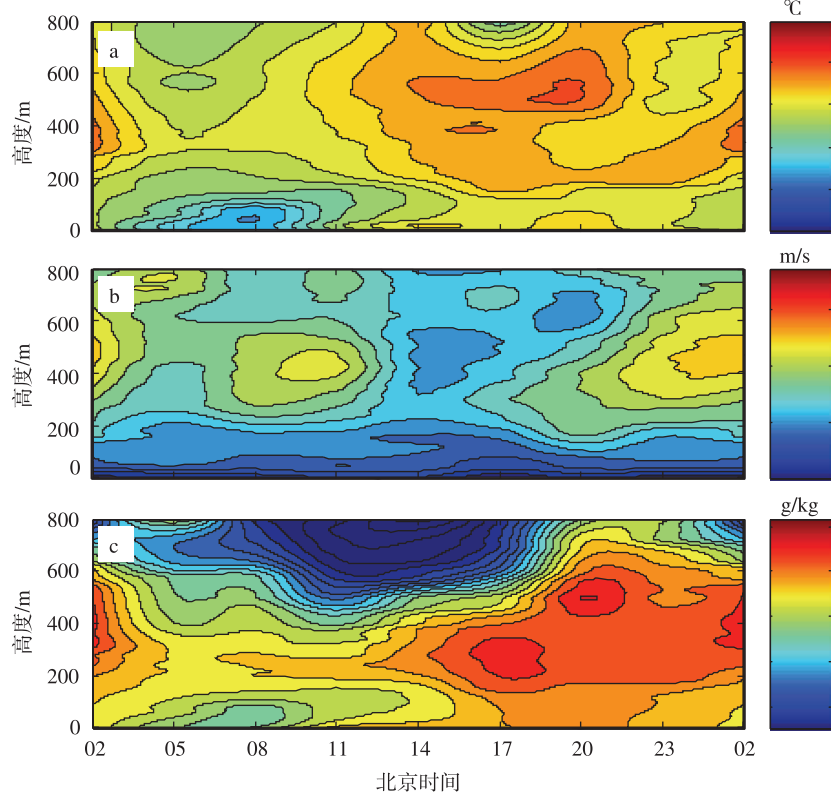


图 2 观测期间 3 场浓雾过程(2006 年 12 月 11—12 日,12 月 13—14 日,12 月 24—27 日)的平均温度(a;单位:°C)、平均风速(b;单位:m/s)和平均比湿(c;单位:g/kg)的时空剖面

Fig. 2 The height-time cross-section of (a) average temperature(°C), (b) average wind speed(m/s) and (c) average specific humidity(g/kg) for the three fog cases (December 11th—12th, 13th—14th, and 24th—27th, 2006) during the campaign

逆辐射阻碍了地表及近地层的长波辐射冷却,此外,暖平流也是夜间雾顶之下温度升高的一个重要因子。雾日与非雾日相比,05 时雾顶之上温度增幅为 2.9 °C,14 时为 3.7 °C,夜间的温度增幅没有白天大,故雾顶之上日较差增大;由于雾顶之下的气层白天降温,夜间增温,其日较差减小(图 3)。

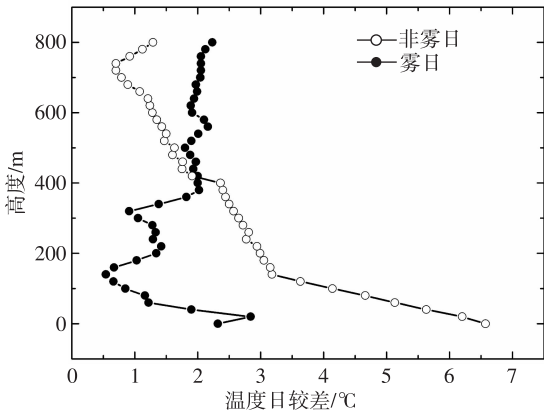


图 3 雾日与非雾日的平均温度日较差廓线  
Fig. 3 The diurnal range profiles of average temperature between fog and fog-free days

雾日的平均风速时间—高度分布与非雾日类似。与非雾日相比,雾日 0~100 m 气层风速变化不大,始终较小,但 100~800 m 风速有所减小,这也验证了以前的观测结果,风速小利于雾的形成(黄建平等,1998;濮梅娟等,2001;Niu et al.,2010b)。值得指出的是,风速小不是雾发生的充分必要条件。一方面,Taylor(1917)发现天气条件满足低风速和高相对湿度时,大约仅一半的情况出现了雾。另一方面,并非所有的雾过程中风速都小,2007 年 12 月在盘城进行了第二次雾的综合观测,有多次雾过程的强浓雾阶段风速最大值达到 4 m/s(3 级风力)。

雾对边界层结构影响最明显的是比湿的增大,

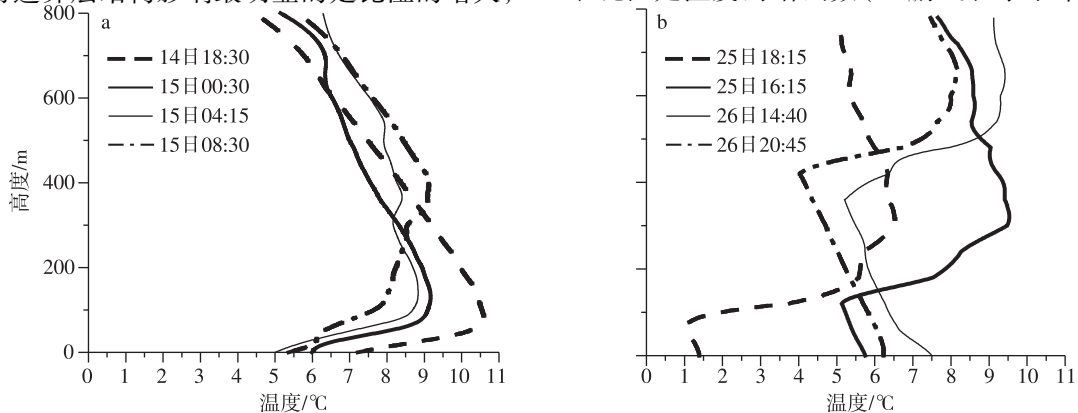


图 4 非雾日(a;12月14—15日)及雾过程中(b;12月24—27日)部分时次的温度廓线  
Fig. 4 Some temperature profiles on fog-free days(December 14th—15th) and during a fog event(December 24th—27th)

从图 2 c 可以看出,0~800 m 比湿均有所增大,尤其是平均雾顶附近。雾日近地层比湿在 17:30—21:30 出现极大值,而非雾日则在 01:30—06:30 出现。

### 3.2 一次典型浓雾过程

以上讨论了雾日与非雾日边界层结构的平均特征,为了进一步揭示雾日边界层结构的特殊性,选取 2006 年 12 月 24—27 日典型浓雾过程进行分析。该浓雾过程是在偏南暖湿气流作用下形成的,强浓雾累计时间达 40 h 左右,非常罕见。

图 4 给出了一次非雾日典型逆温过程和这次雾过程中的部分温度廓线,雾体发展成熟时低层气温呈湿绝热递减,随着逆温层的升高,湿绝热递减的区域也逐渐增厚,逆温层为低悬逆温,而非雾日逆温一般为贴地逆温。湿绝热递减区域的出现主要是由于雾体内近地层凝结潜热释放,空气长波辐射降温减缓、中止甚至升温,层结趋于中性,湍流得以发展,以往的观测研究中也发现了类似的现象(黄建平等,1998;濮梅娟等,2001;徐怀刚等,2002),同时他们也指出雾顶往往位于强逆温中心附近或下方,徐怀刚等(2002)认为辐射过程是雾体内没有逆温的主要原因。但是本次过程中某些时段(如 26 日 01—10 时)雾顶位于逆温强中心附近或其上方(图 5a),主要是由暖湿气流引起的(陆春松等,2008;濮梅娟等,2008;严文莲等,2009)。虽然如此,雾顶之上仍然存在温度的多个极大值中心,导致雾日平均雾顶之上气层的温度比非雾日高。

分析图 5a、c 可知,雾体内温度和比湿的等值线形状类似,逆湿强中心也是逆温强中心,因此雾体内温度和比湿具有较好的对应性。根据比湿方程,饱和比湿是温度的增函数(王鹏飞和李子华,1989),

在雾体内可以理解为:雾体是一个气—液两相平衡的热力学系统,凝结、蒸发等微物理过程发展充分,处于饱和状态。假定由于扰动,雾体内某局部区域温度升高,饱和水汽压增大,该区域不再饱和,导致雾滴蒸发速率增大,蒸发量大于水汽凝结量,最终该区域达到饱和,比湿随之增大;反之,温度降低时,比湿也相应减小。对比观测结果(黄建平等,1998;濮梅娟等,2001;何友江等,2003)和模拟结果(Bergot et al., 2007)中的温度比湿廓线图,有类似的结论,而非雾日温度和比湿之间没有明显的对应性。整体而言,雾顶上升过程中,雾顶处平均降温率为  $-0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,平均增湿率为  $0.67\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ;下降过程中,平均增温率为  $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,平均减湿率为  $-0.47\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ,因此两者变化反相(陆春松等,2008),而雾顶之上温湿变化没有必然的联系。此外,本次雾过程中逆温强中心之上暖湿气流较强,风速较大,存在多个极大值中心(图 5b),具有显著的平流雾特征。值得指出的是,本次雾过程中某些时

次的比湿极大值位于雾顶之上,如 26 日 13 时 400 m 高度存在一个比湿的极大值区(图 5c),而该区域没有成雾的一个主要原因是温度较高,也取得极大值(图 5a),导致相对湿度较小。1996 年南京汤山地区的浓雾过程中也有类似的现象(李子华等,1999)。

## 4 结论

1) 非雾日逆温层主要为单层贴地逆温,雾体发展成熟时则为低悬逆温。雾日的平均温度廓线与非雾日相比,平均雾顶之上气层的温度日较差增大,雾顶之下则减小,主要与低悬逆温、雾顶对太阳辐射的反射作用、凝结潜热释放、雾层的逆辐射、暖平流增温等有关。

2) 平均而言,雾日的风速时间—高度分布与非雾日类似,但风速较小,在非雾日的逆温维持阶段风速随高度存在一个或者两个极大值区。

3) 雾日与非雾日近地层比湿极大值出现时间

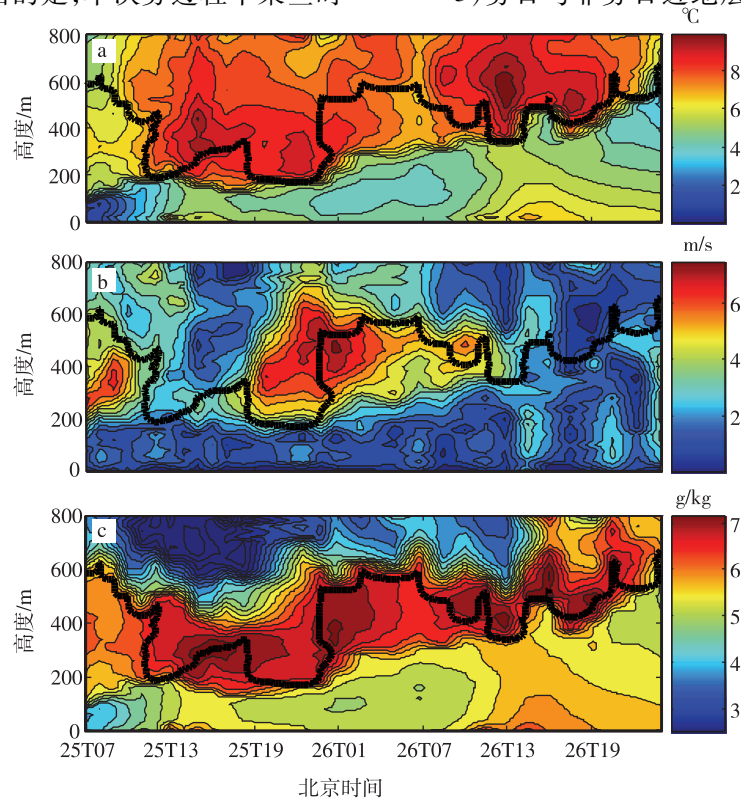


图 5 2006 年 12 月 25 日 07:00—27 日 00:00 浓雾过程中温度(a;单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、风速(b;单位:  $\text{m}/\text{s}$ )和比湿(c;单位:  $\text{g}/\text{kg}$ )的时空剖面(其中粗黑线为雾顶高度)

Fig. 5 The height-time cross-section of (a) temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) wind speed ( $\text{m}/\text{s}$ ) and (c) specific humidity ( $\text{g}/\text{kg}$ ) from 07:00 on December 25th to 00:00 on December 27th during a dense fog event (the thick black line represents the fog top)

不同,分别在17:30—21:30和01:30—06:30。由于雾体是一个气液两相平衡的热力学系统,雾体内的温度和比湿具有较好的对应性,非雾日两者之间则没有明显的对应关系。此外两要素在雾顶升降过程中变化反相,雾顶之上没有必然的联系。

4)南京冬季非雾日逆温强度和厚度均较大、温度较低、近地层风速较小,利于雾的形成。

## 参考文献

- 何友江,朱彬,马力. 2003. 重庆市冬季雾生消的物理特征[J]. 南京气象学院学报,26(2):821-828.
- 黄建平,朱诗武,朱彬. 1998. 辐射雾的大气边界层特征[J]. 南京气象学院学报,21(2):258-265.
- 黄玉生,黄玉仁,李子华,等. 2000. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程[J]. 气象学报,58(6):715-725.
- 胡非,洪钟祥,雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. 大气科学,27(4):712-728.
- 蒋维楣,苗世光. 2004. 大涡模拟与大气边界层研究—30年回顾与展望[J]. 自然科学进展,14(1):11-19.
- 李炬,舒文军. 2008. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析[J]. 地球物理学报,51(2):360-368.
- 李子华,黄建平,孙博阳,等. 1999. 辐射雾发展的爆发性特征[J]. 大气科学,23(5):623-631.
- 刘红年,蒋维楣,孙鉴泞,等. 2008. 南京城市边界层微气象特征观测与分析[J]. 南京大学学报:自然科学版,44(1):99-106.
- 刘立忠,徐抗英. 1998. 南京近郊地区初冬大气边界层风、温场的探测和分析[J]. 气象科学,18(1):63-71.
- 陆春松. 2008. 南京冬季雾的边界层结构及生消机制[D]. 南京:南京信息工程大学应用气象学院.
- 陆春松,牛生杰,杨军,等. 2008. 南京冬季平流雾的生消机制及边界层结构观测分析[J]. 南京气象学院学报,31(4):520-529.
- 陆春松,牛生杰,杨军,等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学,34(4):681-690.
- 毛敏娟,蒋维楣,吴晓庆,等. 2006. 气象激光雷达的城市边界层探测[J]. 环境科学学报,26(10):1723-1728.
- 濮梅娟,李良福,李子华,等. 2001. 西双版纳地区雾的物理过程研究[J]. 气象科学,21(4):425-432.
- 濮梅娟,张国正,严文莲,等. 2008. 一次罕见的平流辐射雾过程的特征[J]. 中国科学 D 辑,38(6):776-783.
- 沈觉成,楚涤修. 1990. 南京北郊大气边界层湍流统计特征的初步探讨[J]. 南京气象学院学报,13(2):247-253.
- 沈觉成,吴息. 1991. 南京城郊、乡村大气边界层内温度特征初步分析[J]. 南京气象学院学报,14(4):545-550.
- 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.
- 宋润田,金永利. 2001. 一次平流雾边界层风场和温度场特征及其逆温控制因子的分析[J]. 热带气象学报,17(4):443-451.
- 苏秀娟,夏晓青,孙武云. 1993. 用常规气象资料求取南京对流边界层特征量及其气候特征[J]. 气象科学,13(2):155-163.
- 王凯,张宏升,王强,等. 2006. 北方地区春冬季雾天边界层结构及其演变规律的对比研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,42(1):55-60.
- 王鹏飞,李子华. 1989. 微观云物理学[M]. 北京:气象出版社.
- 魏鸣,秦学,王啸华,等. 2007. 南京地区大气边界层晴空回波研究[J]. 南京气象学院学报,30(6):736-744.
- 吴兑,邓雪娇,叶燕翔,等. 2004. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究[J]. 气象学报,62(4):476-485.
- 徐怀刚,邓北胜,周小刚,等. 2002. 雾对城市边界层和城市环境的影响[J]. 应用气象学报,13(特刊):170-176.
- 徐祥德,丁国安,卞林根. 2004. BECAPEX 科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响[J]. 气象学报,62(5):663-672.
- 严文莲,濮梅娟,王巍巍,等. 2009. 一次罕见的辐射—平流雾研究(I)—生消物理过程分析[J]. 气象科学,29(1):9-16.
- 岳平,牛生杰,张强,等. 2008. 春季晴日蒙古高原半干旱荒漠草原地边界层结构的一次观测研究[J]. 高原气象,27(4):757-763.
- 张礼春,朱彬,牛生杰,等. 2009. 南京市冬季市区和郊区晴天大气边界层结构对比分析[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版,1(4):329-337.
- 张强,卫国安,侯平. 2004. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界结构特征的一次观测研究[J]. 高原气象,23(5):475-484.
- 赵德山,洪钟祥. 1981. 典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征[J]. 大气科学,5(4):407-414.
- 周自江,朱燕君,鞠晓慧. 2007. 长江三角洲地区的浓雾事件及其气候特征[J]. 自然科学进展,17(1):66-71.
- Andreas E L, Claffey K J, Makshtas A P. 2000. Low-level atmospheric jets and inversions over the western Weddell Sea[J]. Bound-Layer Meteorol,97:459-486.
- Bergot T, Terradellas E, Cuxart J, et al. 2007. Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog[J]. J Appl Meteor Climatol,46:504-521.
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. 1992. The Po Valley fog experiment 1989: An overview[J]. Tellus,44B:448-468.
- Gultepe I, Milbrandt J A. 2007. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project[J]. Pure Appl Geophys,164:1161-1178.
- Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project[J]. Bull Amer Meteor Soc,90(3):341-359.
- Li Zihua, Zhang Limin, Zhang Qinghong. 1994. The physical structure of the winter fog in Chongqing metropolitan area and its formation process[J]. Acta Meteor Sinica,8(3):316-328.
- Lu C, Niu S, Tang L, et al. 2010. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics[J]. Atmos Res, doi:10.1016/j.atmosres.2010.03.007.
- Niu S, Lu C, Liu Y, et al. 2010a. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study[J]. Adv Atmos Sci,27(6):1259-1275.
- Niu S, Lu C, Yu H, et al. 2010b. Fog research in China: An overview[J]. Adv Atmos Sci,27(3):655-678.
- Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. The physics of radiation fog I: A field study[J]. Quart J Roy Meteor Soc,102:313-333.
- Pilie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975. The life cycle of valley fog. Part I: Micrometeorological characteristics[J]. J Appl Meteor,14:347-363.
- Taylor G I. 1917. The formation of fog and mists[J]. Quart J Roy Meteor Soc,43:241-268.

(责任编辑:刘菲)