

南京一次辐射雾过程的边界层特征

张礼春¹ 朱彬² 范晓青¹

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081;

2 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 选取2007年12月13—14日南京一次辐射雾的外场观测资料及NCEP的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NC再分析资料和GDAS全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 气象资料, 从天气形势背景、气象要素以及物理量场等方面, 探讨雾形成和持续的主要边界层物理和天气学成因; 并利用HYSPLIT-4轨迹模式对此次雾过程进行后向轨迹分析。分析表明: (1) 此次雾过程期间始终存在逆温层, 甚至出现多层逆温。逆温层的存在, 使大气层结更加稳定, 利于雾的形成和发展。(2) 此次辐射雾过程水汽输送较平流辐射雾小, 水汽来源主要来自本地辐射降温后的水汽凝结。(3) 此次雾过程地面受高压控制, 低层水汽通量散度为正值, 近地面有弱辐散, 利于辐射降温水汽凝结, 而持续的水汽辐散造成的水汽流出以及雾后期随着北部干冷空气南下使得这次辐射雾寿命较短。

关键词: 雾, 大气边界层, 水汽通量, HYSPLIT-4后向轨迹

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.04.010

The Boundary Layer Structures of the Radiation Fog in Nanjing

Zhang Lichun¹, Zhu Bin², Fan Xiaoqing¹

(1 Public Meteorological Service Centre of CMA, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: A detailed analysis of the synoptic situation, meteorological fields was made to get the features of the boundary layer during the fog events which occurred on December 13-14, 2007 by the observation field data, NCEP's $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NC reanalysis data and GDAS Global $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ meteorological data. The results show that: (1) The presence of inversion layer, even multi-layer inversion throughout the fog events, indicates that the atmosphere is more stable, which was conducive to the convergence of water vapor before fog formation, then not favorable for the divergence of water vapor after fog formation, which helped the development and maintenance of the fog. (2) The water vapor flux transported in radiation fog was smaller than the advection-radiation one, and the water vapor in radiation fog was mainly from the local moisture condensation. (3) The surface was dominated by high pressure, during the radiation fog event, the divergence of water vapor flux was always positive, indicating that the water vapor near the surface was easy to be held and conducive to radiation cooling during the radiation fog event, while the divergence of water vapor flux and the northern cold air made the fog life a little too short.

Keywords: fog, atmospheric boundary layer, water vapor flux, HYSPLIT-4 backward trajectory

1 引言

近些年来统计资料表明^[1], 随着社会经济的发展, 大雾的出现频率、持续时间和浓密程度都有逐年提高的趋势。由于浓雾而导致机场、高速公路关闭、港口暂停船舶进出的情况不时见诸报端, 大有愈演愈烈之势。因此, 雾作为一种灾害性天气现象受到越来越广泛的关注和研究。

雾是悬浮于近地面气层中水汽凝结成水滴或冰

晶使水平能见度小于1km的天气现象, 国内外不少研究工作都对雾进行了大量的观测和理论研究^[2-5]。李子华等^[5]研究发现, 南京冬季出现频率最高的是辐射雾, 而有的辐射雾, 常有平流的较大影响, 则称它为平流辐射雾。辐射雾多在午夜前后发生, 也有一些发生于傍晚前后, 个别的形成于日出前后。而雾消散多在中午前后, 也有一些消散于日出之后。2007年12月13—14日, 在南京形成的这场雾即为一次典型的辐射雾过程^[6], 这次雾首先由13日晚辐射降温形成, 次日06时左右加浓, 日出后由于地面温度升高, 水汽蒸发, 浓雾10时左右消散。本文综合利用外场观测资

收稿日期: 2013年4月13日; 修回日期: 2013年10月15日

第一作者: 张礼春(1985—), Email: zlc203@126.com

料及NCEP的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NC再分析资料和GDAS全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 气象资料,结合天气形势背景、气象要素以及物理量场,探讨这次辐射雾形成和持续的主要边界层物理和天气学成因,并利用HYSPLIT轨迹分析方法,进一步验证雾形成的水汽来源。

2 探测仪器及资料概况

2007年11月15日—12月29日,课题组在南京信息工程大学校园内(118.7°E , 32.2°N , 海拔高度27m)进行了冬季雾外场综合观测试验。

雾的外场综合观测主要内容有:以雾生命史为主要研究对象,获取第一手的高时空分辨率的浓雾发生、发展、成熟和消散整个过程中的宏微观特征、边界层结构以及各类气象要素等综合资料。

观测仪器包括:芬兰Vaisala公司生产的DigiCORA系留气球低空探测系统,进行大气边界层温、压、湿和风的探测,观测时由飞艇携带传感器升空后将不同高度上的温、压、湿、风等资料传至地面接收系统,在计算机上保存并显示各气象要素廓线。一般而言,每1~3s产生一组数据,包括气压、温度、相对湿度、海拔高度、风速、风向等。在风速等天气条件允许的情况下,无雾日一般3h观测一次,出现雾时加密观测,间隔一般为1~1.5h,每次探测时间40min左右,高度一般在600~1000m之间,只有在风速特别大,达到10m/s的情况时收回系留气球,探测高度降低。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% , 0.1hPa , 0.1m/s 和 1° 。另外,雾滴尺度谱分布使用FM-100型雾滴谱仪。

3 边界层特征

3.1 天气形势分析

受南支槽和贝加尔湖冷空气南下共同影响,12月12日白天出现降水,雨区包括江苏、安徽、湖北、湖南及河南等地,12日16时南京降水结束,雨后地面相对湿度较大。12日20时,南支槽和蒙古低槽合并,此时江苏处于槽后西北气流当中。13日20时,江苏位于槽后偏西风平直锋区中,地面受高压控制,天气晴好、微风、大气层结稳定,利于夜间辐射降温。南京于13日22时左右出现雾,14日凌晨发展为能见度小于500m的浓雾,持续到上午10时以后逐渐消散。

3.2 雾过程的大气边界层结构

图1和图2分别为2007年12月13—14日雾过程中温度、相对湿度、平均风速廓线变化图以及14日风的时间—高度剖面图。由图可见,13日20时,地面辐射降温使得贴地层形成逆温,近地面风速较小, $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左

右,相对湿度较大。同时在420~440m和750~760m也形成两个薄的逆温层。近地面不断的降温增湿,最终空气达到饱和,在13日21:55(图略),肉眼已经观察到近地面形成雾。雾形成后,在整个雾过程中,雾区内风速在 $0\sim 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,适宜的风速,有利于水汽的上下传输,有利于雾的发展和维持。而雾顶之上,相对湿度总地呈明显减小趋势,风速也较大,超过 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。13日22:40,600m高度低云形成。14日01:30以后,温度廓线图上可以看出出现明显的多层逆温,这与湍流的不连续性有关。14日06时低云与低层雾区经过发展后合并。14日09时,日出后的短波辐射使近地层空气升温。14日10:40左右,随着湍流发展的旺盛,多层逆温开始遭到破坏,温度廓线呈波动状。12时左右,随着近地层空气持续升温,近地层较强逆温也被破坏,上下层气流交换增强,近地面雾渐渐消散至殆尽。可见逆温的存在利于雾的形成和发展,是雾维持发展的一个不可缺少的条件。

3.3 雾过程水汽输送特征

通过对此次雾过程925hPa高度各时刻比湿、水汽通量、水汽通量散度分布的研究分析,13日20时,南京近地面比湿为 $2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,水汽含量充沛。南海海面有水汽通量大值区,并不断向北偏东方向输送,南京位于水汽通量输送带上,上空水汽通量近 $2\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。14日02时,比湿减小为 $1.6\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,此时雾已生成并继续发展,近地面水汽不断凝结成雾滴,故比湿较前有所下降。此时,水汽输送带继续向北移动,但南京上空水汽略有减小。14日08时,比湿仍为 $1.6\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,这说明雾过程中水汽不断补充和凝结消耗基本动态维持不变。水汽开始逐渐影响我国华南及江浙一带,南京地区水汽通量变得很小。结合张礼春等^[7]对2006年12月24—27日在南京形成的一次持续性浓雾天气过程的水汽来源分析,对比可以发现,这次辐射雾过程期间水汽输送明显较平流辐射雾小。另外,在此次雾过程中,地面受高压控制,低层水汽通量散度为正值,近地面有弱辐散,利于辐射降温,水汽凝结形成雾。而后期持续的水汽辐散造成水汽不断流出使得这次辐射雾寿命较短。

3.4 后向轨迹分析

HYSPLIT-4轨迹模式^[8]是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发的供质点轨迹、扩散及沉降分析用的综合模式系统。该模式是Eulerian-Lagrangian混合型的扩散模式,其平流和扩散计算采用Lagrangian法,通常用来跟踪气流所携带的粒子或气体移动方向,可以实时预报风场形势以及分析降水。其采用

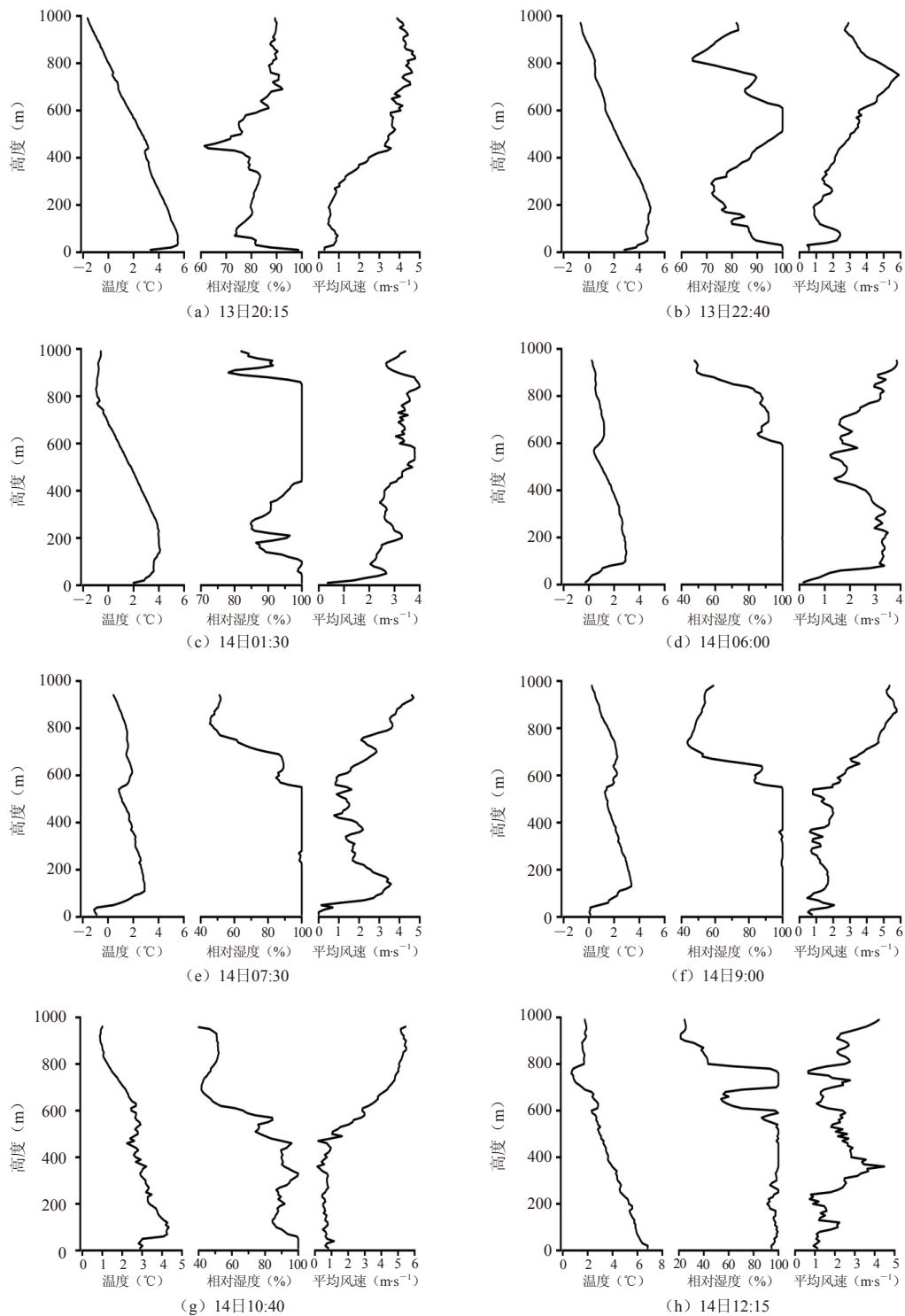


图1 2007年12月13—14日雾过程中温度、相对湿度和平均风速廓线变化图

地形 σ 坐标，水平网格与输入的气象场相同，垂直方向分为28层，将气象要素线性内插到各 σ 层上。HYSPLIT-4气流三维轨迹模式模拟分析气流路径的思路是假设空气中的粒子随风移动，则粒子的移动轨迹就是其在时间和空间位置矢量的积分，最终的位置由初

始位置(P)和第一猜测位置(P')的平均速率计算得到

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t+\Delta t)]\Delta t$$

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t$$

积分时间的步长是可变的， $U_{\max}\Delta t < 0.75$ 。

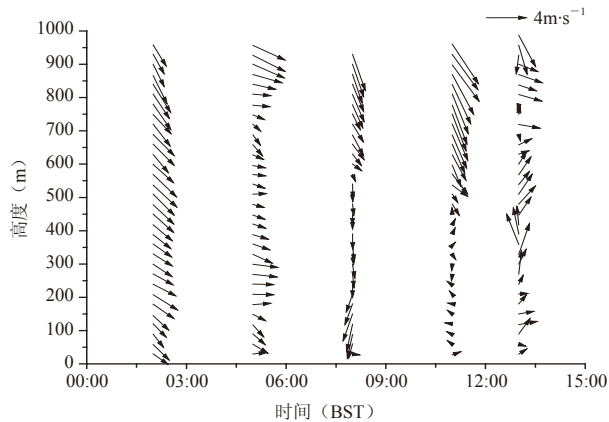


图2 2007年12月14日各时刻风的时间—高度剖面图

气象数据在水平坐标保持其原来格式，而垂直方向被内插到地形追随坐标系统，

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}})$$

式中， Z_{top} 是轨迹模式坐标系统的顶部； Z_{msl} 是坐标下边界高度； Z_{gl} 是地形高度。

HYSPLIT-4轨迹模式模拟采用NCEP GDAS全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 气象资料作为背景初始场，该资料是应用全球中期预报谱模式（MRF）同化多种观测资料和预报结果，水平分辨率为191km，垂直方向从1000~50hPa分为12个等压面层，时间间隔为6h。本次研究计算为72h后向轨迹，起始点南京的经纬度为（118.7°E，32.2°N），距离地面高度设为四层分别为150，600，1500和3000m。

图3是HYSPLIT-4轨迹模式模拟的此次雾过程不同时间的72h后向轨迹。由图可以进一步发现辐射雾过程中水汽来源主要来自本地辐射降温后的水汽凝结。而北部干冷空气南下，加快了这次辐射雾的消散进程，其持续时间仅有13h。

4 结论

通过对2007年12月13—14日南京发生的这场辐射雾的边界层特征进行分析可以得出以下结论。

(1) 这次雾过程期间逆温层始终存在，甚至出现多层逆温。逆温层的存在，使大气层结更加稳定，在雾形成前期利于低层水汽聚集，雾形成后又抑制水汽的扩散，利于雾体的发展和维持。

(2) 辐射雾过程期间水汽输送明显较平流辐射雾小，HYSPLIT-4后向轨迹模式分析图进一步验证其水汽来源主要来自本地辐射降温后的水汽凝结。

(3) 这次辐射雾过程地面受高压控制，低层水汽通量散度为正值，近地面有弱辐散，利于辐射降温

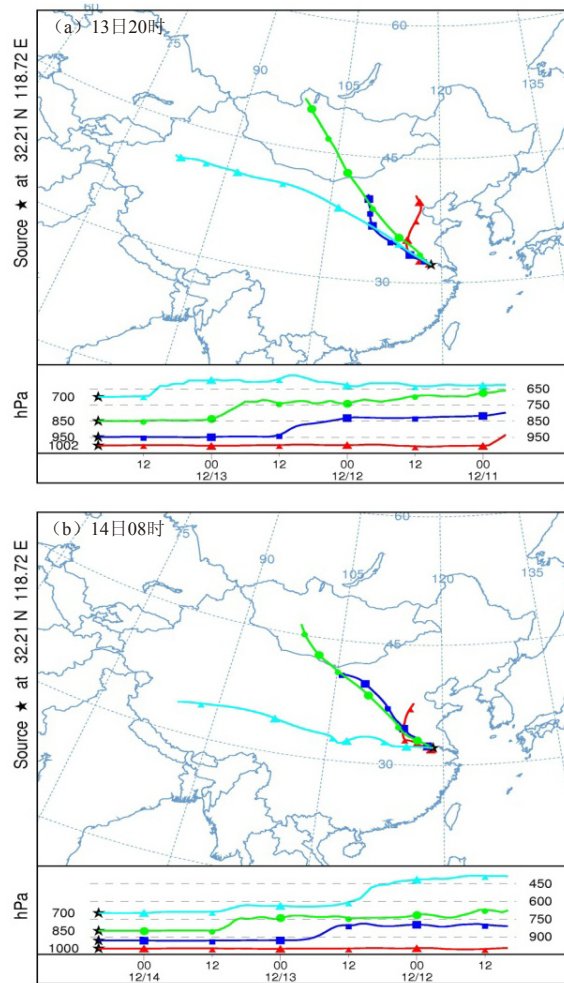


图3 2007年12月13—14日72h HYSPLIT-4后向轨迹模拟图

水汽凝结，而持续的水汽辐散造成这次辐射雾在发展维持期间水汽不断流出，以及雾后期随着北部干冷空气南下，使得这次辐射雾寿命较短，仅仅持续了13h。

参考文献

- [1] 高峰. 不得不防的灾害——浓雾. 中国应急管理, 2011, 7: 55-57.
- [2] Taylor G I. The formation of fog and mist. Q J R Meteor Soc, 1917(XL111): 2416-2468.
- [3] Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. The physics of radiation fog, Part I: A field study. Q J R Meteor Soc, 1976, 102: 313-333.
- [4] 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 北京及周边地区雾形成的边界层特征. 中国科学(D辑), 2005, 35: 73-83.
- [5] 李子华, 刘端阳, 杨军, 等. 南京市冬季雾的物理化学特征. 气象学报, 2011, 69(4): 706-718.
- [6] 杨军, 王蕾, 刘端阳, 等. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. 气象学报, 2010, 68(6): 998-1006.
- [7] 张礼春, 朱彬, 耿慧, 等. 南京一次持续性浓雾天气过程的边界层特征及水汽来源分析. 气象, 2013, 39(10): 1284-1292.
- [8] Draxler R R, Hess G D. An overview of HYSPLIT-4 modeling system for trajectories dispersion and deposition. Aust Met Mag, 1998, 47(2): 295-308.