邵禹晨，张雪蓉，王博妮，等，2019. 一次中国东部大范围强浓雾的传播与扩展机制分析[J]. 气象，45(4)：496-510. Shao Y C, Zhang X R, Wang B N, et al, 2019. Mechanism analysis of propagation and extension of an extensive dense fog event over eastern China[J]. Meteor Mon, 45(4): 496-510(in Chinese).

# 一次中国东部大范围强浓雾的传播与扩展机制分析*

邵禹晨[1] 张雪蓉[2,3] 王博妮[2,4] 濮梅娟[1,5]

1 南京信息工程大学，南京 210044
2 中国气象局交通气象重点开放实验室，南京 210008
3 江苏省气象科学研究所，南京 210008
4 江苏省气象服务中心，南京 210008
5 江苏省气象台，南京 210008

**提 要**：本文利用常规气象观测资料、NCEP 再分析资料对 2016 年 12 月 31 日至 2017 年 1 月 4 日中国东部持续近 5 天的大范围强浓雾过程进行了分析，重点对强浓雾的传播与扩展机制进行了诊断研究。结果表明：这次浓雾过程以 1 日晚间冷高压南下为分界点，在高压南下之前强浓雾范围局限于河北中南部，高压南下之后，强浓雾增强并大范围传播，影响江苏、安徽、河南、河北、山东等多个省。冷高压南下导致低层逆温层加强，逆温区范围扩大，是强浓雾得以大范围传播的重要条件。由海上经江苏、安徽、河南至河北的水汽平流输送则为浓雾的大范围传播提供了充足的水汽条件。

**关键词**：强浓雾，强逆温，水汽条件，大范围传播

**中图分类号**：P458 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.005

# Mechanism Analysis of Propagation and Extension of an Extensive Dense Fog Event over Eastern China

SHAO Yuchen[1] ZHANG Xuerong[2,3] WANG Boni[2,4] PU Meijuan[1,5]

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210008
3 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008
4 Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210008
5 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

**Abstract**: Based on conventional observation data, NCEP reanalysis data, a massive dense fog process lasting from 31 December 2016 to 4 January 2017 in Eastern China are analyzed with the focus on propagation and extension mechanism. The results show that the dense fog process took cold anticyclone moving south on the evening of 1 January as a demarcation point. Before the cold anticyclone moved south, dense fog was limited to southern and central part of Hebei Province. After the cold anticyclone moved south, dense fog enhanced and spread widely, affecting many provinces including Jiangsu, Anhui, Henan, Hebei and Shandong, etc. The dense fog spread in a large range by cold anticyclone moving south, causing the low-level temperature inversion to be strengthened and the range of the inversion area to be expanded. The

* 国家自然科学基金项目(41575135 和 41340042)、江苏省气象局科研项目(BK201807)及江苏省气象局预报员专项(JSYBY2013305)共同资助

2018 年 6 月 20 日收稿； 2018 年 12 月 9 日收修定稿

第一作者：邵禹晨，主要从事天气动力学研究. Email: shaoyuchen666@126.com

通信作者：濮梅娟，主要从事天气动力学与大气物理研究. Email: pumeijuan@126.com

water vapor transport from the sea through Jiangsu, Anhui and Henan to Hebei provided sufficient water vapor for the wide spread of the dense fog.

**Key words**: dense fog, strong temperature inversion, water vapor condition, wide spread

## 引　言

雾是由大量悬浮在贴地层空气中的水滴或冰晶等气溶胶使水平能见度降低到 1 km 以下的灾害性天气。随着社会经济高速发展,雾,尤其是大范围强浓雾造成的危害越来越严重。交通方面,浓雾时飞机停飞、船只停航、行车危险、出行不便,每年因浓雾产生的交通经济损失都是巨大的;工农业生产方面,雾害会影响作物的产量和品质,影响许多工业设备运行和露天施工作业,这其中尤以持续性强浓雾期间电力设备发生污闪事故危害最甚,造成了大量电力损失与经济损失;人体健康方面,浓雾和逆温容易积聚城市污染物并在雾中发生物理化学反应生成新的有毒物质,给人体健康带来极大威胁(李子华等,2008;吴兑等,2009)。

近 30 年来,国内外已有大量对雾的观测和研究。国际上较大规模的雾观测试验有 1989 年波河流域雾试验(Fuzzi et al, 1992)、1998/1999 年冬季美国加利福尼亚州圣华金河谷雾外场观测试验(Collett et al, 2001)、2000 年 10 月智利北部雾外场观测试验(Cereceda et al, 2002)、2006 年 7 月法国巴黎雾观测试验(Haeffelin et al, 2010)等,这些观测试验深化了对雾的物理过程、雾水化学特征、雾的数值模拟参数化模式等方面的研究,但这些研究更注重于强浓雾的微物理特征,没有专门从天气学角度讨论大范围持续性强浓雾的形成和发展机制。国内也有许多大的观测试验。李子华和彭中贵(1994)、李子华等(1999)和 Li et al(1994)对重庆、南京浓雾的综合观测试验,濮梅娟等(2008a;2008b)对南京城市雾的观测研究深化了对中国城市雾物理化学特征的认识,其中李子华等(1999)在南京汤山发现辐射雾在形成和发展过程中常有双层结构,并在发展时常有爆发性特征,濮梅娟等(2008a;2008b)、刘端阳等(2009)、陆春松等(2010)许多学者参与了 2006 年冬季南京雾的观测,发现其中包含一场非常典型的持续性强浓雾过程并对其进行了细致研究,这些研究成果对之后持续性强浓雾的研究具有重要意义;李子华等(1999)对沪宁高速的雾观测分析与吴兑等(2004;2007)对京珠高速南岭大瑶山段的雾观测分析深化了中国高速公路雾探测的研究,为减少交通经济损失做出了贡献;黄玉生等(2000)对西双版纳辐射雾进行了探测,李子华和彭中贵(1994)则深入研究了重庆雾害,这些观测研究基本摸清了中国雾的微物理结构特征,揭示了雾与环境的关系。

随着技术发展,国内外对雾的观测、研究也尝试了许多新的技术。包云轩等(2013)、王益柏等(2014)与黄政等(2016)利用 WRF 模式分别模拟了江苏与华北大雾过程,优化了参数化方案,且都认为液态水含量与相对湿度指标共同诊断能有效提高大雾预报准确率;郭丽君和郭学良(2015;2016)利用微波辐射计资料分析了北京持续性大雾过程的垂直结构与物理成因,发现暖湿平流过程是造成持续性大雾的主要原因;田小毅等(2018)利用实况监控资料对江面雾进行分析,发现江面雾形成前有明显的"象鼻形"先期振荡特征。Li et al(2014)利用 35 GHz 的探云雷达与遥感仪器对雾进行协同观测,提出了雷达探测雾光学能见度的模型;Guo et al(2015)在对中国华北持续性雾-霾的研究中通过相对湿度变化揭示了辐射雾与平流雾间的演化过程;Boutle et al(2016)则通过将 333 m 分辨率数值模式嵌套进英国气象局的伦敦模式中来研究用高分辨率提高雾模式性能的性价比;Elias et al(2018)提出了利用卫星与地面资料预报辐射雾的优化模型,其对秋、冬季辐射雾预报更为准确。

当雾中能见度<50 m 时称为特强浓雾,其出现往往意味着较大范围和较长持续时间的雾过程。因此针对特强浓雾的研究,不仅要注意其持续性,更要注意其区域性。前人对浓雾的研究多限于局地的外场观测试验,较少对区域性浓雾传播机制的分析,而这对于预报区域性强浓雾的增强和传播十分重要。2016 年 12 月 31 日 02 时至 2017 年 1 月 4 日 08 时我国东部出现了一次大范围持续性强浓雾过程,影响了河北、天津、北京、河南、山东、安徽、江苏等数个省(市),特强浓雾影响区域基本涵盖整个华北平原。这次过程持续时间之长、覆盖范围之广皆属罕见,过程中特强浓雾中心的移动和传播也非常明显。本文

利用常规观测资料及NCEP GDAS/FNL水平分辨率0.25°的再分析资料，对强浓雾过程的增强和传播进行天气动力学和热力学分析，重点对其移动和传播机制进行分析。

## 1 雾过程概况

此次持续性大范围强浓雾过程可以根据在午后14时是否仍存在能见度200 m以下的强浓雾中心细分为三次强浓雾过程。

### 1.1 第一次过程

2016年12月31日02时至2017年1月2日08时是第一次强浓雾过程(图1)。31日02时河北中部偏南出现了能见度200 m以下的雾区(图略)，08时(图1a)雾区迅速扩大至整个河北中南部且雾区中心能见度普遍在50 m以下，14时(图1b)雾区稍有减小但雾区中心能见度仍在200 m以下。31日20—23时河北南部雾区扩大为覆盖整个河北中南部地区、整个天津地区及部分北京地区的大范围强浓雾，河北南部大部地区能见度不足10 m，且在江苏东部沿海出现了能见度100 m以下的浓雾(图略)。1日02—05时江苏浓雾增强并向西、向南扩散，08时(图1d)江苏雾区继续向西传播，在连云港与扬州有能见度10 m以下的强浓雾中心，但江苏东部沿海的浓雾减弱。1日11—14时，江苏雾区完全消散，河北中南部雾区稍有减弱但雾区总体能见度仍维持在200 m以下。

1日20—23时河北南部雾区加强，总体能见度低于200 m，浓雾中心能见度低于10 m，且强浓雾区扩散至河南北部与山东北部。2日02—05时(图1g，1h)，河北南部雾区大幅向南传播影响整个河南的中部、北部地区，河南中北部大片地区能见度也由100 m左右迅速降低至不足10 m，08时(图1i)，河南中北部雾区继续向南扩散并影响至安徽北部，在河南、山东交界处与河南中东部有能见度10 m以下的强浓雾中心。

2日08时之后雾区消散，至此持续2天多的第一次过程结束。1日23时之前，尽管强浓雾持续影响整个河北中南部地区，但始终没有扩大传播，23时开始河北中南部的雾区则明显南移至河南东北部，同时特强浓雾中心也随之转移至河南东北部。

### 1.2 第二次过程

1月2日20时至3日11时是第二次强浓雾过程(图2)。2日20时(图2a)，河南、安徽、山东、江苏四省交界处，商丘、宿州、菏泽、徐州一带出现能见度50 m以下的特强浓雾区。2日23时(图2b)，以河南、山东交界处的特强浓雾区为中心，雾区迅速扩散，向南扩散至安徽北部，向北扩散至河北南部，且在山东中北部也有强浓雾区，能见度50 m以下的强浓雾中心仍位于河南中部、东部。3日02—05时(图2c，2d)，雾区整体有南移倾向，特强浓雾区迅速扩大并主要向南传播至安徽中北部，河北东南部与山东北部也出现了特强浓雾区，同时江苏东部也出现了由东向西传播的强浓雾过程。08时(图2e)，雾区几乎影响安徽、江苏、山东北部、西南部、河北南部及河南东部、中部的所有地区，特强浓雾中心则集中于河南中东部、山东西南部、安徽北部与整个江苏地区两块区域。11时(图2f)雾区减弱，但江苏东部与河南东部、安徽西北部仍有强浓雾区，尤其是河南东部与安徽西北部，仍有大片特强浓雾。11时之后雾区才基本消散，第二次过程结束。第二次过程中，雾区在强浓雾中心南移的同时大幅扩散增强，其强浓雾的传播速度和范围在三次过程中是最快最广的。

### 1.3 第三次过程

3日17时至4日08时是第三次强浓雾过程(图3)。3日17时(图3a)开始，雾区首先出现于河北南部但并不强。20时(图3b)，河南东南部及与山东交界处出现狭长的特强浓雾区，河北南部的雾区也扩散至整个河北中南部与山东北部，且总体能见度普遍降低至200 m以下，同时江苏盐城中部开始出现能见度200 m以下的浓雾。23时(图3c)雾区迅速扩大，河南东北部、河北中南部出现了大范围特强浓雾区，同时江苏中东部浓雾也迅速增强为特强浓雾。4日02时(图3d)，河南雾区扩散增强，河北南部特强浓雾区略有缩小，江苏中东部的特强浓雾区范围则大大增加。05时(图3e)，江苏东部的特强浓雾中心由盐城北移至江苏东北部的连云港、山东中部；08时(图3f)，河北特强浓雾区减弱，特强浓雾区集中于河南、山东交界处与山东中部、江苏北部两块区域。08时之后雾区基本消散，第三次过程结束。值得一提的是，在前两次过程中受浓雾影响不多的山东在第三次过程中大部地区都受到强浓雾影响。总

体来说第三次过程强浓雾在扩张的同时倾向北移。

之后的几日虽仍有断续的强浓雾,但再也没出现过大范围的强浓雾和特强浓雾,这次大范围强浓雾过程至 4 日 08 时基本结束。

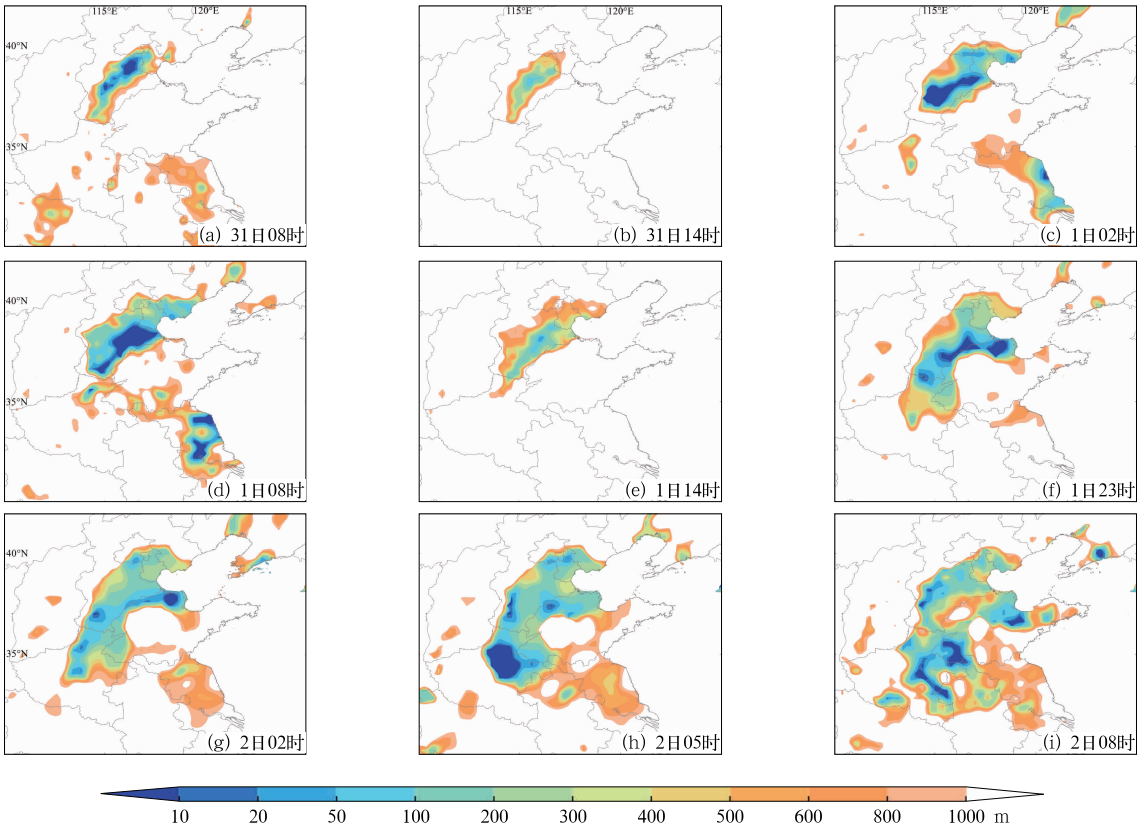


图 1　2016 年 12 月 31 日 08 时至 2017 年 1 月 2 日 08 时第一次过程雾区实况图

Fig. 1　First process distribution of fog area from 08:00 BT 31 December 2016 to 08:00 BT 2 January 2017

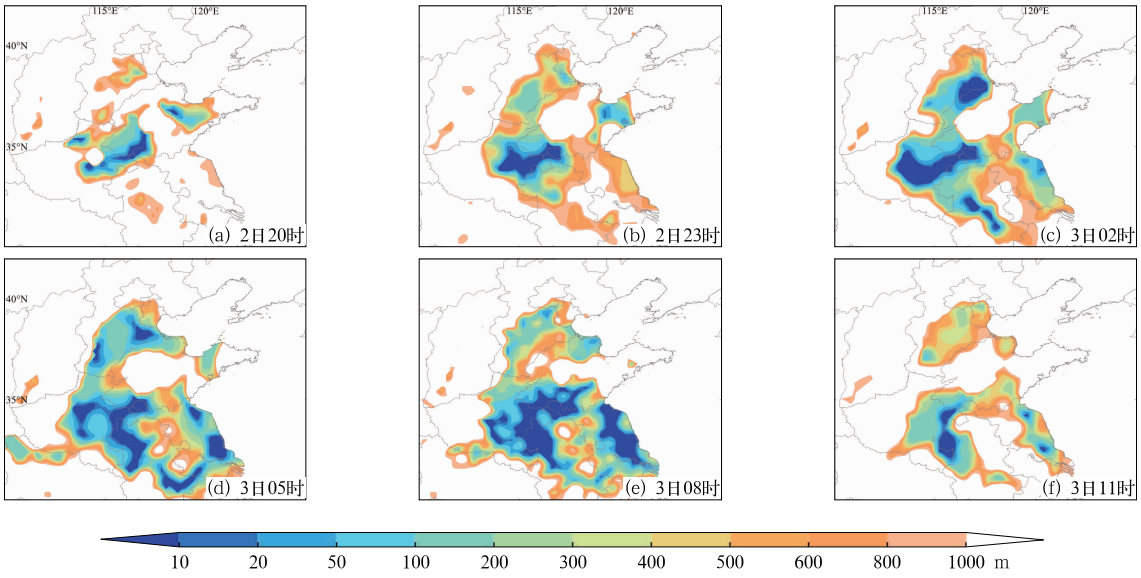


图 2　2017 年 1 月 2 日 20 时至 3 日 11 时第二次过程雾区实况图

Fig. 2　Second process distribution of fog area from 20:00 BT 2 to 11:00 BT 3 January 2017

## 2 强浓雾发生发展的环流形势

### 2.1 高空环流背景

高空 500 hPa 上，31 日 20 时（图 4a）中高纬基本为平直的均压场，但在蒙古有一槽一脊，相应温度槽脊略落后于高度槽脊，加速槽脊东移发展；1 日 20 时（图 4b），槽增强东移至东北，同时温度槽与高度槽重合，东移减缓，冷空气在东北堆积；2 日 20 时（图 4c），东北低槽东移入海，新疆北部出现了高压脊，在脊前有明显汇合的西北风且脊上有暖中心，促

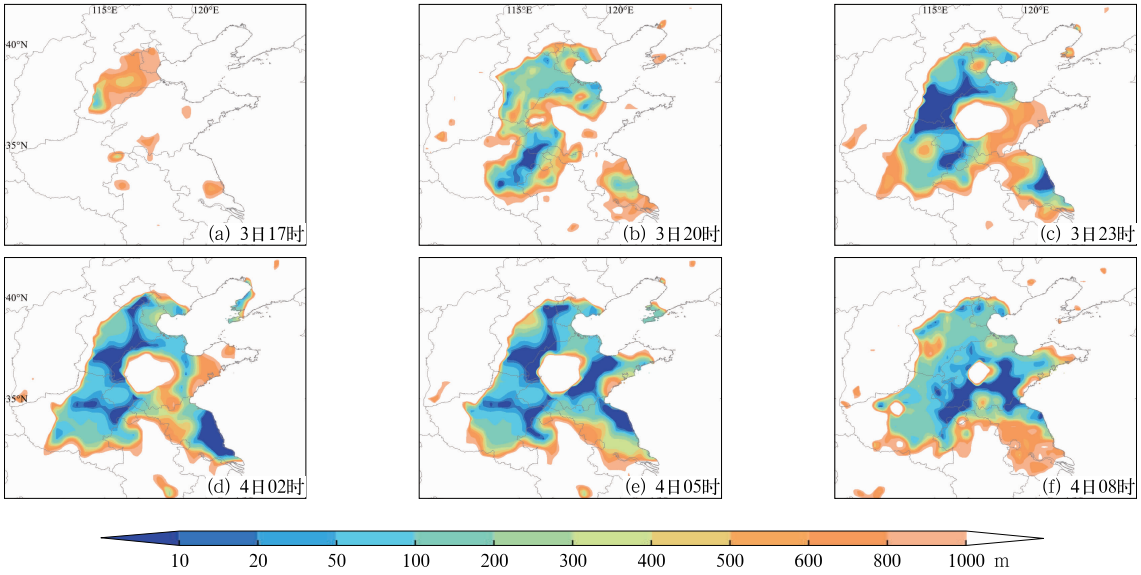


图 3 2017 年 1 月 3 日 17 时至 4 日 08 时第三次过程雾区实况图

Fig. 3 Third process distribution of fog area from 17:00 BT 3 to 08:00 BT 4 January 2017

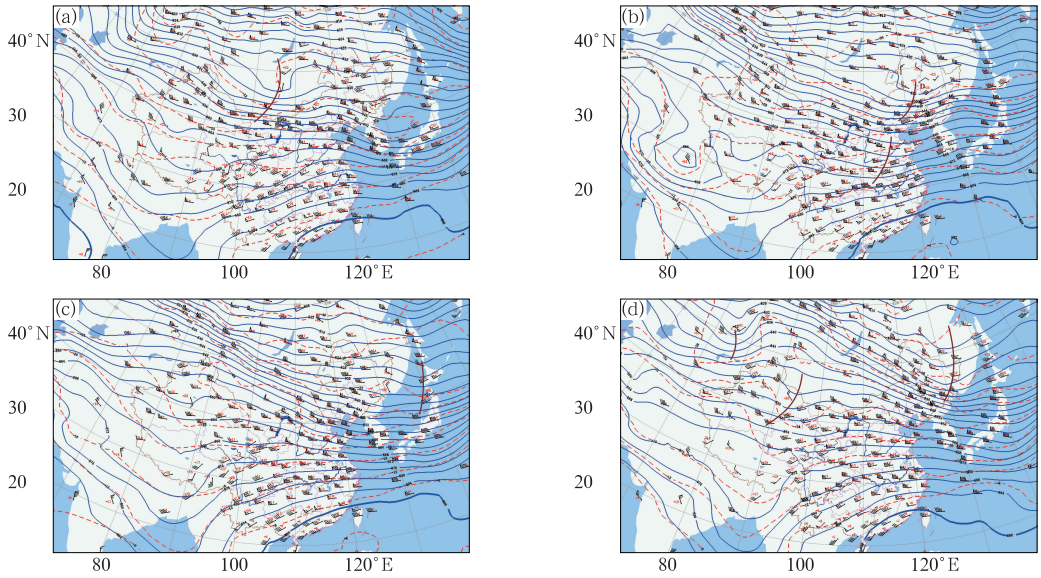


图 4 2016 年 12 月 31 日 20 时(a)，2017 年 1 月 1 日 20 时(b)，2 日 20 时(c)，3 日 20 时(d)500 hPa 环流形势

（蓝线：等高线，红线：等温线，棕线：槽线）

Fig. 4 Height and temperature field at 500 hPa at 20:00 BT 31 December 2016 (a), 20:00 BT 1 (b), 20:00 BT 2 (c), 20:00 BT 3 (d) January 2017

(blue line: counter, red line: temperature, brown line: trough line)

使脊发展的同时也阻碍了脊的东移;3 日 20 时(图 4d),高压脊东移至蒙古西部并有较大发展,且脊后有冷槽。高压脊南部受强盛的印缅槽影响,风向转为偏西南风,同时在东北也出现了低槽。总体 500 hPa 上,在 35°N 以北受北槽东移与高压脊东移影响,风向以偏西北风为主,在 35°N 以南受稳定印缅槽影响,槽前以偏西南风为主。过程期间没有较强的天气系统,利于晴好天气。

## 2.2　地面形势

### 2.2.1　第一次过程

在海平面气压场(图 5)上,12 月 31 日 02—20 时在新疆北部、蒙古西部有强冷高压中心并一直向东延伸至甘肃、内蒙古,在江苏以东的海面上有黄海高压,在两个高压之间的辽宁西部有低压,此时河北中南部夹在两个高压与一个低压之间,呈均压场结构,而均压场结构是环渤海地区起雾的标志之一(陈东辉等,2017)。31 日 20 时(图 5a)蒙古冷高压前出现了低压,阻碍了冷高压的继续东进,从锋线来看,在两个高压间的河北中南部有准静止锋维持。1 月 1 日 02—20 时低压东移至东北,蒙古冷高压增强东移、南下,这与500 hPa 上明显的低槽东移相对应(图 5b,5c)。1 日 20 时至 2 日 08 时,低压东移入海,冷高压移动不再受到阻碍,东移、南下明显加速。受此低压影响,31 日 02 时至 1 日 20 时雾区所在的河北中南部基本都在均压场内,有明显的准静止锋维持。北方冷干空气与南方暖湿空气在此交汇,既带来了有利的成雾条件,又限制了浓雾的继续扩散,这带有明显的锋面雾特征。1 日 20 时至 2 日 08 时,随着冷高压迅速东移、南下,准静止锋不再维持。冷锋 1 日 20 时还位于山东、河南一线,2 日 08 时(图 5d)就已南压至江苏、安徽以南。这带来了大量冷空气南下,使得近地面迅速降温,配合夜间的辐射降温,利于催生深厚逆温层,为强浓雾中心向南移动和传播提供了必要条件。张琳娜和郭锐(2014)也认为持续的冷空气与河北产生持续性大雾有很大关系。对比 2 日 02 时,2 日 05 时强浓雾在河南中北部迅速增强扩大为能见度 10 m 以下的特强浓雾区(图 1),这是明显的辐射雾爆发性增强特征。由此可以看出,在冷高压迅速南下后,强浓雾发展以辐射冷却作用为主。

### 2.2.2　第二次过程

2 日 20 时至 3 日 08 时(图 6a～6c),出现大范围强浓雾的河北、河南、山东、安徽、江苏主要受从西北向东南伸展的冷高压脊控制,3 日 02 时内蒙古东北端出现了新的低压,有冷空气从河套东部偏东南下至华北地区并主要影响河北与河南北部。由此带来的冷空气降温与辐射降温在强浓雾形成时起到了

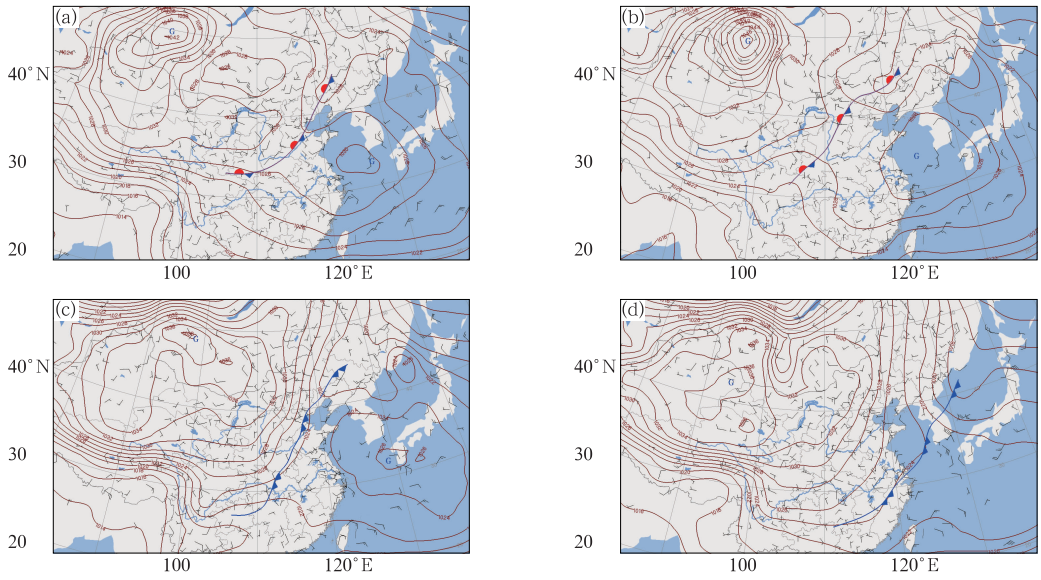


图 5　2016 年 12 月 31 日 20 时(a),2017 年 1 月 1 日 02 时(b),1 日 20 时(c),2 日 08 时(d)第一次过程海平面气压场(单位:hPa)

Fig. 5　First process sea-level pressure (unit: hPa) at 20:00 BT 31 December 2016 (a), 02:00 BT 1 (b), 20:00 BT 1 (c), 08:00 BT 2 (d) January 2017

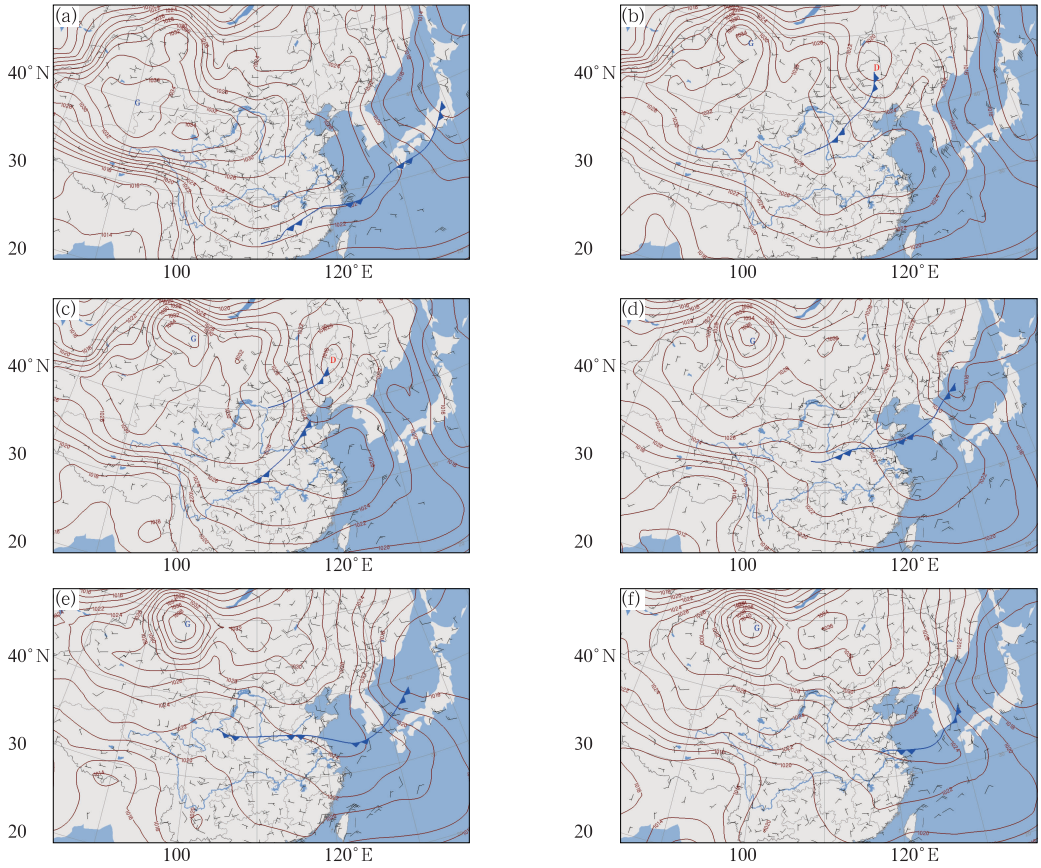


图 6 2017 年 2 日 20 时(a),3 日 02 时(b),3 日 08 时(c),3 日 20 时(d),4 日 02 时(e),4 日 08 时(f)第二、三次过程海平面气压场(单位:hPa)

Fig. 6 The second and third process sea-level pressure (unit: hPa) at 20:00 BT 2 (a), 02:00 BT 3 (b), 08:00 BT 3 (c), 20:00 BT 3 (d), 02:00 BT 4 (e), 08:00 BT 4 (f) January 2017

主要作用。但在 3 日 02 时之后,特强浓雾区集中于河南东部、山东西南部、安徽北部(图 2),这些地区位于东伸高压脊的后部,黄彬等(2014)、陈东辉等(2017)都认为入海高压后部利于平流雾发生。因此第二次过程中,较北的河北、河南北部、山东北部强浓雾仍以辐射雾为主;而对于较南的河南南部、安徽、江苏来说,辐射冷却作用相比北方并没有明显加强,浓雾在 3 日 02 时后却明显强于北方,说明平流作用的影响同样重要,强浓雾以辐射平流雾为主。

2.2.3 第三次过程

3 日 20 时至 4 日 08 时(图 6d~6f),低压东移入海,蒙古冷高压明显增强东移,这与 500 hPa 上高压脊增强东移至蒙古西部对应。由此冷高压脊由内蒙古东部经由华北南伸至浙江地区。从锋线上也可看出,在朝鲜—山东半岛一线有冷锋南下。3 日 20 时至 4 日 02 时经由内蒙古东部南下华北的强冷空气是河北出现大范围强浓雾的主要原因,且有明显的辐射雾爆发性增强特征(图 3)。而 4 日 05 时与 08 时相比,河北强浓雾明显减弱、山东中部强浓雾明显加强(图 3)则与冷锋东移相关。08 时高压脊继续东偏,冷空气南下更多经由渤海直接进入山东而较少经由河北,冷锋影响范围东移而北方的强浓雾中心也随之东移,这是锋面雾的特征。这同时也说明第三次过程中北方浓雾主要受冷空气降温和辐射降温影响,而江苏位于高压脊后部,浓雾更多受平流作用影响。

## 3 大范围浓雾的传播和扩展机制

浓雾的传播本质上是受成雾条件的变化影响,大范围的成雾条件自然会产生大范围的浓雾,而成雾条件也是浓雾维持的关键。在成雾条件中,逆温

层与水汽条件是最为重要的两个部分。这里将分别对三次过程中浓雾的传播、扩展进行分析。

### 3.1　第一次过程

第一次过程中强浓雾的传播可以明显分为两个阶段。12 月 31 日 02 时至 1 月 1 日 20 时,强浓雾集中于河北中南部。1 日 20 时至 2 日 08 时,强浓雾由河北中南部向南传播、扩展(图 1)。对于冬季干燥的河北来说,深厚的逆温层在两个阶段中对底层水汽扩散的限制与阻碍都是尤为必要的。

邢台站在 31 日 20 时至 2 日 08 时、3 日 02—08 时、3 日 20 时至 4 日 05 时三个时间段中都受到持续性强浓雾的影响,相当具有代表性。这里以邢台站为例,可以明显看出这次过程中北方浓雾逆温层的特征。31 日 20 时(图 7a),邢台站有双层逆温结构,其中贴地逆温层的逆温强度达 0.4℃ · $hPa^{-1}$,在 984～978 hPa 逆温强度则达到 0.67℃ · $hPa^{-1}$,但湿层相当薄,相应的雾顶高度约为 220 m。2 日 08 时(图 7b)邢台站贴地逆温层的逆温强度增强至 0.73℃ · $hPa^{-1}$,湿层厚度变薄,雾顶高度降至 100 m 左右。由此可以看出在两个阶段中邢台站贴地逆温都相当强且湿层较薄,区别在于第一阶段的湿层稍厚,第二阶段的贴地逆温更强,这符合冷空气南下时的锋面雾特征。为近一步分析逆温条件,这里穿过浓雾区域分别沿 37°N、115°E 做垂直速度剖面图。

由 1 日 02 时(图 8a,8d)的两张剖面图可以看出,第一阶段中强逆温层集中在 36°～38°N、114°～116°E,从流场来看 115°E 上 33°～37°N 几乎没有垂直运动,37°～38°N 有下沉运动,而在 37°N 上 114°～118°E 有比较明显的弱下沉运动,且逆温层主要集中在准静止锋前的河北中南部。北方的冷干气流经太行山进入华北,因而表现出下沉运动,南方的暖湿气流向北运动造成平流逆温,从而抑制了垂直运动,这与 115°E 上 37°N 以南没有垂直运动对应。受准静止锋影响,冷干气流与暖湿气流在河北中南部交汇,从而形成了深厚的逆温层,且在第一阶段中,南方暖平流的影响明显更大(图 9a)。

1 日 20 时之后是第二阶段,冷高压开始迅速南下,由 1 日 20 时至 2 日 08 时 1000 hP 温度平流图(图 9b,9d)可以看出,随高压南下,强度超过 $-0.6\times10^{-4}$ ℃ · $s^{-1}$ 的冷平流区域也逐渐向南延伸,至 2 日 08 时华北、华东大部分地区都受冷平流影响,而在河北中部的太行山脚则有因焚风效应产生的暖平流。其中 1 日 20 时至 2 日 08 时冷平流强度始终超过 $-0.9\times10^{-4}$ ℃ · $s^{-1}$ 的区域位于河北南部、河南北部、山东西南部,这与 2 日 02 时剖面图(图 8b,8e)上 34°～38°N、114°～116°E 的近地逆温层是对应的,且对比 1 日 02 时,2 日 02 时逆温区域温度普遍有 1～2℃ 的下降。从流场来看,115°E 上 35°～38°N 垂直运动有过山地形波特征,且在水平流场上基本为偏北风(图 9c),而 37°N 上 114°～116°E 下沉运动明显加强,这与冷空气过太行山后迅速南下对应。2 日 08 时邢台站的逆温增强与湿层变薄(图 7b)显然是受冷空气南下影响。而冷干空气经由太行山脉南下至华北时,由于焚风效应更加干燥,使得天空少云,辐射逆温加强。冷空气降温与辐射降温使得贴地逆温加强,且逆温区域随着冷空气南

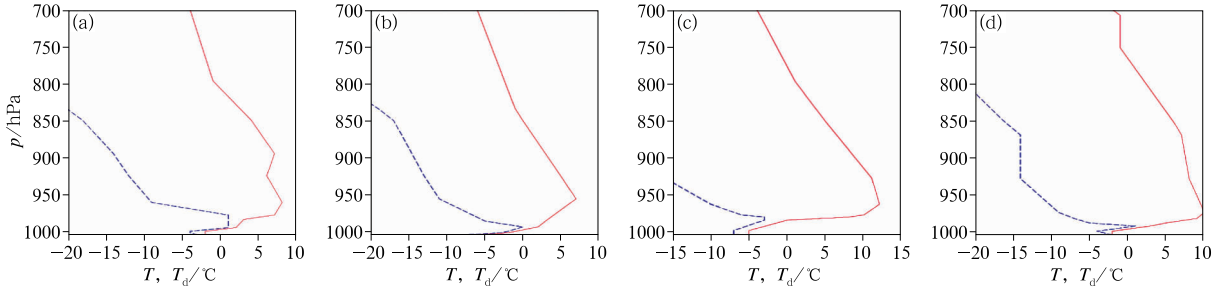


图 7　2016 年 12 月 31 日 20 时(a),2017 年 1 月 2 日 08 时(b),3 日 08 时(c),3 日 20 时(d)邢台站探空图

(红色实线为温度曲线,蓝色虚线为露点曲线)

Fig. 7　Radiosonde observation at Xingtai at 20:00 BT 31 December 2016 (a), 08:00 BT 2 (b), 08:00 BT 3 (c), 20:00 BT 3 (d) January 2017

(red solid line: temperature, blue dotted line: dew-point temperature)

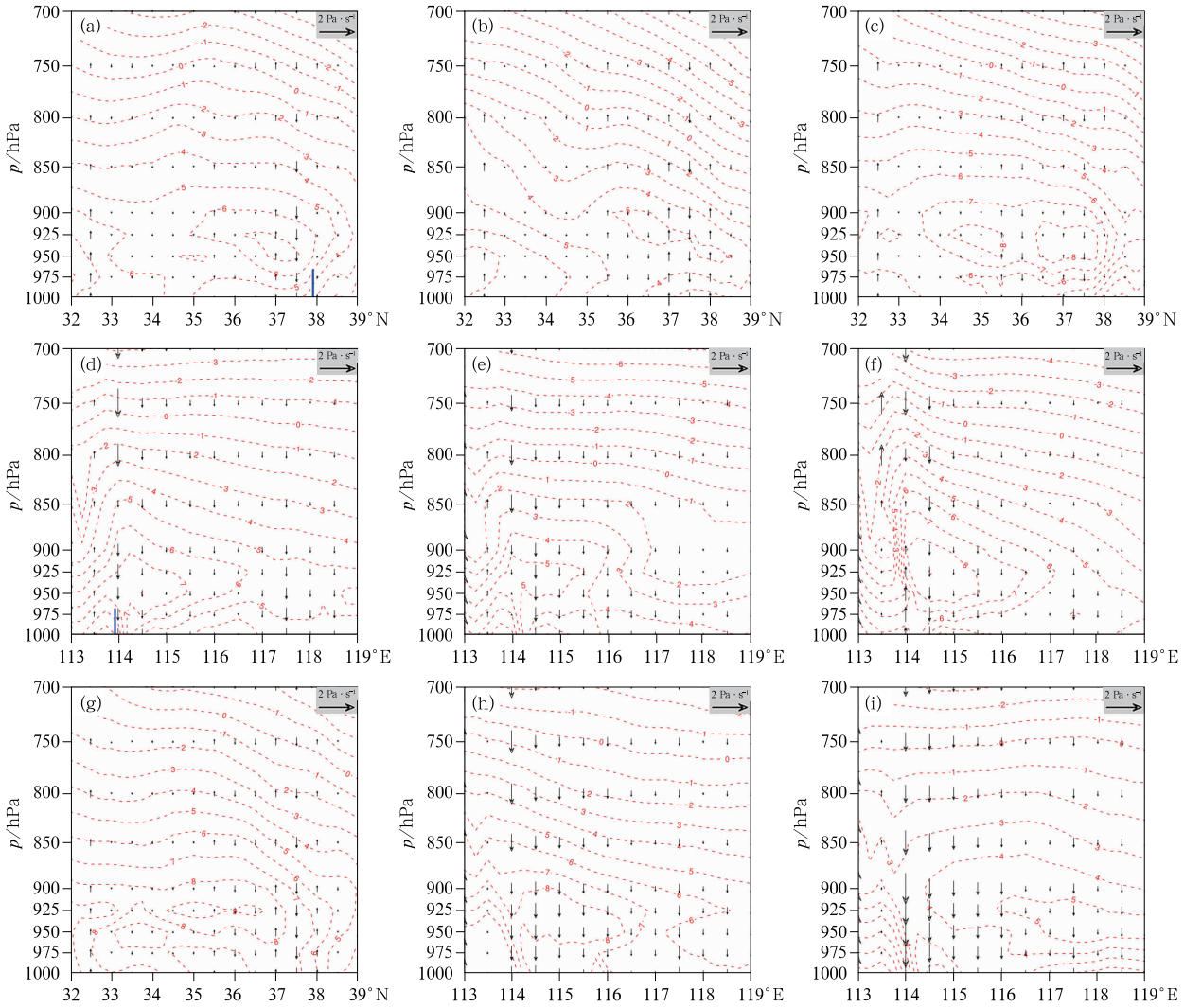


图 8 2017 年 1 月 1 日 02 时(a,d),2 日 02 时(b,e),3 日 02 时(c,f),3 日 20 时(g,h),4 日 08 时(i)沿 115°E(a,b,c,g)与 37°N(d,e,f,h,i)温度-垂直速度剖面

(温度单位:℃,垂直速度单位:Pa·s$^{-1}$,蓝线为地面准静止锋位置)

Fig. 8 Temperature-verticle velocity section along 115°E (a, b, c, g) and 37°N (d, e, f, h, i) at (a, d) 02:00 BT 1, (b, e) 02:00 BT 2, (c, f) 02:00 BT 3, (g, h) 20:00 BT 3, (i) 08:00 BT 4 January 2017

(temperature unit: ℃, verticle velocity unit: Pa·s$^{-1}$, blue line: quasi-stationary front)

下也向南扩展到河南北部、山东西南部,这是强浓雾由河北中南部向南传播的主要原因。

水汽条件同样是浓雾维持和发展的必要条件之一。第一阶段 31 日 14 时与 1 日 14 时(图 1)在河北中南部仍有大片能见度 200 m 以下的强浓雾区,这与暖湿平流向河北持续输送水汽密切相关。在 1 日 02 时 115°E 剖面图(图 8a)上 33°～37°N 间垂直运动很弱,利于平流输送,而 1 日 08 时水汽通量图(图 10a)上,在江苏、安徽北部、河南东部、山东西南部、河北南部有超过 3 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$的水汽通量大值区,其中在江苏与河北南部水汽通量分别超过 5、4 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$,可以明显看出水汽经由平流从海上经江苏、安徽、河南、山东输送至河北南部,这与暖平流向河北中南部输送的趋势是一样的(图 9a)。且在第一阶段中华北、华东的天气形势稳定,水汽输送是稳定且持续的。

第二阶段中,冷空气的迅速南下使风向自北向南逐渐转为偏北风,随着风向转变,由南向北的水汽输送结束,这也是 2 日午后强浓雾没有继续维持的原因。由 1 日 20 时至 2 日 08 时相对湿度图(图 9b～9d)可以看到,2 日 02 时随着冷空气南下与辐射降温,相对湿度对比1日20时明显上升,且相对湿

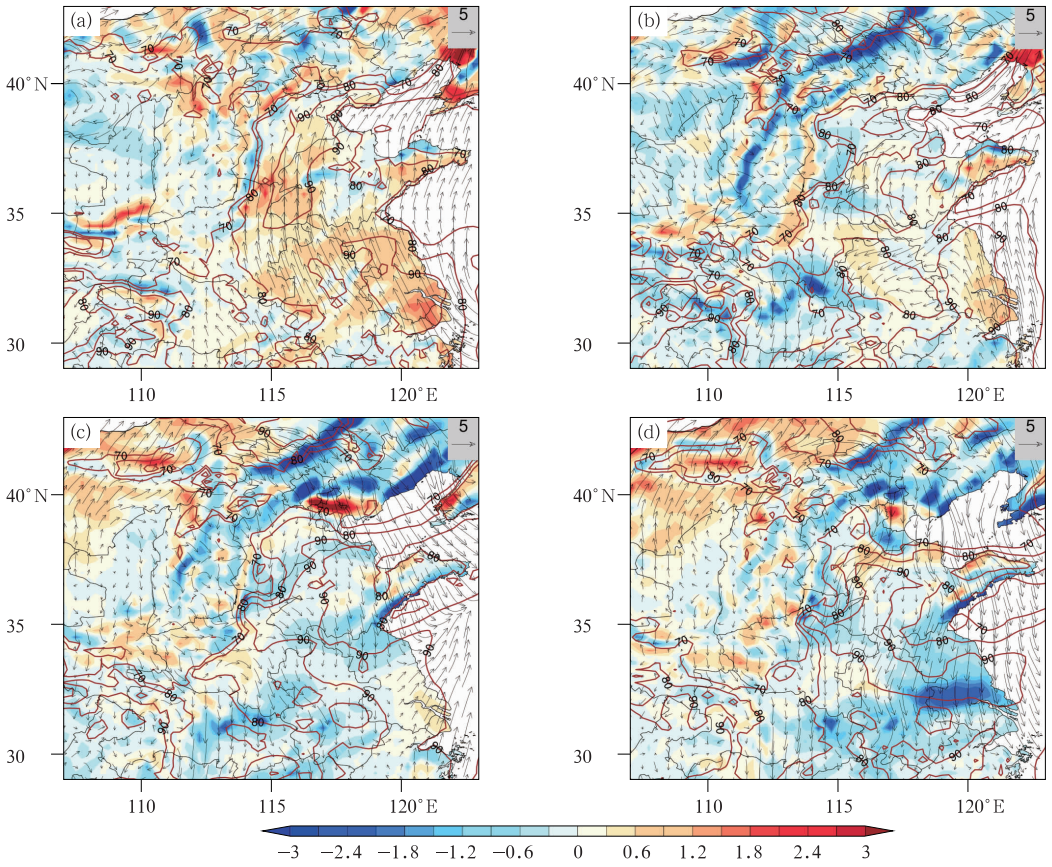


图 9　2017 年 1 月 1 日 08 时(a),1 日 20 时(b),2 日 02 时(c),2 日 08 时(d)第一次过程地面相对湿度(棕线,单位:%)、1000 hPa 风场(单位:m·s$^{-1}$)和温度平流(阴影,单位:10$^{-4}$℃·s$^{-1}$)

Fig. 9　First process ground specific humidity (brown line, unit: %), wind (unit: m·s$^{-1}$) and temperature advection (shaded, unit: 10$^{-4}$℃·s$^{-1}$) at 1000 hPa at 08:00 BT 1 (a), 20:00 BT 1 (b), 02:00 BT 2 (c), 08:00 BT 2 (d) January 2017

度超过 90%的区域由河北中南部南移到河南北部、山东西南部、安徽北部;2 日 08 时,相对湿度超过 90%的区域仍有南移。而对比 1 日 20 时与 2 日 08 时水汽通量图(图 10b,10c),水汽通量超过 3 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$的区域也由河南北部、山东西南部南移,至 2 日 08 时水汽通量超过 3 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$的只有江苏与安徽中北部。这些都能明显看出原本输送至河北南部的水汽在偏北风影响下南移,而在 1 日 20 时至 2 日 08 时,水汽主要南移至河南北部、山东西南部与安徽北部,正是由于在这些地区有水汽条件配合,强浓雾中心才从河北南部南移至河南北部并迅速扩展(图 1)。

值得注意的是,仅有水汽条件也难以成雾。以江苏为例,1 日 20 时至 2 日 08 时江苏的相对湿度均超过 90%(图 9b～9d),却在 2 日 02 时之后才开始出现能见度 500 m 左右的雾(图 1)。而直到 2 日 02—08 时江苏才受冷平流影响(图 9c,9d),这导致 2 日 02 时之前江苏没有必要的逆温条件,使得水汽扩散而难以成雾。由此可见,水汽条件与逆温层是两个必不可少的成雾条件。

### 3.2　第二次过程

第二次过程中强浓雾最初出现在河南与山东交界处,随后向北传播至河北南部,向南传播至安徽中北部并与在江苏的强浓雾相接(图 2),如此广范围的传播,平流作用相当重要。

在第二次过程中,邢台站在 3 日 02 时之后才开始受强浓雾影响,3 日 08 时(图 7c)近地逆温层强度加强,在 981～977 hPa 最强,达 2℃·hPa$^{-1}$,但湿层有减弱,雾浓度有下降。通过 3 日 02 时的两张剖

面图(图 8c,8f)可以看出,33°～38°N、114°～117°E 间逆温层显著且相比 2 日 02 时,逆温区域普遍有 2～3℃的增温。在 115°E 上 33°～38°N 间垂直运动仍不明显,在水平流场上有偏南风(图 11b),而在 37°N 上 114°～118°E 间垂直运动也有减弱,在水平流场上则有偏西风(图 11b)。偏南风对应来自南方的暖湿平流,偏西风则对应冷空气的补充南下。2 日 20 时至 3 日 08 时 1000 hP 温度平流图(图 11a～11c)上整个华北基本都以暖平流为主,且河南北部与河北的暖平流强度基本都达到 $1.8\times10^{-4}$ ℃ · $s^{-1}$ 以上。而除了 2 日 20 时河南及河南以南有明显冷平流之外,只有在河北中部、河南中部与锋线对应

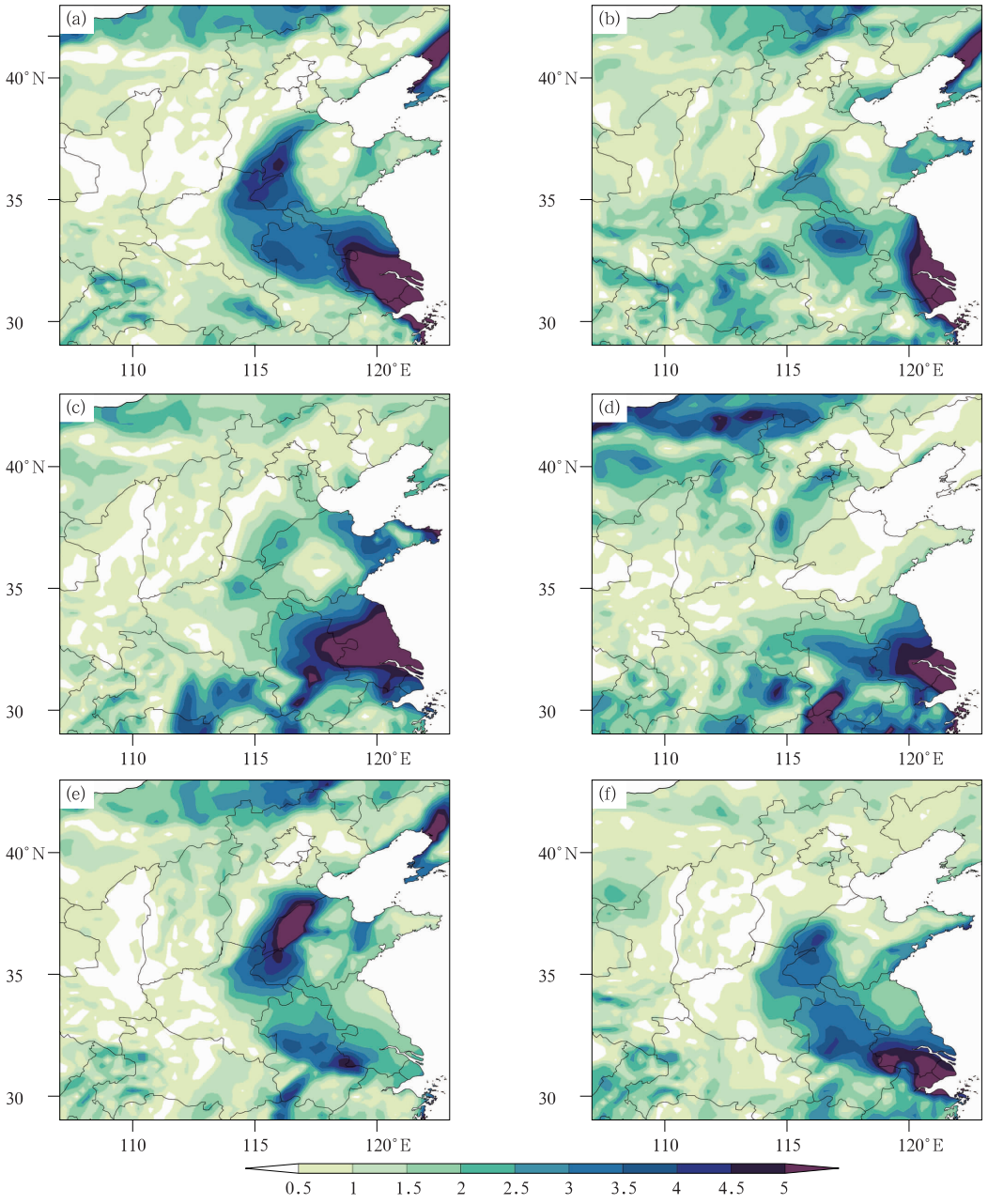


图 10 2017 年 1 月 1 日 08 时(a),1 日 20 时(b),2 日 08 时(c),2 日 20 时(d),3 日 08 时(e),3 日 20 时(f)1000 hPa 水汽通量(阴影,单位:g · $cm^{-1}$ · $hPa^{-1}$ · $s^{-1}$)

Fig. 10 Vapor flux (shaded, unit: g · $cm^{-1}$ · $hPa^{-1}$ · $s^{-1}$) at 1000 hPa at 08:00 BT 1 (a), 20:00 BT 1 (b), 08:00 BT 2 (c), 20:00 BT 2 (d), 08:00 BT 3 (e), 20:00 BT 3 (f) January 2017

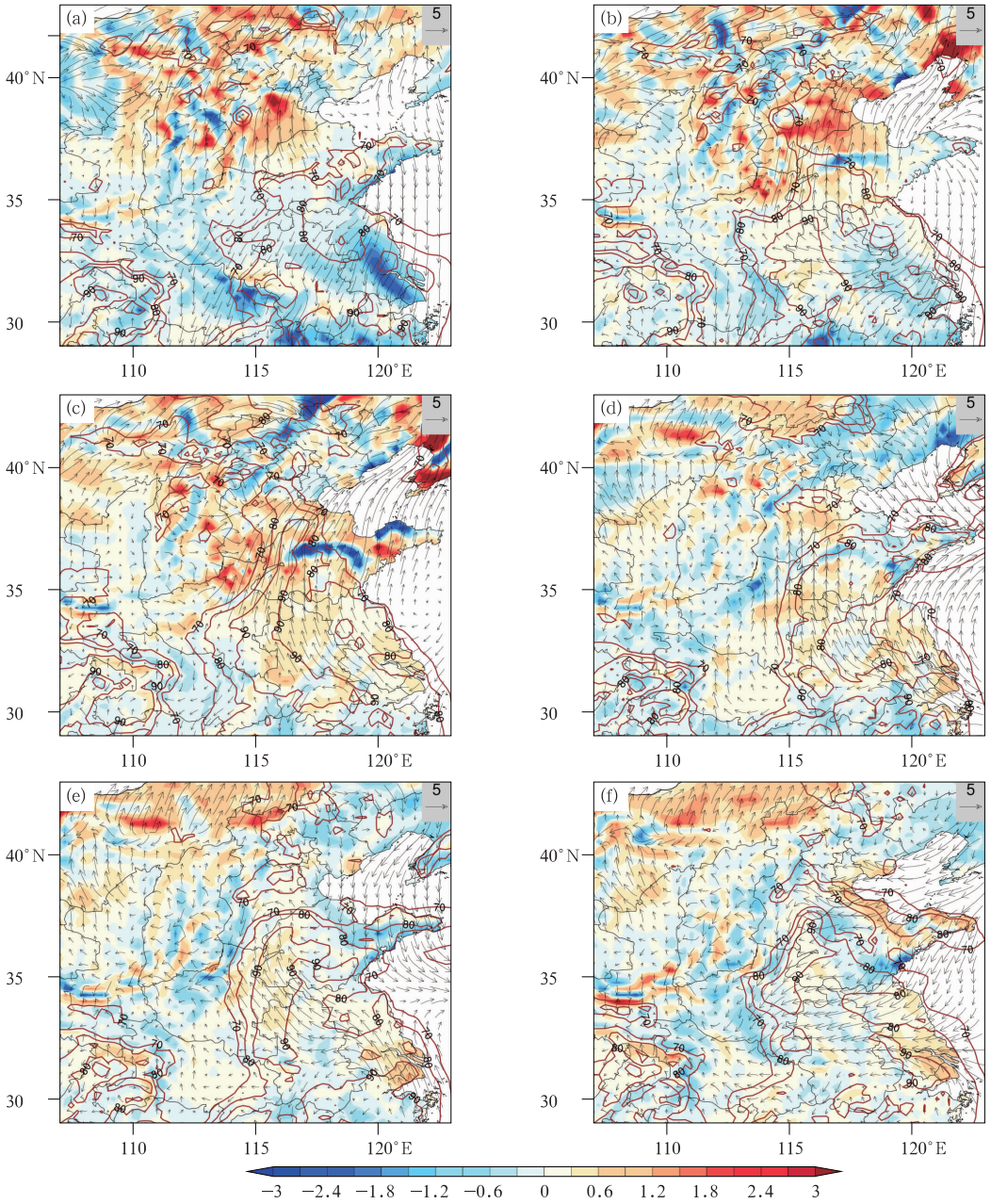


图 11　2017 年 1 月 2 日 20 时(a),3 日 02 时(b),3 日 08 时(c),3 日 20 时(d),4 日 02 时(e),4 日 08 时(f)第二、三次过程地面相对湿度(棕线,单位:%)、1000 hPa 风场(单位:m·s$^{-1}$)和温度平流(阴影,单位:10$^{-4}$ ℃·s$^{-1}$)

Fig. 11　The second and third process ground relative humidity (brown line, unit: %), wind (unit: m·s$^{-1}$) and temperature advection (shaded, unit: 10$^{-4}$ ℃·s$^{-1}$) at 1000 hPa at 20:00 BT 2 (a), 02:00 BT 3 (b), 08:00 BT 3 (c), 20:00 BT 3 (d), 02:00 BT 4 (e), 08:00 BT 4 (f) January 2017

(图 6a)的区域有冷平流,且贴地层局部的冷平流更符合平流雾的形成条件(许爱华等,2016)。暖平流的强盛是显而易见的,而这与高压脊的东伸相关,2 日 20 时至 3 日 08 时高压脊对应的反气旋中心由山东北部向东南移至江苏以东(图 11a～11c),华北从 3 日 02 时开始就位于反气旋中心的后部,受偏南气流影响,这是暖平流强盛的原因。强盛的暖平流在河北南部、河南东部、山东西南部、安徽北部产生了很强的平流逆温,而从河北中部与河南中部补充南下的冷空气与辐射降温又近一步加强了逆温,这与

邢台站3日08时的近地逆温增强对应(图7c),且邢台站逆温层在980 hPa左右达到最强,而不是2日08时的1000 hPa,也符合平流逆温的特征。3日02时之后强盛的暖平流使得逆温区域相比1日晚间再次扩大,且至3日08时南方的安徽与江苏都受其影响。逆温区的扩大与增强则使得3日02时之后强浓雾范围明显扩展(图2)。

平流同时也会向雾区输送大量水汽。2日20时,在河南与山东交界处有相对湿度超过85%的水汽中心,这里的水汽多是受泰山山脉阻挡后积聚于微山湖的水汽。而这一区域风速较小(图11a),利于生成逆温层和积聚水汽,强浓雾最初也正是出现在这一区域。而在水汽通量图(图10d)上这一区域的水汽通量几乎为0 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$,这说明2日20时雾区的出现主要是由于补充南下的冷空气降温与辐射降温作用,缺少平流的水汽输送,相应的雾区范围也不大。3日02—08时,随着暖平流加强,可以看到在相对湿度图(图11b, 11c)上相对湿度超过90%的区域集中在安徽北部、河南东部、山东西南部,而08时相对湿度超过90%的区域更是向北延伸至河北南部,由08时水汽通量图(图10e)可以看到在河南东部、山东西南部、河北南部的水汽通量达到5 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$以上,而在安徽中北部水汽通量也普遍达到2.5 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$。结合风场可以明显看出,平流经由江苏、安徽、河南、山东最终将来自海上的水汽输送至河北,且与1日08时相比,向北方输送的水汽量明显更多。大量的水汽输送与广范围的逆温区配合,是第二次过程中强浓雾在河南、山东、安徽、江苏迅速传播、扩展的主要原因。河北因为水汽条件不如南方,强浓雾的范围与浓度都逊于南方。

总体上第二次过程中浓雾的传播是由平流主导的,随着高压脊东伸,3日02时开始江苏、安徽、河南、山东、河北受来自黄海海面的暖湿平流影响,是强浓雾得以大范围传播的关键。3日08时之后,反气旋中心完全入海,江苏沿岸由偏东风转为偏南风(图略),水汽输送大大减弱,强浓雾也迅速消散。

### 3.3 第三次过程

第三次过程中强浓雾最初出现在河南东部、山东西南部与河北中南部,随后主要向北、向东传播至河北、山东,且在河南的强浓雾也有增强(图3),浓雾的传播明显受到逆温区的限制。

3日20时(图7d)邢台站逆温强度有减弱但依然有相当的强度,逆温层在995～984 hPa强度最大,达0.64℃·hPa$^{-1}$。湿层总体变薄。通过3日20时的两张剖面图(图8g, 8h)可以看出,35°～37°N、114°～117°E间有逆温层,相比3日02时,逆温层集中于河北与河南北部,逆温区域明显减小。115°E上33°～37°N间水平风向以偏南风(图11d)为主,而在37°～38°N间垂直运动增强水平运动减弱,这是受锋面影响所致。3日20时1000 hPa温度平流图(图11d)上,河北中南部、河南东部、山东西南部、江苏中部有0.9×10$^{-4}$℃·s$^{-1}$以上的暖平流,这些暖平流区与20时强浓雾区有对应,但相比第二次过程,暖平流较弱。由此可见第三次过程开始时逆温区仍然有平流逆温的影响。而对比4日02—08时1000 hPa温度平流图(图11e,11f),随着由内蒙古东部经山东半岛、辽东半岛南下的冷空气增强,暖平流明显减少,在山东、河北、河南,大部分暖平流转为冷平流,冷平流明显加强,普遍超过−0.9×10$^{-4}$℃·s$^{-1}$,贴地层的大量冷空气使得低层的气温降低,并将较暖的空气趋向高层,这反而又增强了逆温层。受冷空气降温与辐射降温影响,山东、河北、河南有深厚逆温,这也正是第三次过程中强浓雾大部集中于这些区域(图3)的原因。值得一提的是,对比3日20时与4日08时37°N上剖面图(图8h, 8i),逆温层由114°～117°E东移至116°～119°E间且温度普遍下降2～3℃,这与冷锋东移相关(图6d, 6f),而河北的强浓雾也在4日08时明显减弱。可见第三次过程中随冷锋南下的冷空气是影响北方逆温区的主要因素。

尽管深厚逆温是影响北方浓雾传播、扩展的主要因素,但在20时仍然有平流水汽输送。由3日20时水汽通量图(图10f)可以看到,在江苏中南部、安徽北部、河南东部、山东西南部水汽通量超过2.5 g·cm$^{-1}$·hPa$^{-1}$·s$^{-1}$,与20时流场(图11d)对应,可以明显看到水汽通过平流从海上经江苏、安徽、河南、山东输送。而3日20时至4日08时相对湿度图(图11d～11f)可以看出北方相对湿度超过90%的区域也集中于河南与山东交界处,这与水汽输送的终点相符。大量的水汽是河南在相比河北、山东受冷锋影响较小时仍有大范围强浓雾的原因。值得关注的是,河北中南部的相对湿度在3日20时至4日08时普遍达不到80%,却出现了大范围能见度低于10 m的强浓雾,这进一步说明了第三次过程

中河北的强浓雾几乎完全受强冷空气南下影响。

与第二次过程不同,第三次过程仅在过程开始有平流作用且平流作用并不强,主导强浓雾传播与扩展的的是逆温条件。随山东半岛—辽东半岛一线南下的冷锋带来的强冷空气是导致北方强逆温的主要因素。但与北方浓雾不同,江苏的强浓雾基本是受平流影响,且经由平流输送至河南、山东的水汽也利于强浓雾的扩展。

### 3.4　地形作用

雾与云的区别,在于雾总是接地的(李子华等,2008)。这次过程中,尤其是在第二、三次过程间,河南、河北雾顶普遍在 100～400 m(图 7),因此海拔 200 m 以上的地形对强浓雾的传播有明显影响。

首先是因海拔高度限制了浓雾传播的范围。由雾区分布(图 1～图 3)可以看出雾区基本局限于海拔高度低于 200 m 的华北平原与华东平原,以北受燕山山脉阻挡,以西受太行山脉阻挡,以南受大别山脉阻挡,且在山东有泰山山脉与山东半岛丘陵阻挡,强浓雾在山东的传播范围较小。我国其他常见雾区如长江中游平原、四川盆地等都受地形影响限制了雾区的传播范围,即使生成区域性浓雾,局地性也较强。这次过程中强浓雾则基本覆盖了全华北、华东平原,几乎达到了强浓雾传播的极限范围。

其次是山东因独特的地形,在强浓雾传播过程中相对独立。山东西南部几乎一直受强浓雾控制。从地形上分析,这一区域以东是泰山山脉,以西则是海拔高度普遍在 100 m 左右的河南中部,尤其是受以泰山为主的山东丘陵阻挡,华东与华北间的水汽输送基本都要通过这一区域,这就使得这一区域容易积聚水汽。而山东丘陵与山东半岛在阻挡水汽与冷空气的同时,自身也不会受到强浓雾影响,这是雾区分布图上山东丘陵与山东半岛的位置没有强浓雾的原因。因此,山东中部在第一二次过程中基本没有强浓雾,但第三次过程中,山东中部出现了大范围的强浓雾(图 3),这是由于冷锋在山东半岛—辽东半岛一线,冷空气经由莱州湾南下山东中部而没有受到阻挡,从而在山东产生了深厚逆温。

## 4　结　论

(1) 这次大范围强浓雾过程可以根据白天午后浓雾是否消散细分为三次过程,其中第一次过程仅在过程最后一天有向南传播、扩展;而第二、三次过程则分别有向南、向北的大范围传播、扩展。

(2) 冷高压的南下,尤其是从华北地区南下,是使得这次强浓雾过程增强并大范围传播的直接因素。一方面带来了大量冷干空气,云难以生成,辐射逆温增强。随后冷空气的补充南下又进一步扩大了逆温区,提供了大范围的成雾条件;另一方面,受高压影响的风场为平流输送提供了必要条件。

(3) 强的平流输送则是影响雾传播的一个重要因素。借助平流,水汽从黄海经由江苏、安徽、河南并最终输送至河北南部,为输送路径上的地区提供水汽条件;强暖平流则带来显著的平流逆温。这些都促成强浓雾的大范围传播。

(4) 地形同样是影响雾传播的因素。环绕于华北、华东平原的燕山、太行山、大别山等山脉限定雾传播的最大范围;山东丘陵、山东半岛及整体海拔稍高的河南则使得水汽输送有倾向性,并为山东中部阻挡了南下的冷空气。

## 参考文献


包云轩,丁秋冀,袁成松,等,2013. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验[J]. 大气科学,37(1):124-136. Bao Y X, Ding Q J, Yuan C S, et al, 2013. Numerical simulations of a highly complex fog event on Shanghai-Nanjing Expressway[J]. Chin J Atmos Sci,37(1):124-136(in Chinese).

陈东辉,尚子微,宁贵财,等,2017. 环渤海地区雾天气分型及预报方法[J]. 气象,43(1):46-55. Chen D H, Shang Z W, Ning G C, et al,2017. Classification of fog synoptic situation and forecasting method around Bohai Sea coastal areas[J]. Meteor Mon,43(1):46-55(in Chinese).

郭丽君,郭学良,2015. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究[J]. 气象学报,73(2):368-381. Guo L J, Guo X L, 2015. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events in northern China[J]. Acta Meteor Sin,73(2):368-381(in Chinese).

郭丽君,郭学良,2016. 北京 2009—2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学,40(2):296-310. Guo L J, Guo X L,2016. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009－2013 in the Beijing region[J]. Chin J Atmos Sci,40(2):296-310(in Chinese).

黄彬,王晴,陆雪,等,2014. 黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析[J]. 气象,40(11):1324-1337. Huang B, Wang Q, Lu X, et al, 2014. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 40(11):1324-1337(in Chinese).

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. Huang Y S,Huang Y R,Li Z H,et al,2000. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna[J]. Acta Meteor Sin,58(6):715-725(in Chinese).

黄政,袁成松,包云轩,等,2016. 基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验[J]. 气象,42(8):944-953. Huang Z,Yuan C S,Bao Y X,et al,2016. Numerical simulations of heavy fog processes on expressways based on different parameterization schemes[J]. Meteor Mon,42(8):944-953(in Chinese).

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. Li Z H,Huang J P,Sun B Y,et al,1999. Burst characteristics during the development of radiation fog[J]. Chin J Atmos Sci,23(5):623-631(in Chinese).

李子华,彭中贵,1994. 重庆市冬季雾的物理化学特性[J]. 气象学报,52(4):477-483. Li Z H,Peng Z G,1994. Physical and chemical characteristics of the Chongqing winter fog[J]. Acta Meteor Sin,52(4):477-483(in Chinese).

李子华,杨军,石春娥,等,2008. 地区性浓雾物理[M]. 北京:气象出版社. Li Z H,Yang J,Shi C E,et al,2008. The Physics of Regional Dense Fog[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).

刘端阳,濮梅娟,杨军,等,2009. 2006年12月南京连续4天浓雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象学报,67(1):147-157. Liu D Y,Pu M J,Yang J,et al,2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006[J]. Acta Meteor Sin,67(1):147-157(in Chinese).

陆春松,牛生杰,杨军,等,2010. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学,34(4):681-690. Lu C S,Niu S J,Yang J,et al,2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci,34(4):681-690(in Chinese).

濮梅娟,严文莲,商兆堂,等,2008a. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J]. 高原气象,27(5):1111-1118. Pu M J,Yan W L,Shang Z T,et al,2008a. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing[J]. Plateau Meteor,27(5):1111-1118(in Chinese).

濮梅娟,张国正,严文莲,等,2008b. 一次罕见的平流辐射雾过程的特征[J]. 中国科学:地球科学,38(6):776-783. Pu M J,Zhang G Z,Yan W L,et al,2008b. Features of a rare advection-radiation fog event[J]. Sci China:Earth Sci,38(6):776-783(in Chinese).

田小毅,朱承瑛,张振东,等,2018. 长江江苏段江面雾的特征和预报着眼点[J]. 气象,44(3):408-415. Tian X Y,Zhu C Y,Zhang Z D,et al,2018. Characteristics and forecasting focus for river fog in Jiangsu section of Yangtze River[J]. Meteor Mon,44(3):408-415(in Chinese).

王益柏,梅娜,范磊,等,2014. WRF模式对2013年1月华北一次大雾的数值对比试验[J]. 气象,40(12):1522-1529. Wang Y B,Mei N,Fan L,et al,2014. Comparative experiments of WRF simulation on a fog event of January 2013 in North China[J]. Meteor Mon,40(12):1522-1529(in Chinese).

吴兑,邓雪娇,毛节泰,等,2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观结构与能见度研究[J]. 气象学报,65(3):406-415. Wu D,Deng X J,Mao J T,et al,2007. A study on macro-and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain[J]. Acta Meteor Sin,65(3):406-415(in Chinese).

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. Wu D,Deng X J,Ye Y X,et al,2004. The study on fog-water chemical composition in Dayaoshan of Nanling Mountain[J]. Acta Meteor Sin,62(4):476-485(in Chinese).

吴兑,吴晓京,朱小祥,2009. 雾和霾[M]. 北京:气象出版社. Wu D,Wu X J,Zhu X X,2009. Fog and Haze[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).

许爱华,陈翔翔,肖安,等,2016. 江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J]. 气象,42(3):372-381. Xu A H,Chen X X,Xiao A,et al,2016. Analysis on the characteristics of meteorological factors and forecast ideas for regional advection fog in Jiangxi[J]. Meteor Mon,42(3):372-381(in Chinese).

张琳娜,郭锐,2014. 2012年冬季北京三种高影响天气的关联与成因分析[J]. 气象,40(5):598-604. Zhang L N,Guo R,2014. Analyses on relationship and causes for the three high-influence weather events in Beijing in winter 2012[J]. Meteor Mon,40(5):598-604(in Chinese).

Boutle I A,Finnenkoetter A,Lock A P,et al,2016. The London Model:forecasting fog at 333 m resolution[J]. Quart J Roy Meteor Soc,142(694):360-371.

Cereceda P,Osses P,Larrain H,et al,2002. Advective,orographic and radiation fog in the Tarapacá Region,Chile[J]. Atmos Res,64(1/2/3/4):261-271.

Collett Jr J L,Sherman D E,Moore K F,et al,2001. Aerosol particle processing and removal by fogs:observations in chemically heterogeneous central California radiation fogs[J]. Water,Air Soil Pollut:Focus,1(5/6):303-312.

Elias T,Jolivet D,Mazoyer M,et al,2018. Favourable and unfavourable scenarii of radiative fog formation defined by ground-based and satellite observation data[J]. Aerosol Air Qual Res,18(1):145-164.

Fuzzi S,Facchini M C,Orsi G,et al,1992. The Po valley fog experiment 1989[J]. Tellus B,44(5):448-468.

Guo L J,Guo X L,Fang C G,et al,2015. Observation analysis on characteristics of formation,evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China[J]. Sci China:Earth Sci,58(3):329-344.

Haeffelin M,Bergot T,Elias T,et al,2010. PARISFOG:shedding new light on fog physical processes[J]. Bull Amer Meteor Soc,91(6):767-783.

Li Y L,Hoogeboom P,Russchenberg H,2014. Observations and modeling of fog by cloud radar and optical sensors[C]// 2014 44th European Microwave Conference. Rome,Italy:IEEE:1824-1827.

Li Z H,Zhang L M,Zhang Q H,1994. The physical structure of the winter fog in Chongqing metropolitan area and its formation process[J]. Acta Meteor Sin,8(3):316-328.