贾星灿，郭学良. 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究 [J]. 大气科学, 36 (5): 995−1008, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11200.
Jia Xingcan, Guo Xueliang. 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 995−1008.

# 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究

贾星灿 [1, 3] 郭学良 [1, 2]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室，北京 100029
2 中国气象科学研究院，北京 100081
3 中国科学院研究生院，北京 100049

**摘 要** 基于 WRF/Chem 模式和雾的观测资料，开展了包含和不包含人为污染排放源两种大气背景条件下的数值模拟对比试验，在此基础上探讨了人为污染物对 2009 年 12 月 1 日发生在我国华北和华东地区的一次浓雾天气过程的影响机理。结果表明，在考虑污染排放源时，模式模拟的雾的空间分布和强度变化与卫星、能见度仪和微波辐射计的观测更为接近。污染条件下的边界层结构更有利于雾的形成，人为大气污染物使雾的范围最大增加 50%，雾的强度最大增加 5 倍，平均延长雾持续时间 1.5 小时。由于人为污染物增加了雾凝结核（FCN）数浓度，进而使雾滴数浓度显著增大，有利于雾的增强。同时，污染物通过影响雾滴的凝结过程和潜热释放过程，对长波辐射降温和湍流过程有重要影响，使边界层的热力和动力结构更有利于雾的增强和发展。污染气体 $SO_2$、$NO_x$ 和 $NH_3$ 的排放产生的二次气溶胶对雾的形成和发展具有重要影响。不考虑这些污染气体排放时，平均雾水含量可降低 32%。

**关键词** 大气污染 雾形成 WRF/Chem 模拟
**文章编号** 1006-9895(2012)05−0995−14 **中图分类号** P426 **文献标识码** A
**Doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11200

# Impacts of Anthropogenic Atmospheric Pollutant on Formation and Development of a Winter Heavy Fog Event

JIA Xingcan[1, 3] and GUO Xueliang[1, 2]

1 *Laboratory of Cloud and Precipitation and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081
3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

**Abstract** The WRF/Chem model coupled with local anthropogenic atmospheric pollution emissions and fog observational data were used to assess the effects of human-induced pollutants on a heavy fog event on 1 Dec 2009 in North China and East China. The experiments with and without anthropogenic emissions were designed and conducted. The results suggest that the simulated fog distribution and intensity with anthropogenic emission are closer to observed ones. The polluted atmospheric boundary condition is found to create a favorable condition for fog formation, increasing the fog area up to 50%, the intensity of 5 times in maximum, and the duration of 1.5 h on average. Compared with that under clean air condition, the number concentration of fog condensation nuclei (FCN) is much higher in polluted air, which causes a higher fog droplet number concentration, and influences the processes of droplet condensation, long wave radiation, turbulent motion, and provides the favorable dynamic and thermal boundary conditions for fog development.

**收稿日期** 2011−10−26，2012−03−08 收修定稿
**资助项目** 公益性行业（气象）科研专项 GYHY200806001，国家科技支撑计划 2006BAC12B03
**作者简介** 贾星灿，女，1983 年出生，博士研究生，研究领域：云雾物理化学。E-mail: jiaxc@mail.iap.ac.cn
**通讯作者** 郭学良，E-mail：guoxl@mail.iap.ac.cn

The secondary aerosols produced by trace gases $SO_2$, $NO_x$, and $NH_3$ make great influence on the formation and development of fog, and the averaged liquid water content has a decrease of 32%, without these trace gas emission.

**Key words** pollutant, fog formation, WRF/Chem simulation

## 1 引言

雾是指大量水滴及冰晶微粒悬浮在贴地层空气中，使水平能见度小于 1 km 的一种天气现象。刘小宁等（2005）利用 1950 年以来我国 679 个国家基本站的雾观测资料，分析了我国雾时空分布的基本气候特征，表明我国大部分地区、尤其是大城市地区的雾日数都有所减少；在华北平原南部、黄河下游至长江中下游大部分地区的雾日数变化不大，略有增多，而上述地区大城市的雾日数基本不变，略有减少，这与王丽萍等（2005, 2006）的研究结果一致。Niu et al.（2010a）统计分析了 NOAA 提供的中国 390 个气象站近 30 年的冬季雾资料，表明中国大部分地区的雾日数呈现减少趋势而东部地区的雾日呈现增多的趋势，这一区域也正是经济较为发达、污染较为严重的区域。这种现象的出现一方面是由于城市化所造成的城市热岛不利于城市中雾的形成（Djen, 1992; LaDochy, 2005），另一方面空气污染加重会造成气溶胶粒子增多，从而影响雾的形成（Shi et al., 2008）。

大气污染物和雾的相互影响和作用的主要媒介是气溶胶（Gultepe et al., 2007），气溶胶既可以影响云雾的辐射特性，也可以作为凝结核参与雾滴的形成（Levin and Cotton, 2009）。Hudson（1980）发现受污染的城市雾与清洁的海洋气团雾之间微结构存在系统性差异，雾的微结构与凝结核特征之间存在依赖关系。我国污染区和清洁地区雾滴也表现相同的特征，污染区雾滴的数浓度较高且直径较小（李子华, 2001; Niu et al., 2010b）。Bott（1991）通过数值模式研究了雾的微结构及生命期对气溶胶特性的依赖关系，结果表明海洋型、城市型和郊区型的气溶胶尺度谱可产生不同类型和生命期的雾。Li et al.（2011）发现上海雾水的离子数浓度远高于美国的大城市区，且主要以工业和交通排放所产生的$SO_4^{2-}$和$NO_3^-$为主，且可溶性气溶胶影响雾的微物理特性。张光智等（2005）认为雾形成前期低空出现的逆温会使得城市及周边大气中烟尘污染物$SO_2$及$NO_2$在低空积聚，起雾前，随着$SO_2$及$NO_2$浓度的增加，凝结度迅速增长；雾期间，随着凝结度增长，$SO_2$及$NO_2$浓度反而下降。这表明城市大气污染物作为凝结核在低空堆积对触发雾的形成起重要作用。

由于雾是一种空间分布差异很大的天气现象，其生消过程涉及到复杂的微物理、动力、热力、辐射以及化学过程，仅依赖观测资料无法深入研究雾空间结构、边界层特性及生消机理。因此，必须借助数值模式对雾进行模拟研究，雾模式也经历了一维、二维到三维高分辨率区域模式的发展过程（Niu et al., 2010b）。

Pagowski et al.（2004）用MM5模拟分析了加拿大安大略省浓雾的成因，并讨论了初始、边界条件和湍流参数化方案对雾模拟的敏感性。史月琴等（2006）对发生在南岭山地浓雾进行了数值模拟，分析浓雾发生、发展和消散机制，表明低层的偏南暖湿气流沿山坡爬升冷却凝结形成爬坡雾，而大范围层状云系在山头接地形成了地面的浓雾。何晖等（2009）通过辐射雾的数值模拟，表明雾是在稳定大气层结、充沛水汽条件下，地面长波辐射冷却及雾顶的长波辐射冷却降温作用下形成发展，而太阳的短波辐射对雾的减弱消散有重要影响。Shi et al.（2010）基于MM5模拟了安徽省的一次持续36小时的辐射平流雾，并指出来自东南方的强暖湿空气输送，是雾维持的主要原因。Müller et al.（2010）将PAFOG模式加入WRF中的Ferrior方案中，加入了云水过程的双参化方案，使得模式能够更好地模拟出雾滴数浓度、雾滴沉降过程、雾的分布和持续时间。结果也表明三维数值模拟对于再现复杂地形下雾的空间和时间分布是至关重要的。Zhou and Ferrier（2008）指出雾的液态含水量的垂直分布是辐射冷却、湍流、雾滴重力沉降相互作用达到平衡的结果。在气溶胶对雾的影响方面，石春娥等（2001）在三维雾模式中增加了气溶胶粒子的长波辐射效应，利用重庆市的地形及有关资料，模拟了重庆市冬季雾的形成和发展过程，与不考虑气溶胶粒子情况下雾的形成和发展过程进行了对比分析。

上述雾的数值模式研究基本侧重雾过程的再现和物理机理的研究。有关污染物对雾形成影响的研究也基本局限在直接在模式中增加气溶胶的方法，因此，很难揭示人为污染物（污染气体）通过

化学过程形成二次气溶胶后对雾形成和发展的影响过程。在城市和城市群地区，可溶性污染气溶胶可以直接作为雾凝结核，对雾的形成和发展产生作用，但同时污染气体也可以通过化学过程形成二次气溶胶，同样可以充当雾凝结核，对雾形成产生作用。特别在雾天气发生时存在的大气逆温层结构,使得污染物在低空聚集，雾区的化学反应过程更加剧烈。因此，在利用数值模式模拟大气污染物对雾的形成和发展的影响时，考虑因污染物的化学过程产生的二次气溶胶的影响是十分必要的。

基于上述原因，本文利用耦合化学模块的WRF/Chem模式，引入区域人为污染排放源，对2009年11月30日~12月1日发生在我国华北和华东地区的一次浓雾过程进行了数值模拟，并与观测资料进行比较，分析人为大气污染物排放在这次浓雾生成和发展过程中的作用，并基于模式结果对比清洁和污染背景下雾的边界层结构和宏微观特性，探讨其影响机制。

## 2 模式与观测资料

### 2.1 模式的物理化学方案

WRF/Chem模式是由美国国家海洋大气局（NOAA)、国家环境预报中心（NCEP)、国家大气研究中心（NCAR)等机构联合开发的新一代天气研究和预报模式，可用于研究污染气体和气溶胶的排放、湍流混合、传输和转化等过程，气溶胶的直接和间接效应（辐射与光化学），干湿沉降等过程。WRF/Chem的气象场由WRF模式提供，空气质量部分采用与气象部分完全相同的传输方案（质量和标量)、格点和时间分辨率以及物理方案（用于次网格传输计算），实现了气象模式与化学传输模式在时间和空间上的“紧密耦合”和“真正的在线传输”，且无需对气象场进行时间插值，从而可以在更大程度上反映实际大气状况（Grell et al., 2005)。研究表明，WRF/Chem对化学场的模拟已经表现出值得信赖的模拟能力（Fast et al., 2006; Geng et al., 2007; Chapman et al., 2009; Ntelekos et al., 2009; Zhang et al., 2009a)。

本文使用WRF/Chem 的3.2.1版本，试验中相关的化学和物理方案设置如表1所示。气相化学反应机制为CBM-Z（Zaveri and Peters, 1999)，由CBM-Ⅳ发展而来，它根据不同的碳键机制来对有机物的种类和反应进行归类。气溶胶方案使用MOSAIC分档方案，其将气溶胶分为4档或8档，可以模拟每一档粒子的质量和数浓度（Zaveri et al., 2008)。由于气溶胶分4档或者8档对结果不会产生显著影响（Ntelekos et al., 2009)，本文选用4档方案（如表2）以提高计算效率，节省资源。

**表1 数值试验中相关物理和化学方案**

**Table1 Physics and chemistry options used for the simulation cases**

| 方案名称 | 方案选择 |
|---|---|
| 微物理方案 | 双参Lin方案 |
| 长波辐射方案 | RRTM方案 |
| 短波辐射方案 | Goddard方案 |
| 边界层方案 | QNSE-TKE 方案 |
| 气相化学方案 | CBM-Z方案 |
| 气溶胶方案 | MOSIAC 4档方案 |
| 光化学方案 | Fast-J方案 |
| 云化学方案 | 开启 |
| 气溶胶−云−辐射相互作用 | 开启 |
| 积云对流参数化方案 | New Grell 方案 |

**表 2 气溶胶 4 档分档方案**

**Table 2 Sectional approach for aerosols （4 bins)**

| | 第一档 | 第二档 | 第三档 | 第四档 |
|---|---|---|---|---|
| 最小直径/μm | 0.0390625 | 0.15625 | 0.625 | 2.5 |
| 最大直径/μm | 0.15625 | 0.625 | 2.5 | 10.0 |

WRF/Chem的一个主要改进是在模式中考虑了气溶胶的间接效应，即通过加入一个气溶胶活化模块来描述气溶胶生长为云滴的过程（Fast et al., 2006)，此方案以Koler理论为基础，当环境最大过饱和度大于某种气溶胶的临界过饱和度后粒子被活化，生长为云滴（Abdul-Razzak and Ghan, 2002)。Chapman et al. (2009) 在模式中增加了云滴数浓度的计算，使Lin单参数方案（Lin et al., 1983)变为双参数方案，在云滴数浓度的源汇项中增加了气溶胶的活化项，并且采用以云滴数浓度为阈值的云水到雨水自动转换参数化方案（Liu et al., 2005)，取代了原有的Kessler方案。模式采用了Fast-J的光化学方案，气溶胶对太阳短波辐射的影响采用Goddard的方案。

### 2.2 模式初始场与观测资料

模式背景气象场采用NCEP提供的FNL(Final Operational Global Analysis)再分析资料，时间分辨率为6小时，空间分辨率为1°×1°。人为排放源选用2006年David Streets制作的亚洲地区0.5°×0.5°的排

放清单（Streets et al., 2003; Zhang et al., 2009b），包含工业、电力、交通和住宅排放源（http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA_new/index_16.html[2012-03-08]）。污染物排放清单包括$SO_2$、BC、OC、CO、NOx、$NH_3$、$PM_{10}$、$PM_{2.5}$以及30种VOC。本文的模拟试验中将排放源插值到5 km分辨率的网格上，并假设排放源每小时以定常速率排放，不作更新处理。

北京市气象局在天津市武清气象观测站（39.4°N, 117.1°E）对2009年11月30日~12月1日的浓雾过程进行了地面观测，观测仪器包括三十五通道微波辐射计、Parsivel EF 能见度仪和自动气象站，能对浓雾发生过程中温湿度、液水含量、能见度、水汽等特征量进行实时监测。

另外，本文还利用了NOAA极轨卫星资料和气象信息综合分析系统（Micaps）提供的地面站观测资料，与模拟结果进行了对比分析。

### 2.3 数值模拟试验设计

为研究污染物对雾形成和发展的影响，我们利用WRF/Chem模式对2009年12月1日中国东部的一次浓雾过程进行数值模拟。模式水平分辨率为5 km，格点数200×200，包含中国东部部分地区以及华北京津冀的城市群地区，模拟区域如图1b所示。模式从地面到顶层（气压50 hPa）分为33层，为更好地模拟边界层结构，在近地面1000 m以下加密为14层。雾与土地利用和地形高度等静态地形数据有很大关系，试验选用WRF最高分辨率（约0.9 km）的地形数据。雾的发生与边界层湍流和辐射过程密切相关，本文通过一系列敏感性试验，选取了一个新的适用于稳定层结区域的湍流动能预报的QNSE边界层方案。模拟所选择的相关化学和微物理方案的选择如表1所示。

为研究化学过程和污染物对雾形成和发展的影响，本研究设计了一组敏感性数值模拟试验。试验包括三种情况（Cases）：

Case 1：不包含人为排放源；

Case 2：包含人为排放源；

Case 3：包含无$SO_2$、$NO_x$、$NH_3$的人为排放源。

模拟试验均从2009年11月29日的08:00（北京时，下同）开始，积分时间为54个小时，其中最初的24小时视为起转（spin-up）时间，目的是使模拟的化学和物理场调整到平衡态，减少初始条件不确定性的干扰，并且使气溶胶在整个模拟区域内均有合理的分布。起转（spin-up）期间的结果不用于分析。同时，采用FNL的资料运用于WRF的格点牛顿张驰逼近（nudging）四维同化过程，使气象场得到不断更新，减少因长时间积分所产生的系统偏差。

## 3 结果与讨论

### 3.1 雾发生的天气背景

本次浓雾天气持续时间从2009年11月30日20:00至12月1日12:00，在我国辽宁中部、吉林中南部、渤海部分海域、天津、河北南部、河南东部、山东、安徽、江苏中北部等地区均监测到浓雾天气。天津武清站能见度仪在00:00至11:00观测的能见度低于50 m，为强浓雾天气。12月1日08:00，500 hPa位势高度图上中高纬地区为两槽一脊环流形势，系统移动较慢，环流形势较为稳定。河套西部有小槽，京津地区受一弱脊控制。850 hPa高度场和温度场显示中国中东部受位于山西的高压脊和南方的高压共同影响，天气形势稳定。温度场显示位于河套西部的浅槽槽前有暖平流向华北地区输送，京津地区上空有弱的辐散气流受地面弱冷高压影响，处于地面均压场中，近地面层风速较小，为雾的形成提供了有利条件。

### 3.2 雾区分布和能见度

Case1和Case2模拟的近地层液态含水量空间分布与中国气象局基于NOAA极轨卫星数据发布的雾监测图像的对比如图1所示。雾本质是贴地的云，以模拟的雾水含量分布来表征雾区。从图1可以看出，加入了人为排放源后 (图1c)，模式可以模拟出天津地区、山东省大部分地区以及江苏安徽北部的主要雾区，其中山东省境内雾区的空心部分主要是由沂蒙山的地形造成。清洁背景下的雾强度很弱(低于0.1 g/kg) (图1b)，且雾区较小，呈不连续分布。Case1和Case2模拟雾区的风速很小，以微风为主，这有利于雾的维持。

根据武清站 Parsivel EF 能见度仪观测资料(图 2)，可以看出雾在夜间开始形成，从 12 月 1 日 00:00 开始能见度从 500 m 快速减小，至 01:00 已低于 50 m，强浓雾维持了近 9 小时，直到早晨 10 时能见度开始提高。水平能见度可以通过参数化公式计算得到，本研究选取 Kunkel（1984）提出的水平能见度经验公式计算模拟实验的能见度，计算公式如下：

$$V = -\ln(0.02)/(144.7L^{0.88}) \times 1000, \quad (1)$$

式中，$L$ 为液态含水量（单位：$g/m^3$）。根据公式 (1) 计算 Case1 和 Case2 所模拟的武清站能见度的结果（图 2），Case1 所模拟的雾强度较弱，最低能见度

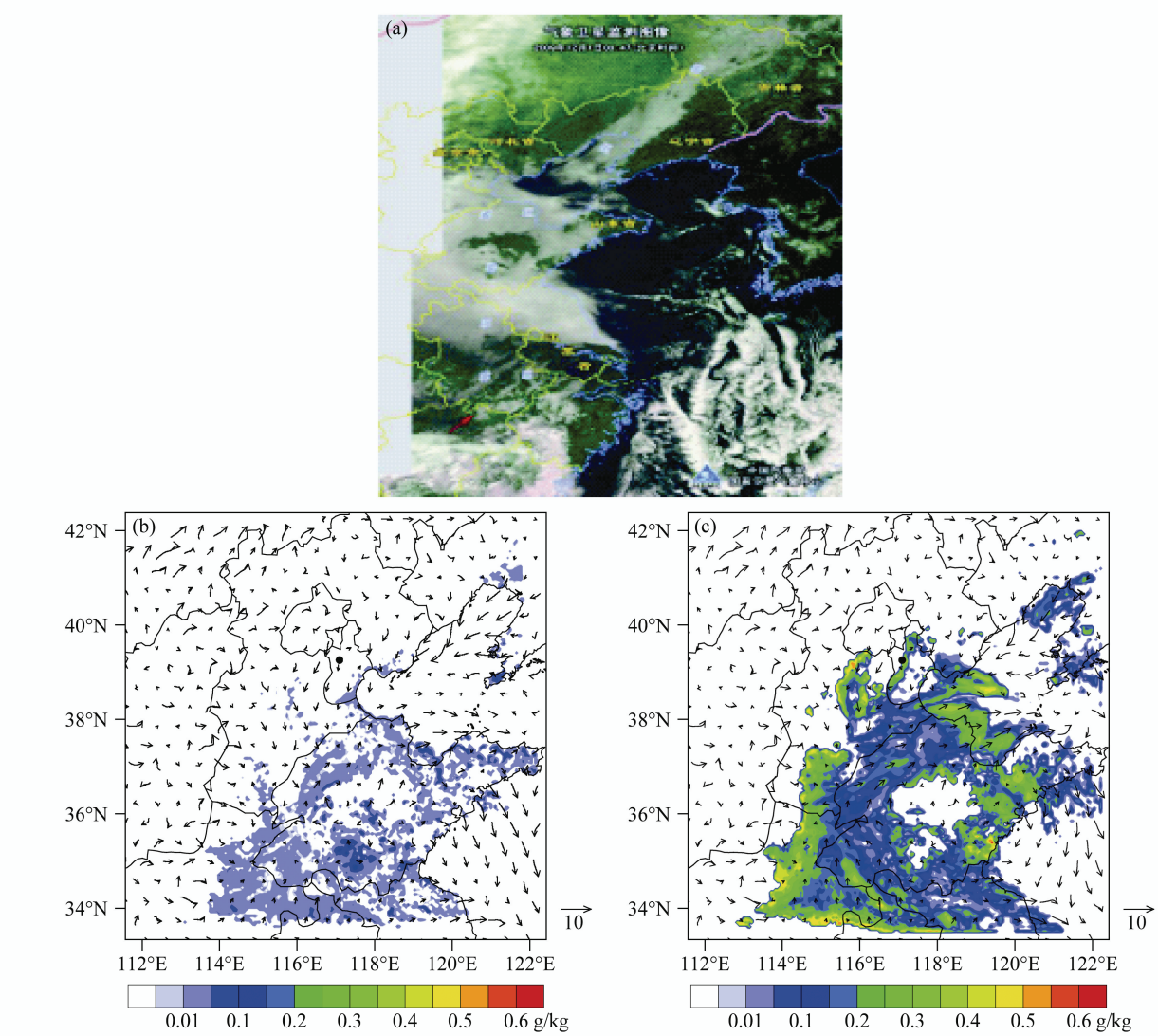


图1　（a）2009年12月1日08:47卫星监测雾区（NOAA-16，中国气象局国家卫星中心发布的雾区监测产品）；（b）Case 1和（c）Case 2模拟的2009年12月1日08: 00地面层雾中含水量（单位：g/kg）和地面风矢量场（单位：m/s）的水平分布。黑点代表天津武清观测站

Fig.1　(a) The satellite image of fog region at 0847 LST 1 Dec 2009 (NOAA-16); (b, c) the simulated liquid water content and wind vector (units: m/s) in the ground surface layer at 0800 LST 1 Dec 2009: (b) Case 1, (c) Case 2. The black dot represents Wuqing station, Tianjin

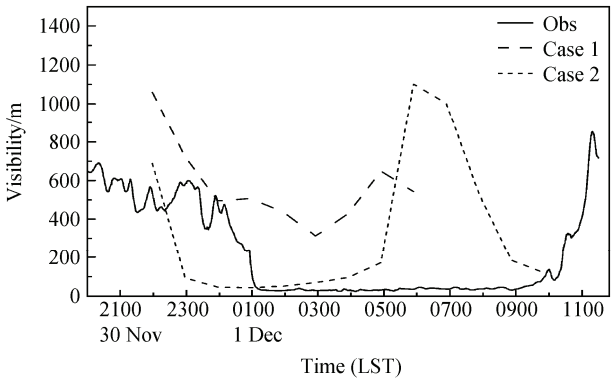


图 2　武清站观测的能见度（Obs）与Case1和Case2所模拟的能见度随时间的演变

Fig.2　Fog visibilities obtained from observation (Obs) and simulation Case 1 and Case 2

为 312 m，远高于实测值；Case2 所模拟的能见度与观测较为一致，模拟的强浓雾起始时间比观测略微提前。雾的模拟需要较高的垂直和水平分辨率，然而静态地面资料、气象场和化学资料的精度难以完全满足要求，加上模式中近似的物理过程参数化方案带来的不确定性，使得模拟结果与观测仍存在一定的差异（Gultepe et al., 2007）。此外，图 2 中模拟的格点资料为一个格点区域的平均值，而站点资料只是一个单点的数据；模拟格点的最低层高度为 15 m，而能见度仪的高度为 2 m 左右，由于这种空间的差异两种资料很难达到很好的一致性。

从图1和图2的对比可以看出，考虑污染排放源后，模式模拟的雾在区域分布和强度上与实测更为

接近，基本能够再现武清站的此次强浓雾过程。这表明污染气体、气溶胶以及反应生成的二次气溶胶参与了雾的形成和发展。

### 3.3 污染物对雾边界层结构的影响

图3给出了11月30日08：00至12月1日14:00多通道微波辐射计观测的以及Case1和Case2模拟的温

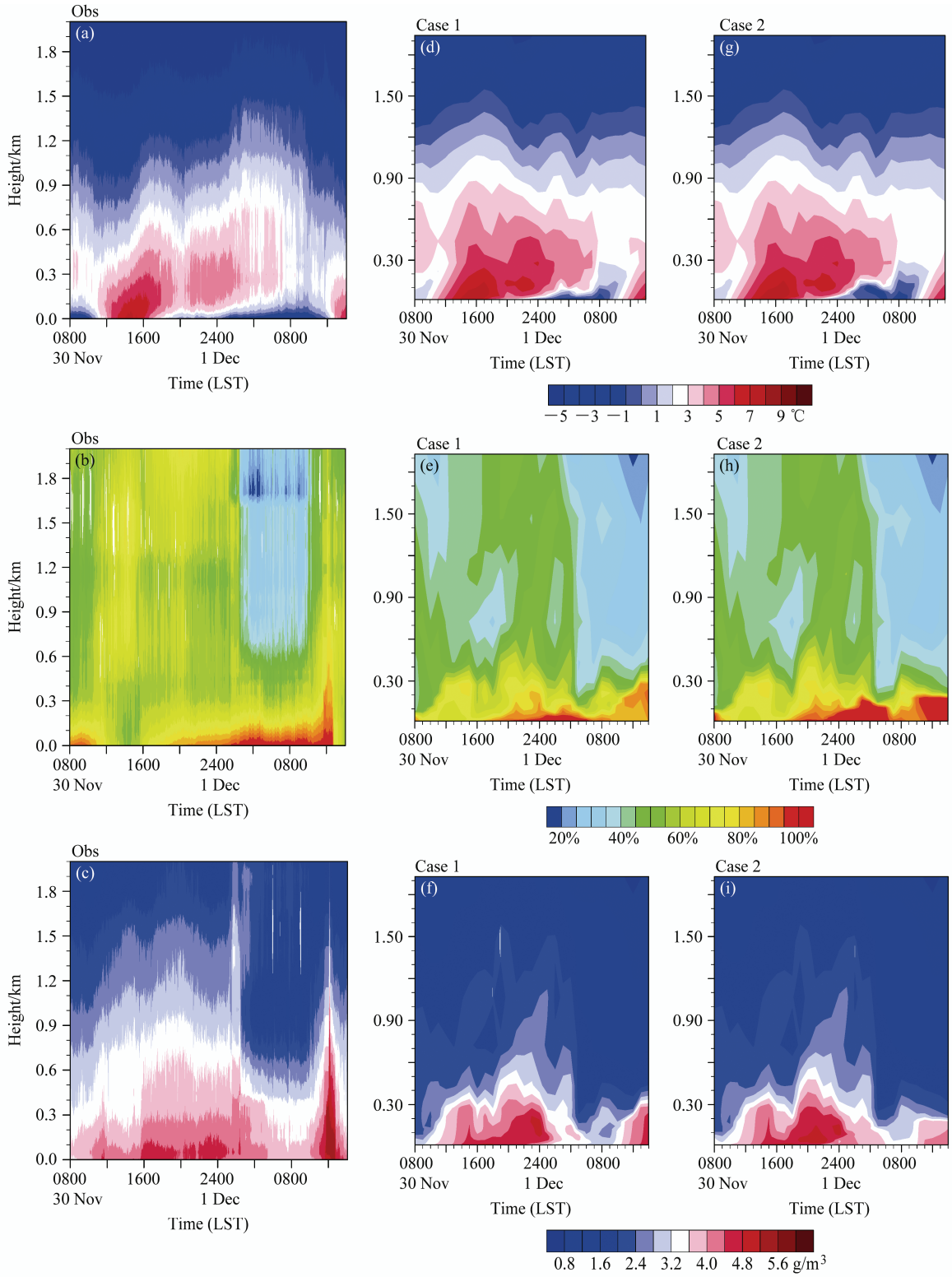


图 3 2009 年 11 月 30 日 08:00~12 月 1 日 14:00 武清站所模拟的（a、d、g）温度（单位：℃）、（b、e、h）相对湿度（%）、（c、f、i）水汽含量（单位：g/m$^3$）的高度—时间剖面图：（a–c）观测；（d–f）Case1；（g–i）Case2

Fig.3 Time–height cross sections of (a, d, g) temperature, (b, e, h) relative humidity, (c, f, i) water vapor content at Wuqing station from 0800 LST 30 Nov to 1400 LST 1 Dec 2009: (a–c) Observation from microwave radiometer; (d–f) Case 1; (g–i) Case 2

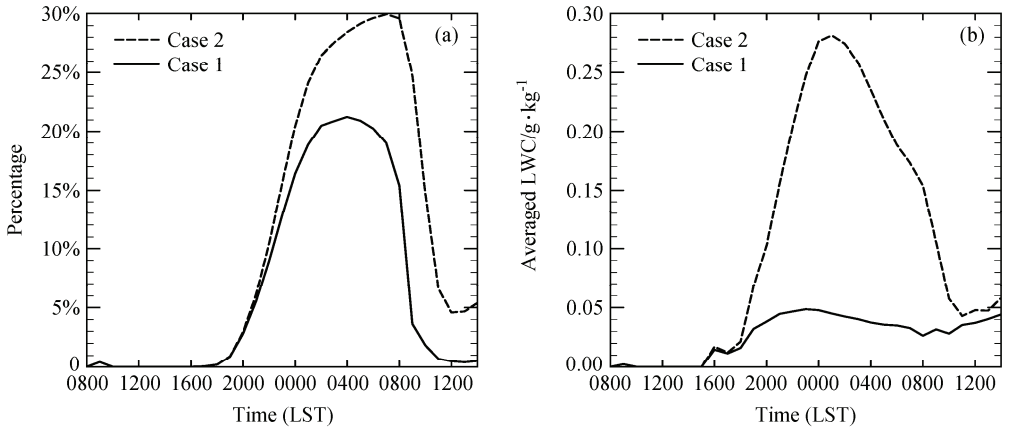


图 4　Case1 和 Case2 模拟的雾区（LWC＞0.001 g/kg）的面积占总模拟区域的比率（a）与平均含水量（b）随时间的变化

Fig.4　Time series of modeled (a) percentage of fog region (LWC＞0.001 g/kg) area and (b) averaged LWC over the domain for Case 1 and Case 2

度、相对湿度、水汽含量随高度和时间的变化。从图3a的观测可看出，逆温开始形成于雾发生前。起初逆温只发生在近地面层，随着雾的发展，逆温层厚度不断增大，在雾消散后迅速消失。两个Case均可以较好地模拟出温度、湿度的边界层演变特征，尤其是对近地层逆温和相对湿度值大于90%的分布，模拟的强度和持续时间与实测结果基本一致。

11月30日16:00起，近地层温度开始降低，相对湿度增大，大气水汽含量增多，且近地面逆温逐渐形成，有利于水汽的累积。但是从12月1日00:00到10:00期间，水汽大量凝结，雾增强转为强浓雾。水汽含量在近地层的模拟值与实测值在时间变化上比较一致，但模拟值偏低。总的来看，模式能较好地模拟出边界层温度、相对湿度和水汽含量的分布特征。

在雾逐渐形成之后，Case1和Case2的温度、相对湿度和水汽含量在近地层出现明显的差异：污染背景场比清洁背景场下的逆温层厚度大，且相对湿度大于80%的范围较大，高度较高，模拟的近地层的水汽含量也较大。污染背景场下所表现的这种边界层特征更有利于形成强浓雾。

### 3.4　污染物对雾宏观特性的影响

从图 1 可以看出污染物对雾的强度和范围有较大影响，为了定量研究这种影响，图 4 给出了两个 Case 下的雾区所占面积比率和平均含水量随时间的演变。污染背景下形成的雾区的整体范围更大，在雾较强的 00:00～10:00 尤其明显，最大可增加 50%。污染背景下形成的雾的强度也更大，最大平均含水量为清洁背景场下的 5 倍。清洁背景下，雾的强度较小且整个雾过程变化不大；污染背景下能够更好地模拟雾的强度变化。

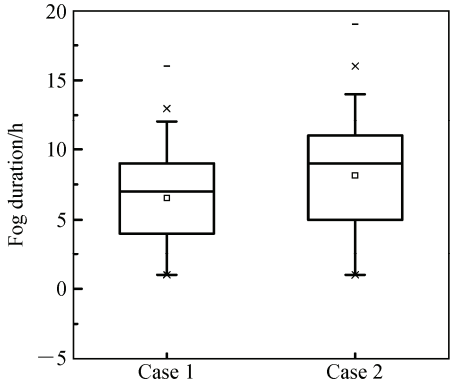


图 5　Case1 和 Case2 模拟的雾的持续时间在雾区内所有格点的统计图。小方块为平均值；盒子内为 25%～75%的值；上下旗标之内为 5%～95%的值

Fig.5　Box and whisker plots for simulated fog duration in Cases 1 and 2 over fog region. Mean values are represented as little boxes; boxes have lines at the values of 25%, 50%, and 75%, respectively; whiskers extend the values from 5% to 95%

由于雾区的范围是不断发生变化的，因此各个模拟点雾的持续时间有所差异。为了进一步研究污染物对于雾持续时间的影响，图 5 给出了两个 Case 下在雾区内所有格点的雾的持续时间。从整体持续时间的变化来看，雾的平均持续时间由 Case1 的 6.5 小时增长至 Case2 的约 8 小时，延长了 1.5 小时，且大部分格点的持续时间均有增加，增加趋势较为明显。

### 3.5　污染物对雾微物理特性的影响

图6是Case1和Case2下，WRF/Chem所模拟的雾区内单位格点的平均雾滴数浓度和过饱和度 $S$=0.1%的雾凝结核（FCN）数浓度。由于排放源的加入，大气中气溶胶增多，使污染背景下的FCN数

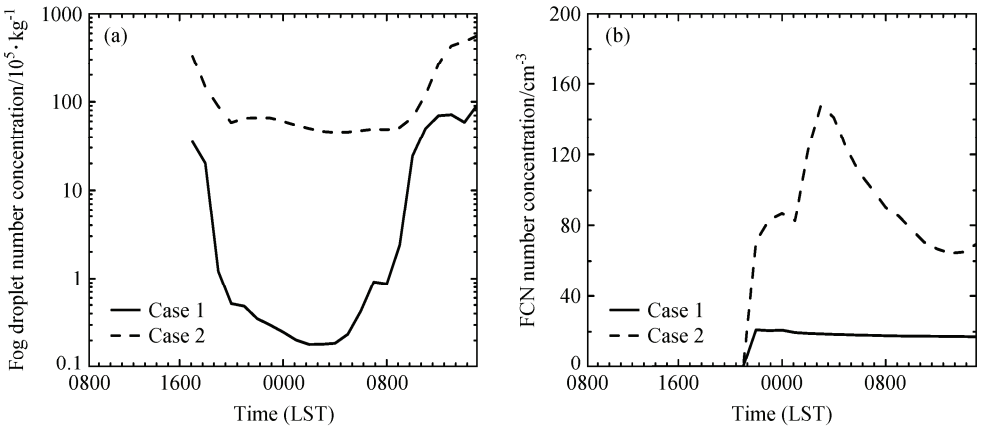


图6 Case1和Case2所模拟的雾区平均雾滴数浓度（a, 单位：$10^5$ kg$^{-1}$）和S=0.1%的FCN数浓度（b, 单位：cm$^{-3}$）随时间的演变

Fig.6 Time series of modeled spatially averaged (a) fog droplet number concentration and (b) fog condensation nuclei (FCN) number concentration at *S*=0.1% over the fog region for Case 1 and Case 2

浓度要比Case1高一个量级，达到150 cm$^{-3}$左右，而Case1的FCN为10 cm$^{-3}$左右。在污染背景下，有更多的FCN可以生成雾滴，图6中雾滴数浓度比清洁背景下高1到2个量级。两个模拟试验中，雾滴数浓度随时间变化表现出相同的特性，雾的初期和末期，区域小，雾水含量低，但单位格点平均雾滴数浓度较大；随着雾的增强格点平均雾滴数浓度减小，FCN增多。这种演变与Li（2011）对城市雾的观测结果比较一致，其指出雾较强时雾滴数浓度减少是由于雾滴的沉降所致。

污染排放源会显著影响所生成雾的微物理特性。污染背景下的FCN数浓度远高于清洁背景下的值，使雾滴数浓度增加，有利于雾的增强。同样，在污染严重的城市地区，云凝结核（CCN）的数浓度增加会导致云滴数浓度增加，进而增加云滴谱的稳定性，降低降水效率（Twomey and Warner, 1967）。

### 3.6 污染背景下雾增强的机理

以上模拟试验结果表明，污染物对雾的宏微观特性及边界层特征产生重要的影响。为探讨这种影响机理，选取两个试验中雾的范围均相对较大的 12 月 1 日 03:00，沿 116.3°E 对雾区做垂直剖面图,雾含水量、温度和相对湿度垂直结构如图 7 所示。

从雾的强度和雾顶高度来看（图 7a、b），Case2 的雾水平均含量和最大含量均明显高于 Case1 的值，其中最大雾水含量为 0.59 g/kg，大于 Case1 的 0.38 g/kg。Case2 的平均雾顶高度为 200 m 左右,高于 Case1 的 143 m，雾顶平均高度增加 25%。

逆温层主要位于雾的中上部，在雾顶处逆温强度最大，形成稳定的大气层结（图 7c、d）。但是，Case2 呈现出了较大的逆温强度，且逆温层的高度、冷中心的厚度和范围均大于 Case1。Case1 的逆温层顶主要位于 100～300 m 处，而 Case2 的逆温层顶位于 200～400 m 处; Case1 低于 0℃的冷中心的厚度低于 50 m，而 Case2 冷中心的厚度为 100 m 左右。这种结构与前期的研究结果基本一致（Zhou and Ferrier, 2008; 陆春松等, 2010)。

污染物浓度增大为何会导致雾的增强？以下我们从微物理、热力、辐射和动力特征探讨这一现象。

大气污染物和雾相互影响的主要媒介是气溶胶，气溶胶既可以影响云雾的辐射特性，也可以作为凝结核参与云滴的形成（Levin and Cotton, 2009)。图 8 所显示的雾区内的 $PM_{2.5}$ 含量较周围环境中明显减少（图 8a、b），一部分气溶胶粒子被雾水湿清除，另一部分气溶胶被活化参与了雾滴的形成过程。Case2 中气溶胶的质量浓度要比 Case1 的值高两个量级，即人为排放显著地增加了大气中的气溶胶含量，使得更多的气溶胶可以活化为 FCN。Hudson (1980) 的观测表明，雾中的过饱和度要低于云，最有效的过饱和度≤0.1%。Case2 在 *S*=0.1% 条件下的平均FCN数浓度比Case1的值同样大两个量级，最大 FCN 数浓度为 1865 cm$^{-3}$，而 Case1 的最大值为 27 cm$^{-3}$（图 8c 和 d)。Case2 的平均雾滴数浓度比 Case1 大 1～2 个量级，最大雾滴数浓度为 $17.67\times10^7$ kg$^{-1}$，而 Case1 的最大值为 $4.97\times10^7$ kg$^{-1}$（图 8e、f)。因此，在污染背景下，雾滴的形成消耗了大量的 FCN，凝结大量的水汽，形成更多

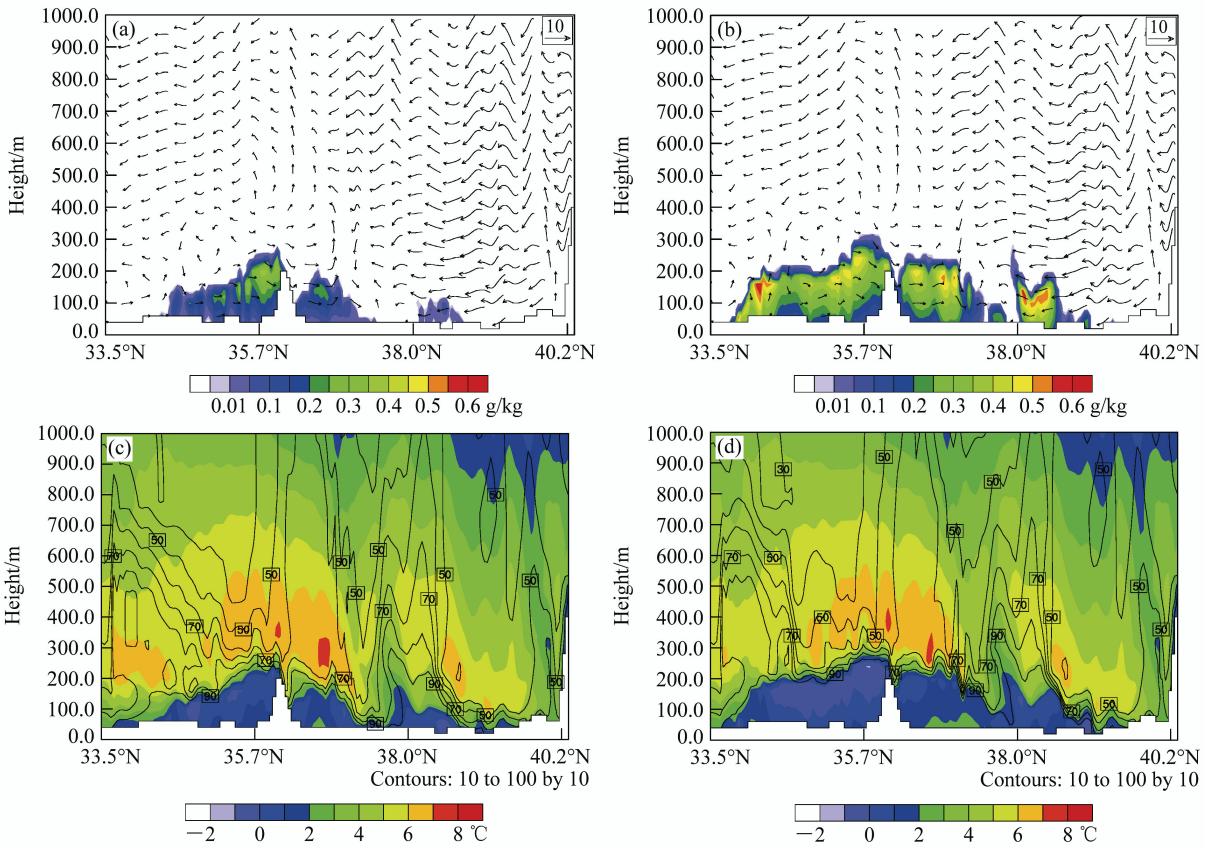


图 7　2009 年 12 月 1 日 03:00 (a、c) Case1 和 (b、d) Case2 模拟区域内沿 116.3°E 的垂直剖面图：(a、b) 液水含量（单位：g/kg）和风矢量场（垂直风速扩大 100 倍）；(c、d) 相对湿度 (%, 黑线) 和温度（阴影）

Fig.7 Vertical cross sections of modeled (a, b) LWC (g/kg) and wind vector (the vertical wind scaled by $10^2$), (c, d) RH (%, contour) and temperature (shading) along 116.3°E at 0300 LST 1 Dec 2009 in (a, c) Case 1 and (b, d) Case 2

雾滴，雾水含量较大。而在相对清洁背景下，FCN 的消耗较少，凝结水汽较少，雾滴数浓度较小，雾水含量较低。由于雾滴凝结过程对于 FCN 的消耗，使雾区内的 FCN 数浓度要小于周边环境中。在 Case1 的 35°N 和 Case2 的 38°N 处气溶胶数浓度较大的区域，形成了大量有效半径较小的雾滴，进一步证明了气溶胶和雾滴的依赖关系。此外，Case2 的雾滴数浓度较大，有效半径较小，减小了雾滴的重力沉降速度，延长了雾的持续时间（Müller et al., 2010)。

从长波辐射引起的温度变化率分布（图 9a、b，负值表示长波辐射降温，正值为长波辐射增温）可以看到，长波辐射引起的雾顶降温率最大，且 Case2 的平均长波辐射降温率远大于 Case1，最大长波辐射降温率分别为 13.9 k/h 和 7.69 k/h。这是由于 Case2 的雾水含量远高于 Case1 所致。而强的长波辐射降温进一步促进水汽在雾顶的凝结过程和雾水含量的增加，同时凝结过程释放的潜热有利于雾顶的抬升和扩展。因此，污染物增加对雾的发展是一个正反馈过程。另一方面，污染背景下雾顶出现的较大长波辐射降温率导致雾区边界层稳定度下降，雾区的湍流增强（周斌斌, 1987)，对比图 9c 和图 9d，可以看出污染物明显增大了雾区的湍流动能，最大单位质量动能由 $22.3\times10^{-2}$ J/kg 增大到 $37.5\times10^{-2}$ J/kg。雾形成后，湍流是雾顶不断抬高和迅速发展的重要因素（Zhou and Ferrier, 2008)。污染背景下，一方面，FCN 的增多有利于水汽的凝结释放潜热，另一方面，雾顶的长波辐射增温会降低雾区边界层的稳定度，两者均可促进湍流的发展，使雾顶升高，促进雾的发展。

大气中的硫酸盐和硝酸盐主要由 $SO_2$ 和 $NO_x$ 通过气相和云中的液相化学过程生成，其吸湿性特征使之成为参与气溶胶和云相互作用中主要的二次气溶胶（Andreae and Rosenfeld, 2008)。为研究人为污染排放产生的二次气溶胶对雾形成的影响，引入 Case3 试验。在试验中去掉人为排放源中硫酸盐

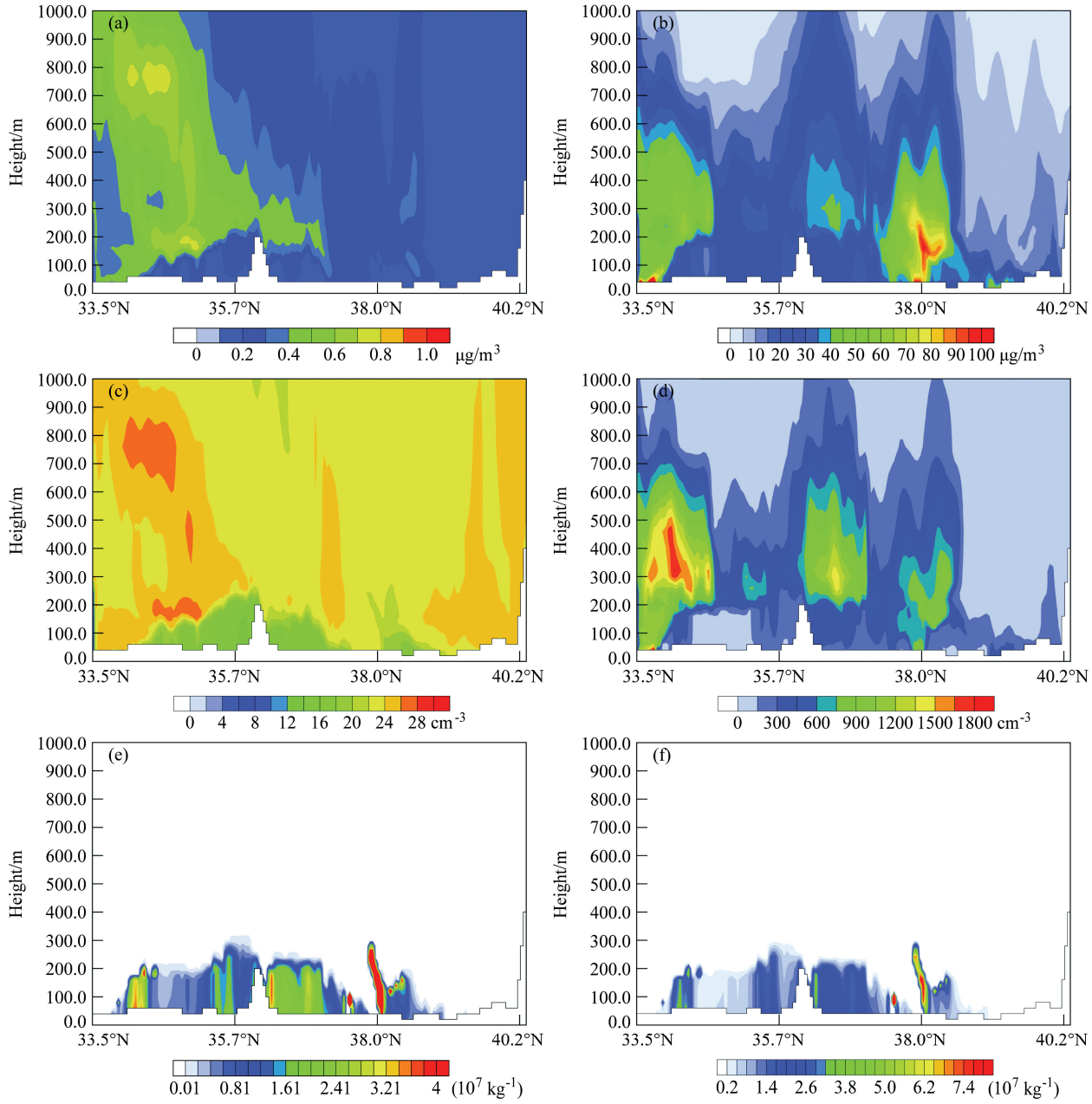


图 8 2009 年 12 月 1 日 03:00 (a、c、e) Case 1 和 (b、d、f) Case 2 模拟区域内沿 116.3°E 的垂直剖面图：(a、b) $PM_{2.5}$ 的质量浓度（单位：μg/m$^3$)；(c、d) $S$=0.1%的 FCN 数浓度（单位：cm$^{-3}$)；(e、f)雾滴数浓度（单位：$10^7$ kg$^{-1}$）

Fig.8 Vertical cross sections of modeled (a, b) $PM_{2.5}$ concentration, (c, d) FCN number concentration at $S$=0.1%, and (e, f) fog droplet number concentration along 116.3°E at 0300 LST 1 Dec 2009 in (a, c, e) Case 1 and (b, d, f) Case 2

和硝酸铵的前体物 $SO_2$、$NO_x$ 和 $NH_3$，使得大气中生成的硫酸盐和硝酸盐显著减少，Case3 和 Case2 的差异所引起雾的特性的变化如图 10 所示。

从图 10 可看到，Case3 的雾顶高度略低于 Case2，其中 37°N 处的雾顶降低较明显。Case3 模拟的雾水含量总体低于 Case2（图 10b），平均雾水含量值降低了 32.2%。由于各地排放源的差异，硫酸盐和硝酸盐占各地总 $PM_{2.5}$ 的比率不同，但 $PM_{2.5}$ 的总质量浓度均有约 30%～60%的减少（图 10c）。二次气溶胶的减少直接导致可以活化为雾滴的气溶胶减少，Case3 在 $S$=0.1%条件下的平均 FCN 数浓度比 Case2 的小了 60.3%（图 10d）。FCN 的改变趋势与 $PM_{2.5}$ 的改变趋势一致，但是由于硫酸盐和硝酸盐较多地参与了云化学过程，使其对 FCN 的影响较其对

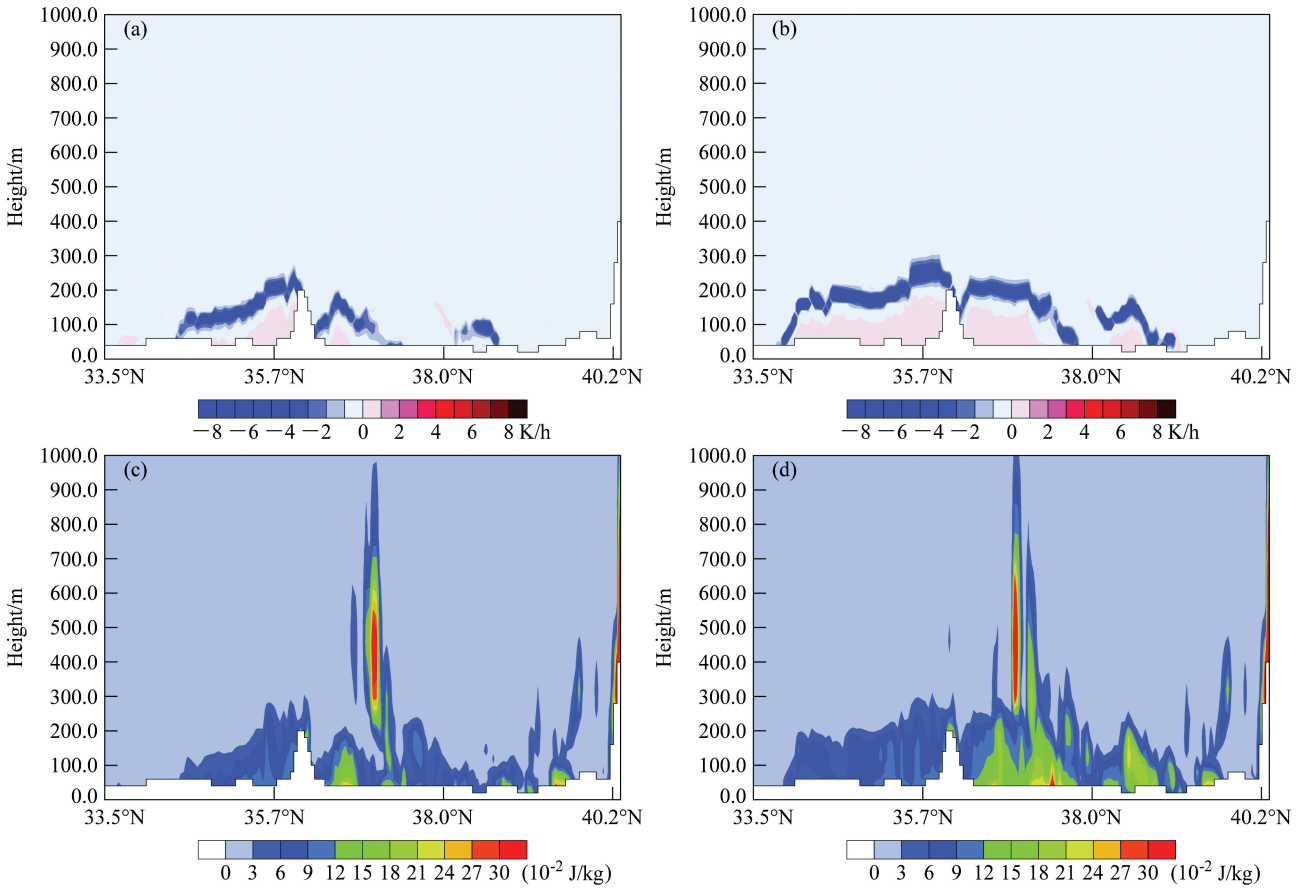


图 9　2009 年 12 月 1 日 03:00 (a、c) Case 1 和 (b、d) Case 2 模拟区域内沿 116.3°E 的垂直剖面图：(a、b) 长波辐射引起的温度变化率（单位：K/h)；(c、d) 单位质量湍流动能（单位：$10^{-2}$ J/kg）

Fig.9　Vertical cross sections of modeled (a, b) cooling rate due to long wave radiation and (c, d) turbulence kinetic energy along 116.3°E at 0300 LST 1 Dec in (a, c) Case 1 and (b, d) Case 2

$PM_{2.5}$ 总质量的影响更为显著。Case3 的平均雾滴数浓度也要小于 Case2，但是除了受 FCN 的影响，雾滴数浓度还受热力和动力的影响，因此，在图 10e 中有些地方表现为雾滴数浓度的增加。

总之，污染物的加入会显著改变背景气溶胶浓度，特别是吸湿性二次气溶胶的浓度，使得 FCN 显著增多，形成更多的雾滴。雾滴含量的增大会影响雾顶长波辐射效率，增强雾顶处的长波辐射降温率，可进一步促进水汽凝结，凝结潜热释放有利于雾顶抬升和扩展。另一方面，雾顶的强降温率使雾区边界层稳定度降低，雾区湍流运动增强，也进一步促进了水汽输送，雾顶抬升，增大雾的强度。由此可见，气溶胶的增多通过影响边界层的动力和热力场，对雾的发展起正反馈作用。

## 4　结论

本文基于 WRF/Chem 模式和雾的观测资料，研究了污染物对 2009 年 12 月 1 日我国华北和华东地区的一次浓雾过程产生和发展的影响，并对污染物的影响机理进行了分析，主要结论如下：

(1) WRF/Chem 加入人为排放源后，能够较清洁背景场更好地再现雾的空间分布和强度变化，模拟结果与实况基本一致，这说明污染物能显著影响雾的形成。

(2) 污染物能够影响雾的边界层结构。污染背景场下所模拟的近地面逆温层厚度、相对湿度大于 80%的区域和水汽含量均有扩大，污染背景场下的边界层结构更有利于形成强浓雾；污染物影响雾的范围、强度和持续时间：污染背景下形成的雾的强度更强、范围更大，平均持续时间增加 1.5 小时。

(3) 污染物会显著改变背景气溶胶浓度，使得 FCN 增多，形成更多的雾滴，有利于水汽的凝结。雾滴和水汽含量的增大会增强雾顶处的长波辐射降温率，进一步促进水汽凝结和潜热的释放。雾顶

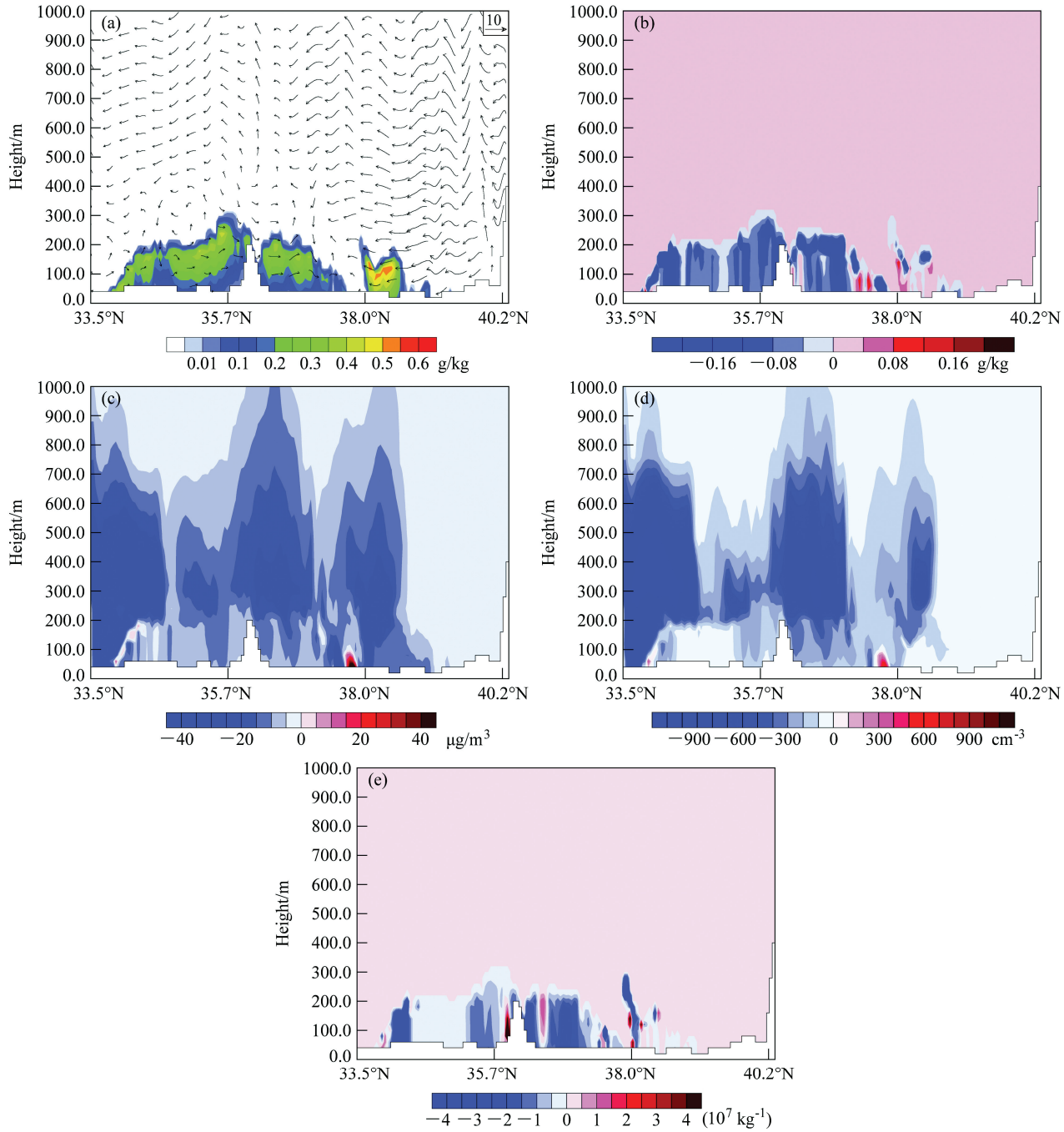


图 10 2009 年 12 月 1 日 03:00 (a) Case 3 和(b、c、d、e) Case3−Case2 在模拟区域内沿 116.3 °E 的垂直剖面图：(a、b) 液水含量 (单位：g/kg)；(c) $PM_{2.5}$ 的质量浓度 (单位：μg/m$^3$)；(d) $S$=0.1%的 FCN 数浓度 (单位：cm$^{-3}$)；(e) 雾滴数浓度 (单位：$10^7$ kg$^{-1}$)

Fig.10 Vertical cross sections of modeled (a, b) LWC, (c) $PM_{2.5}$ concentration, (d) FCN number concentration at $S$=0.1%, and (e) fog droplet number concentration along 116.3°E at 0300 LST 1 Dec 2009 for (a) Case 3 and (b, c, d, e) Case 3−Case 2

的强长波辐射降温率使雾区边界层大气稳定度降低，湍流运动增强，也进一步促进水汽输送，抬高雾顶，增大雾的强度。由此可见，气溶胶影响边界层的动力和热力场，对雾的发展起正反馈作用。

(4) 污染气体 $SO_2$、$NO_x$、$NH_3$ 的排放产生的二次气溶胶对雾的形成具有重要影响。不考虑这些污染气体排放时，$PM_{2.5}$ 的总质量浓度均有约 30%～60%的减少，平均雾水含量值可降低 32.2%。

尽管本文的数值模拟基本再现了雾的产生、发

展过程，在此基础上，探讨了污染物对雾的影响。但由于本次雾过程观测数据较少，加上数值模式本身存在一定的不确定性和局限性，有关两者的定量化比较不足，有关结论的是否具有普适性，需在将来的研究中进一步验证和完善。

**致谢** 中国科学院大气物理研究所云降水和强风暴试验室为本文提供超级计算机支持、北京市人工影响天气办公室提供观测数据以及陆春松博士和张莹博士为本文提供的帮助，特此致谢。

## 参考文献（References)

Abdul-Razzak H, Ghan S J. 2002. A parameterization of aerosol activation 3. Sectional representation [J]. J. Geophys. Res., 107 (D3): 4026, doi: 10.1029/2001JD000483.

Andreae M O, Rosenfeld D. 2008. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols [J]. Earth-Science Reviews, 89 (1–2): 13–41.

Bott A. 1991. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs [J]. Bound.-Layer Meteor., 56 (1–2): 1–31.

Chapman E G, Gustafson W I Jr, Easter R C, et al. 2009. Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9: 945–964.

Djen C S. 1992. The urban climate of Shanghai [J]. Atmos. Environ., 26 (1): 9–15.

Fast J D, Gustafson W I Jr, Easter R C, et al. 2006. Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model [J]. J. Geophys. Res., 111: D21305, doi: 10.1029/2005JD006721.

Geng F H, Zhao C S, Tang X, et al. 2007. Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: A case study [J]. Atmos. Environ., 41 (5): 989–1001.

Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. 2005. Fully coupled online chemistry within the WRF model [J]. Atmos. Environ., 39 (37): 6957–6975.

Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure Appl. Geophys., 2007, 164 (6–7): 1121–1159.

何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174–1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1174–1186.

Hudson J G. 1980. Relationship between fog condensation nuclei and fog microstructure [J]. J. Atmos. Sci., 37 (8): 1854–1867.

Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J. Climate Appl. Meteor., 23 (1): 34–41.

LaDochy S. 2005. The disappearance of dense fog in Los Angeles: Another urban impact? [J]. Physical Geography, 26 (3): 177–191.

Levin Z, Cotton W R. 2009. Aerosol Pollution Impact on Precipitation: A Scientific Review [M]. Heidelberg: Springer Verlag, 386pp.

Li P F, Li X, Yang C Y, et al. 2011. Fog water chemistry in Shanghai [J]. Atmos. Environ., 45 (24): 4034–4041.

李子华. 2001. 中国近 40 年来雾的研究 [J]. 气象学报, 59 (5): 616–624. Li Zihua. 2001. Studies of fog in China over the past 40 years [J]. Acta Meterologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 616–624.

Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22 (6): 1065–1092.

刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 2005. 我国大雾的气候特征及变化初步解释 [J]. 应用气象学报, 16 (2): 220–230. Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. 2005. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 16 (2): 220–230.

Liu Y G, Daum P H, McGraw R L. 2005. Size truncation effect, threshold behavior, and a new type of autoconversion parameterization [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L11811, doi: 10.1029/2005GL022636

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 Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. 2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 681–690.

Müller M D, Masboub M, Bott A. 2010. Three-dimensional fog forecasting in complex terrain [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 136 (653): 2189–2202.

Niu F, Li Z Q, Li C, et al. 2010a. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading [J]. J. Geophys. Res., 115: D00K20, doi: 10.1029/2009JD013484.

Niu S J, Lu C S, Yu H Y. et al. 2010b. Fog research in China: An overview [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (3): 639–662.

Ntelekos A A, Smith J A, Donner L, et al. 2009. The effects of aerosols on intense convective precipitation in the northeastern United States [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135 (643): 1367–1391.

Pagowski M, Gultepe I, King P. 2004. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. J. Appl. Meteor., 43 (1): 3–16.

石春娥, 姚克亚, 马力. 2001. 气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 485–492. Shi Chun'e, Yao Keli, Ma Li. 2001. Numerical studies of effects of aerosols on urban fog [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 485–492.

Shi C E, Roth M, Zhang H, et al. 2008. Impacts of urbanization on long-term fog variation in Anhui Province, China [J]. Atmos. Environ., 42 (36): 8484–8492.

Shi C E, Yang J, Qiu M Y, et al. 2010. Analysis of an extremely dense regional fog event in eastern China using a mesoscale model [J]. Atmos. Res., 95 (4): 428–440.

史月琴, 邓雪娇, 胡志晋, 等. 2006. 一次山地浓雾的三维数值研究[J]. 热带气象学报, 22 (4): 351–359. Shi Yueqin, Deng Xuejiao, Hu Zhijin, et al. 2006. Three-demensional numerical study on dense fog over

mountain area [J]. Jouranl of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (4): 351–359.

Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. J. Geophys. Res., 108 (D21): 8809, doi: 10.1029/2002JD003093.

Twomey S, Warner J. 1967. Comparison of measurements of cloud droplets and cloud nuclei [J]. J. Atmos. Sci., 24 (6): 702–703.

王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2005. 中国雾区的分布及其季节变化 [J]. 地理学报, 60 (4): 689–697. Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2005. The distribution and seasonal variations of fog in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 60 (4): 689–697.

王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2006. 气候变化对中国大雾的影响[J]. 地理学报, 61(5): 527–536. Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2006. Impact of climate warming on fog in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 61 (5): 527–536.

Zaveri R A, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. J. Geophys. Res., 104 (D23): 30387–30415.

Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, et al. 2008. Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC) [J]. J. Geophys. Res., 113: D13204.

张光智, 卞林根, 王继志, 等. 2005. 北京及周边地区雾形成的边界层特征 [J]. 中国科学 D 辑, 35 (SI): 73–83. Zhang Guangzhi, Bian Lin'gen, Wang Jizhi, et al. 2005. The boundary feather for fog formation in Beijing region [J]. Science in China (in Chinese), 35 (SI): 73–83.

Zhang Y, Liao H, Zhu K F, et al. 2009a. Role of black carbon-induced changes in snow albedo in predictions of temperature and precipitation during a snowstorm [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (4): 230–236.

Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009b. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9 (14): 5131–5153.

周斌斌. 1987. 辐射雾的数值模拟 [J]. 气象学报, 45 (1): 21–29. Zhou Binbin. 1987. The numerical modeling of radiation fog [J]. Acta Meterologica Sinica (in Chinese), 45 (1): 21–29.

Zhou B B, Ferrier B S. 2008. Asymptotic analysis of equilibrium in radiation fog [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47 (6): 1704–1722.