

气溶胶辐射效应在华东地区一次雾霾过程中的作用^{*1}

张悦^{1,2} 樊曙先^{1,2} 李皓^{2,3} 康博识^{2,3}

ZHANG Yue^{1,2} FAN Shuxian^{1,2} LI Hao^{2,3} KANG Boshi^{2,3}

1. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京, 210044
2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044
3. 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

1. *Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Department of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

3. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2015-12-21 收稿, 2016-03-12 改回.

张悦, 樊曙先, 李皓, 康博识. 2016. 气溶胶辐射效应在华东地区一次雾霾过程中的作用. 气象学报, 74(3):465-478

Zhang Yue, Fan Shuxian, Li Hao, Kang Boshi. 2016. Effects of aerosol radiative feedback during a severe smog process over eastern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(3):465-478

Abstract The effects of aerosol-radiation feedback on meteorology and air quality over eastern China during a severe smog event in December 2013 are simulated using the fully coupled online Weather Research and Forecasting/Chemistry model. Three simulation scenarios that include different aerosol configurations are applied to distinguish aerosol radiative effects. Results of these experiments indicate that the simulated shortwave radiation at the surface, 2 m temperature and planetary boundary layer (PBL) height all reduce over the polluted areas during the smog event due to direct, semi-direct, and indirect radiation effects of aerosols. A lower PBL height is unfavorable for the dispersion of water vapor and pollutants, which makes the fog structure more stable and deteriorates the smog event. Furthermore, the aerosol radiation effects (direct, semi-direct and indirect effect) prolong the duration of the smog event and the pollutants can reach higher levels. Looking at the chemical species, it is found that the aerosol direct and semi-direct radiation effects lead to increases in PM_{2.5} concentration, extinction coefficients, NO_x concentration and decreases in O₃ concentration; meanwhile, the aerosol indirect radiation effect further increases PM_{2.5} concentrations and extinction coefficient but decreases NO_x and O₃ concentration. In general, the aerosol radiative effects deteriorate the air pollution event by promoting the development of smog.

Key words Eastern China, Smog, Aerosol, Radiative effect

摘要 利用 WRF/Chem(Weather Research and Forecasting Model coupled with Chemistry)模拟了 2013 年 12 月华东地区一次雾、霾事件气溶胶辐射反馈效应对气象场和大气质量的影响。通过 3 个不同气溶胶浓度设置的试验区区分气溶胶浓度不同辐射效应的影响。比较不同试验得出,本次雾、霾过程中,不论是气溶胶直接、半直接辐射效应还是间接效应均使污染地区短波辐射减少、2 m 气温下降、大气边界层高度降低,不利于水汽与污染物的扩散,空气污染进一步加重,雾结构进一步稳定,并使雾的持续时间延长,发展高度更高;对于化学场来说,气溶胶直接、半直接辐射效应使污染地区 PM_{2.5} 浓度增大、消光系数增

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41275151 和 41375138)。

作者简介:张悦,主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail:20131202126@nuist.edu.cn

通讯作者:樊曙先,主要从事大气化学研究。E-mail:shuxianf@nuist.edu.cn

大、氮氧化物浓度增大,臭氧浓度降低;间接辐射效应使 $PM_{2.5}$ 浓度和消光系数进一步增大,氮氧化物、臭氧浓度降低。综上所述,气溶胶辐射效应能使大气污染加重,并利于雾的发生、发展。

关键词 华东地区,雾、霾,气溶胶,辐射效应

中图法分类号 P422 P426.4 P427.1⁺22

1 引言

随着经济的迅速发展,城市化和工业化的提高,颗粒物以及污染气体排放量增大。众所周知,大气气溶胶是影响地-气系统辐射平衡的一个重要因素,它们吸收和散射太阳辐射,为气溶胶的直接效应(Hansen, et al, 1997);它们也能够作为云凝结核或冰核,为气溶胶的间接效应(Rosenfield, et al, 2008);云中或者云下具有吸收作用的气溶胶加热空气,导致云体蒸发,是气溶胶的半直接效应(Charlson, et al, 1969)。毛节泰等(2005)通过一个简化的辐射平衡模式,分析了气溶胶直接辐射强迫与其辐射特性以及与地面反射率的关系。张立盛等(2002)研究了相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响。张华等(2009)计算了晴空条件下,冬、夏两季沙尘气溶胶的直接辐射强迫在对流层顶和地面的全球分布,并讨论了云对沙尘气溶胶辐射强迫的影响。Zhang 等(2010)使用 WRF/Chem (Weather Research and Forecasting Model couple with Chemistry)模式对气溶胶-云反馈效应进行了模拟,并且讨论了反馈效应对气温、 NO_2 光解速率、行星边界层(PBL)高度和云凝结核(CCN)等的影响。廖礼等(2015)使用 WRF/Chem 模式研究了中国东部地区气溶胶及其部分组分(硫酸盐、硝酸盐和黑碳气溶胶)在天气尺度下的辐射强迫和对地面气温的影响。Zhang 等(2015)利用 WRF/Chem 模式研究了气溶胶污染及气溶胶辐射效应对中国东部冬季气象场和化学场的影响。Jacobson 等(2007)使用全球城市模式 GATOR-GCMOM 对洛杉矶盆地进行模拟,发现气溶胶粒子及其前体气体使得总的向下地表净太阳辐射强度减少,相应的地表温度以及风速下降,而气溶胶光学厚度、云光学厚度、相对湿度以及云中液水含量增大。Park 等(2010)利用三维全球化学传输模式 GEOS-Chem 计算了东亚地区棕碳气溶胶的辐射强迫效应,发现棕碳气溶胶使地面和大气层顶的平均辐照度分别减少了 0.43 和 0.05 W/m^2 。Forkel 等(2012)利用 WRF/Chem 模式研究了气溶

胶直接效应和间接效应对欧洲气象场和化学场的影响,发现半直接效应对地表辐射作用在 $\pm 50 W/m^2$, 当考虑气溶胶间接效应时,欧洲大陆多数地区的月平均 PM_{10} 浓度增大 1—3 $\mu g/m^3$ 。

随着华东地区的各种污染物(污染气体、颗粒物等)排放量迅速增大,典型的区域性雾、灰霾天气明显增多(Niu, et al, 2010)。雾和霾是形成机制不同的能够造成能见度恶化的天气现象,吴兑(2008)研究表明大气中直径 0.1 μm 以下的水溶性粒子主要是由硫酸铵等组成的,大于 0.1 μm 的粒子主要是由氯化钠等组成的,这些物质的相对湿度大约在 80%。因此将相对湿度小于 80% 时低能见度现象认定为霾,相对湿度大于 90% 时的低能见度现象认定为雾,相对湿度介于 80%—90% 时的低能见度现象认定为霾、雾共存(Haze and Fog)。随着空气环境的恶化,雾、霾天气不仅造成低能见度影响社会经济发展(生产、交通运输等),由于其复杂的化学组成(重金属盐、高浓度离子、有机物等)还严重危害人们的身体健康和生态环境。污染天气(雾、霾和雾霾共存)气溶胶粒子的化学成分与气溶胶粒子的辐射气候效应以及气、固、液三相之间的化学反应紧密相关(Zhang, et al, 2012)。2013 年 12 月,中国 100 多座城市遭遇雾、霾天气,覆盖了华北、华东地区,稳定逆温层结构利于污染物的积累以及雾、霾的形成和发展(郭丽君等, 2015)。 $PM_{2.5}$ 为首要污染物,南京地区 $PM_{2.5}$ 指数达到 300 持续超过 36 h,能见度较低,其中 7、8、9 日最严重,最低能见度小于 50 m。因此,利用在线大气化学模式 WRF/Chem 对长江三角洲地区气溶胶辐射效应进行数值模拟试验,借此认识气溶胶辐射效应对长江三角洲区域雾、霾宏、微观物理过程的影响。

2 观测资料与模式设置

南京雾、霾外场综合观测试验观测地点位于南京信息工程大学观测场(32.13°N, 118.77°E),观测使用了能见度传感器、雾滴谱仪、气溶胶粒径谱仪、多通道微波辐射计、激光雨滴谱仪等,其详细介绍见

文献(张舒婷等,2013)。

模拟气溶胶直接、半直接、间接辐射效应需要在气象场和化学场的基础上耦合气溶胶的物理化学过程。WRF/Chem模式能够同时模拟气象和化学过程。采用Morrison微物理方案,能很好地耦合化学模块模拟出雾滴数;选择RRTM长波辐射方案、Goddard短波辐射方案、Noah陆面过程方案;适合稳定层结天气的QNSE近地面层/边界层方案;Grell 3D集合积云对流参数化方案。化学方案采用RADM2方案和包含液相反应的MADE/SORGAM气溶胶方案,开启预测云滴数,使Morrison方案变为双参数方案。

模式初始场和边界场数据采用NCEP 6 h间隔的再分析资料,分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。化学场的侧边界条件是WRF/Chem中的缺省值(McKee, et al, 2003)。人为排放源是由清华大学提供的东亚地区2012年排放源(一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、挥发性有机化合物(VOCs)、氨(NH_3)、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、黑碳(BC)、有机碳(OC)、二氧化碳(CO_2))月均值,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。此清单包括电力、工业、交通、居民等四大类人为排放源。模式的生物排放源是通过基于土地利用类型的MEGAN(Model of Emission of Gases and Aerosol from Nature)在线计算(Guenther, et al, 2006)。

对2013年12月7—9日在华东地区的重雾、霾过程进行数值模拟,使用双层嵌套网格,中心为(32°N , 118°E),D01、D02的水平分辨率分别为27

和9 km,格点数分别为 110×90 、 148×112 ,垂直方向加密为35层。模拟积分为2013年12月6日00时—9日12时(北京时,下同),每10 min输出一次结果,模拟区域如图1。

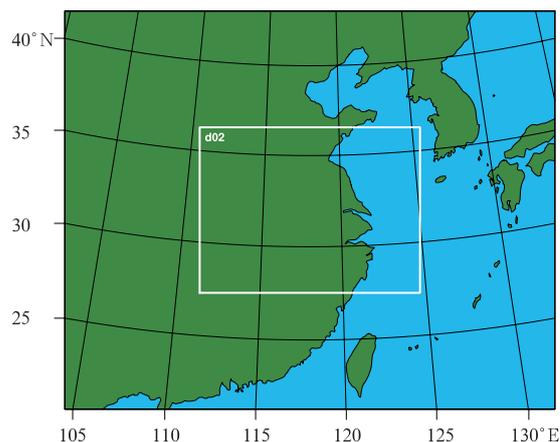


图1 模拟区域

Fig. 1 The model domain

为讨论气溶胶辐射效应对研究区域物理场和化学场的影响,共进行了3组试验(表1),采用相同的物理参数。第1组为参照试验,考虑气溶胶总辐射效应(气溶胶直接、半直接以及间接辐射效应)。第2、3组为敏感性试验,第2组试验去除了气溶胶的液相反应,并关闭了湿清除和云化学机制。第3组试验又进一步关闭了气溶胶反馈机制。参照试验与第3组试验的模拟结果之差作为气溶胶总辐射效应的影响,第2组试验与第3组试验模拟结果之差作

表1 试验模拟参数设置
Table 1 Parameters used in the simulations

	第1组试验	第2组试验	第3组试验
化学方案	RADM2 MADE/SORGAM 包含一些液相反应	RADM2 MADE/SORGAM	RADM2 MADE/SORGAM
气溶胶反馈机制	开启	开启	关闭
湿清除机制	开启	关闭	关闭
云化学机制	开启	关闭	关闭

为气溶胶直接效应和半直接效应的影响。

3 模拟评估

3.1 模拟区域气象条件的检验

为减少模式初始场不确定性的干扰,选用模式平衡1 d之后的结果进行检验分析。表2从南京站、上海站、合肥站和杭州站气温、湿度以及风速的

模拟值和观测值的统计分析(表2)可知,地表气温和湿度模拟值和观测值的相关系数都在0.79—0.92,模拟效果较好,归一化平均偏差在7.9%—14.5%。10 m高度平均风速的观测值和模拟值的相关系数在0.61—0.81,低于气温和湿度的模拟,南京、合肥和上海3站模拟值低于观测值,杭州站则是模拟值高于观测值。

表2 南京站、合肥站、上海站和杭州站气象要素的模拟值和观测值的统计分析
Table 1 Statistical analysis of the simulated and observed meteorological elements at Nanjing, Hefei, Shanghai and Hangzhou stations

		观测的 平均值	模拟的 平均值	模拟和观测值 的相关系数	平均 偏差	归一化 平均偏差
气温	南京	6.7°C	7.5°C	0.92	0.8	11.9%
	合肥	4.8°C	5.5°C	0.87	0.7	14.6%
	上海	8.8°C	9.9°C	0.84	1.1	12.5%
	杭州	9.6°C	11.0°C	0.81	1.4	14.5%
湿度	南京	78.6%	85.4%	0.84	6.8	8.7%
	合肥	67.6%	75.1%	0.83	7.5	11.0%
	上海	75.8%	81.8%	0.82	6.0	7.9%
	杭州	60.7%	66.8%	0.79	6.1	10.0%
风速	南京	2.1 m/s	1.1 m/s	0.81	-0.95	-45.2%
	合肥	3.1 m/s	1.8 m/s	0.72	-1.3	-41.9%
	上海	2.7 m/s	1.8 m/s	0.75	-0.9	-33.3%
	杭州	2.2 m/s	3.4 m/s	0.61	1.2	54.5%

3.2 单站气象要素检验

图2、3为雾、霾过程期间,南京地区气象要素模

拟结果(气温、相对湿度、风速和风向)与其相应的观测值对比的检验情况。

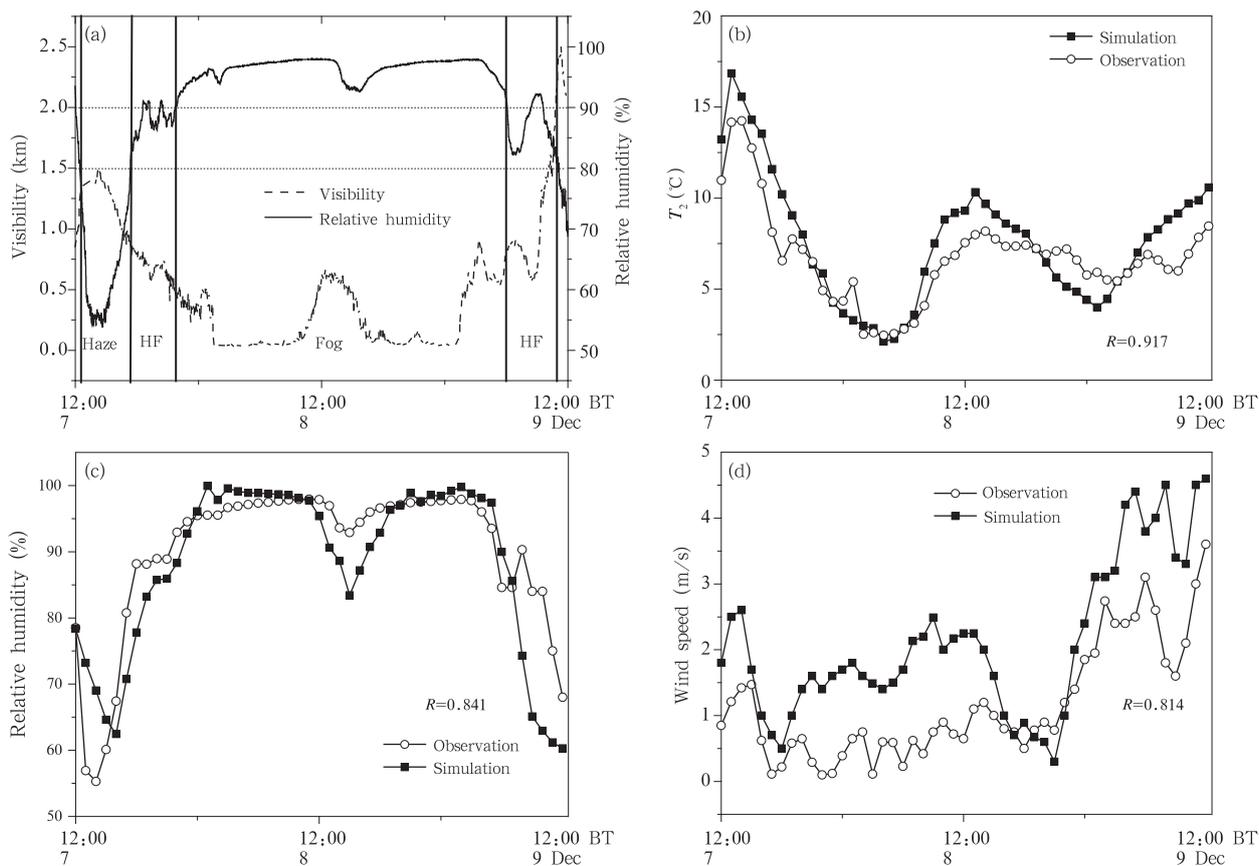


图2 南京地区能见度、相对湿度的变化(a)以及模拟2 m气温(b)、相对湿度(c)、风速(d)与观测数据的对比
Fig. 2 The variation of visibility and relative humidity at Nanjing (a) and comparisons of 2 m temperature (b), relative humidity (c) and wind speed (d) between simulations and observations

图 2a 为模拟时段能见度和相对湿度的变化,对辐射效应的分析时段为雾霾过程(12月7日12时20分—9日11时40分),并分为霾—雾霾共存—雾—雾霾共存4个阶段。从图 2b 可以看出,对雾、霾过程的 2 m 高度气温(T)的模拟结果和实测数据基本一致,模拟出了气温的日变化基本特征,变化趋势较为吻合,两者相关系数(R)为 0.917。整体而言,夜间地面气温与观测值比较接近,模拟的气温略低于观测气温。而白天模拟过高预测了气温,特别是对日最高气温(14 时前后),是造成此时段相对湿度模拟值低于观测值的原因之一(图 2c)。对于相对湿度的模拟,观测和模拟的起伏较为同步,两者相关系数为 0.841。雾的前后,雾、霾共存阶段相对湿

度的模拟小于观测。

地面 10 m 高度风速(W_{10})模拟结果(图 2d)与观测值的变化趋势基本一致。观测的风速逐时波动性较强,模拟的 W_{10} 整体比实测值偏大,是造成雾后相对湿度下降速度大于观测的原因之一。在雾的形成、发展和成熟阶段均表现出较小的风速,低于 2.5 m/s,为雾的发展和维持提供有利条件。

图 3 是南京地区模拟和观测的风向对比,模拟风向和观测风向的风玫瑰图分布较为一致,主导风向均为东南东,模拟风向分布较观测风向分布更为集中,偏北风发生的频率较高,最大风速大于 5.5 m/s,而观测风向中东风出现的频率明显大于偏北风,最大风速小于 4 m/s。

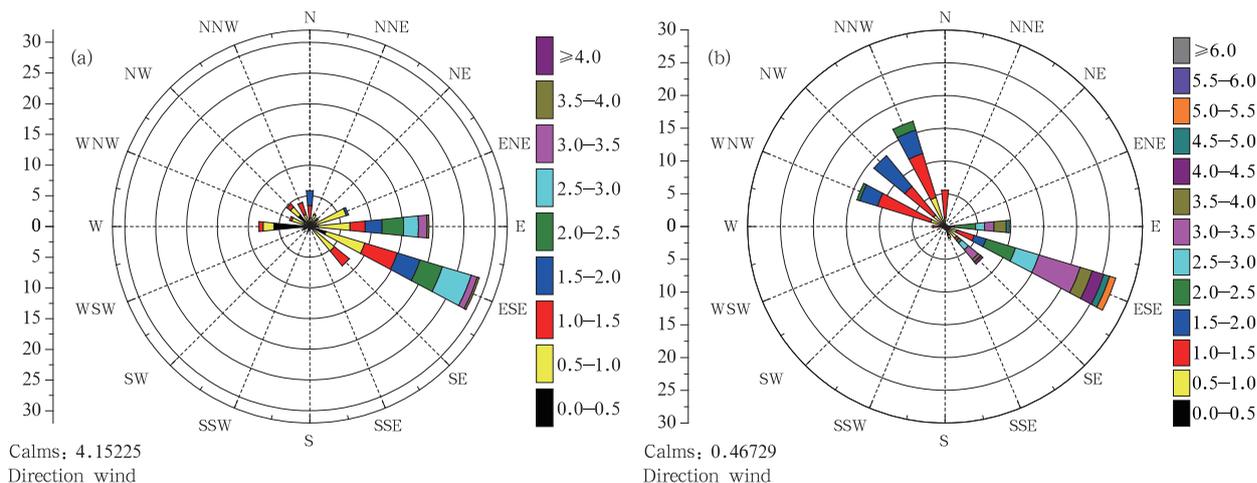


图 3 南京地区观测风向(a)和模拟风向(b)的对比

Fig. 3 Comparison of wind direction between observations (a) and simulations (b) in Nanjing

3.3 单站气溶胶和污染气体检验

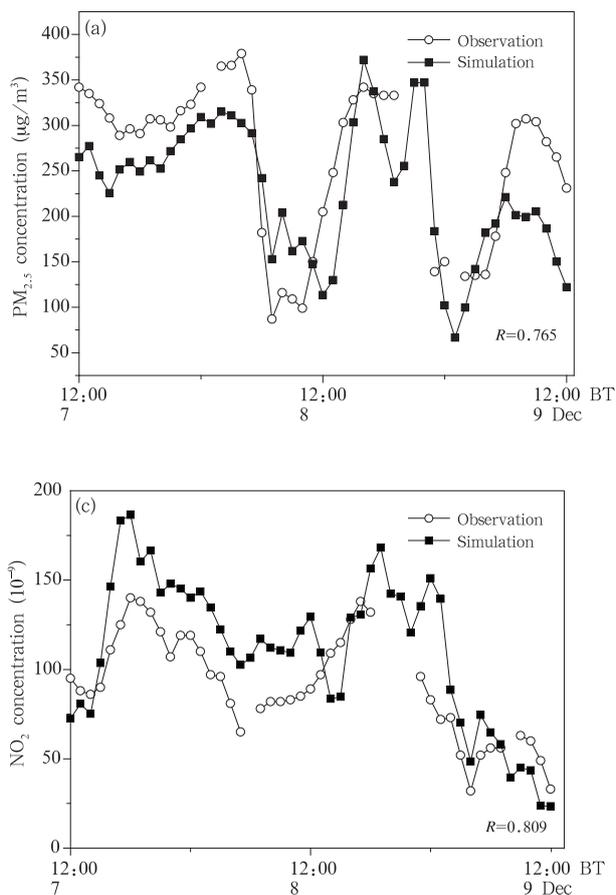
图 4 为南京地区 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 模拟与观测的比较,观测值有部分缺失。对于主要由人为源产生的细粒子,模拟的浓度略低于观测,这不仅与模式中人为源的处理有关,也与气象条件的模拟相关。 $PM_{2.5}$ 浓度的模拟结果与观测数据在变化趋势上具有较好的一致性,相关系数为 0.765。模拟和观测细颗粒物地表浓度峰值,均大于 $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$,达到重度污染的等级,当 $PM_{2.5}$ 浓度高于 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,易造成小于 10 km 的低能见度,并且无机气溶胶主要成分为硝酸盐和硫酸盐,对消光的贡献在 40%—50%(高怡等,2014)。在雾过程中,即使相对湿度很高,气溶胶不断活化为雾滴,并发生湿清除过程,但

是气溶胶浓度依然很高。

从图 4b 看,雾发生前臭氧最高浓度超过 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$,在雾的后期也超过 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$,这两次雾、霾共存过程阶段是高臭氧-高气溶胶的双高污染。观测臭氧有较高的波动性,观测和模拟的臭氧浓度峰值位置以及峰的范围具有一致性,相关系数为 0.739。臭氧最高浓度的出现往往和阳光强度有关,观测和模拟的峰值均出现在 14 时前后,与气温类似。

二氧化氮浓度的模拟(图 4c)高于观测,并且模拟的波动性较强,这是由于二氧化氮排放源的不确定性比较大。观测和模拟二氧化氮浓度的相关系数为 0.809,由于光化学反应的消耗作用,二氧化氮浓

度在没有太阳辐射的夜间不断积累达到峰值,与本次观测和模拟的起伏略有不同,这可能与雾的发生、发展密切相关,雾层影响了二氧化氮的光解速率。二氧化氮浓度最高出现在雾前的雾、霾共存过程,高于 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$,雾过程近地面层结稳定是其积累的



主要原因。WRF/Chem 较为准确地模拟出了气象要素(T 、 W_{10} 等)、 $\text{PM}_{2.5}$ 以及污染气体(NO_2 和 O_3)随时间的变化趋势,因此,利用 WRF/Chem 研究气溶胶辐射反馈效应是可信的。

图4 南京地区 $\text{PM}_{2.5}$ (a)、 O_3 (b)和 NO_2 (c) 观测与模拟结果的对比

Fig. 4 Comparison of $\text{PM}_{2.5}$ (a), O_3 (b) and NO_2 (c) between simulations and observations at Nanjing

4 结果分析

4.1 气溶胶辐射效应对气象要素的影响

4.1.1 对模拟区域地面气象要素的影响

搭载在 Terra 和 Aqua 卫星平台上的 MODIS 传感器是图谱合一的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 $0.4\text{--}14 \mu\text{m}$ 的电磁波谱范围内。使用 MODIS 1B 数据进行辐射定标、资料矫正和地理定位与投影,通过将主要的下垫面与云雾及雪分离,将雪与云雾分离,将温度较低的中高云与低层云和雾分离,将雾从低云中分离几个步骤(陈林等, 2006),得到 12 月 8 日 10 时 20 分的地面雾区分布(图 5a),雾区为阴影,图 5b 为雾、霾过程模拟区域(第 2 层嵌套区域)地面 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分布情况。由图 5

可知雾区与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区较为一致。

对地表接收的太阳短波辐射而言,气溶胶直接效应产生负强迫效应,而图 6a 中,海面上的一些区域地表接收太阳辐射增大,这是气溶胶半直接效应造成海面云体蒸发引起的。图 6b 讨论总辐射效应,即又考虑了气溶胶间接辐射效应,加入了由于核化而增加的液滴一项,发现短波辐射在雾、霾区域的减弱不明显,但是间接效应使得洋面上短波辐射明显减少,主要是因为低气溶胶数浓度,云滴数增长缓慢,粒径增大,利于云的维持和生成。雾、霾发生区域多为气溶胶浓度高值区,人为气溶胶的增加会导致颗粒尺度的减小,从而导致云反照率的增大,并且由于雾层的影响,到达地面短波辐射较少,对其影响从数值上来看也较小。

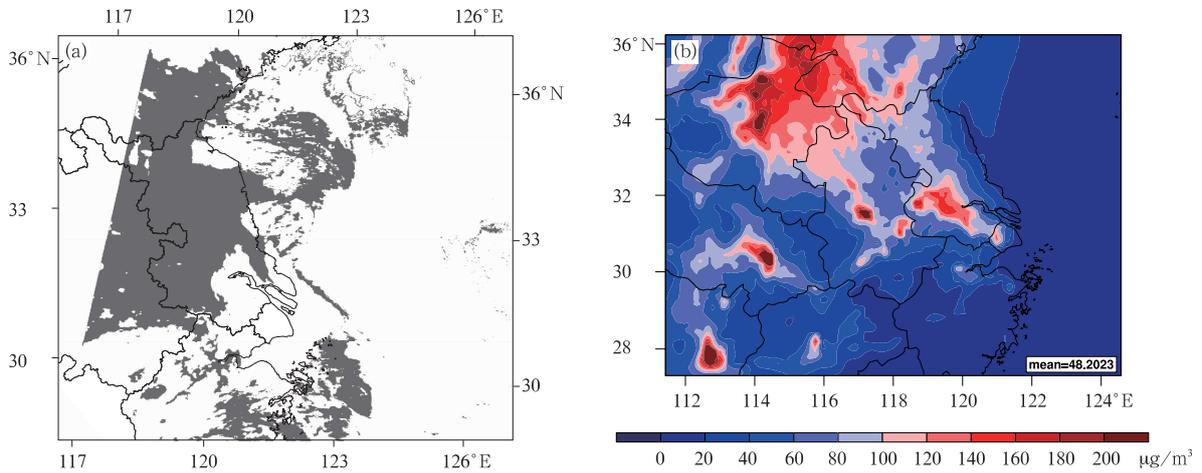


图5 12月8日10时雾区分布(a)与雾霾过程 $PM_{2.5}$ 平均浓度分布(b)
 Fig. 5 The smog area at 10:00 BT 8 December (a) and the averaged $PM_{2.5}$ concentration distribution during the smog event (b)

太阳辐射是地球热力的直接来源,气温、风速、边界层高度等均受其影响,因此气溶胶的辐射效应可影响局地的气温、风速和边界层高度等气象条件

(沈新勇等,2014)。

从模拟区域在雾、霾期间气溶胶直接、半直接效应对2 m 高度气温的平均影响(图6c)可知,气溶胶

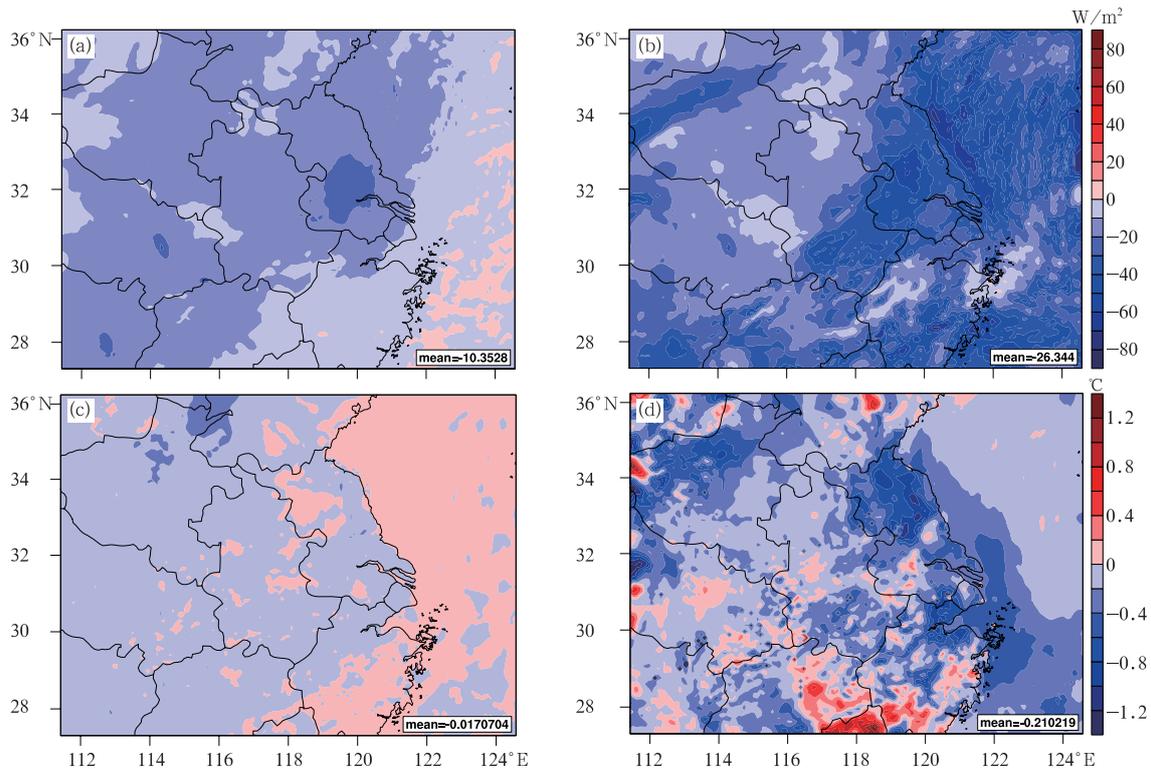
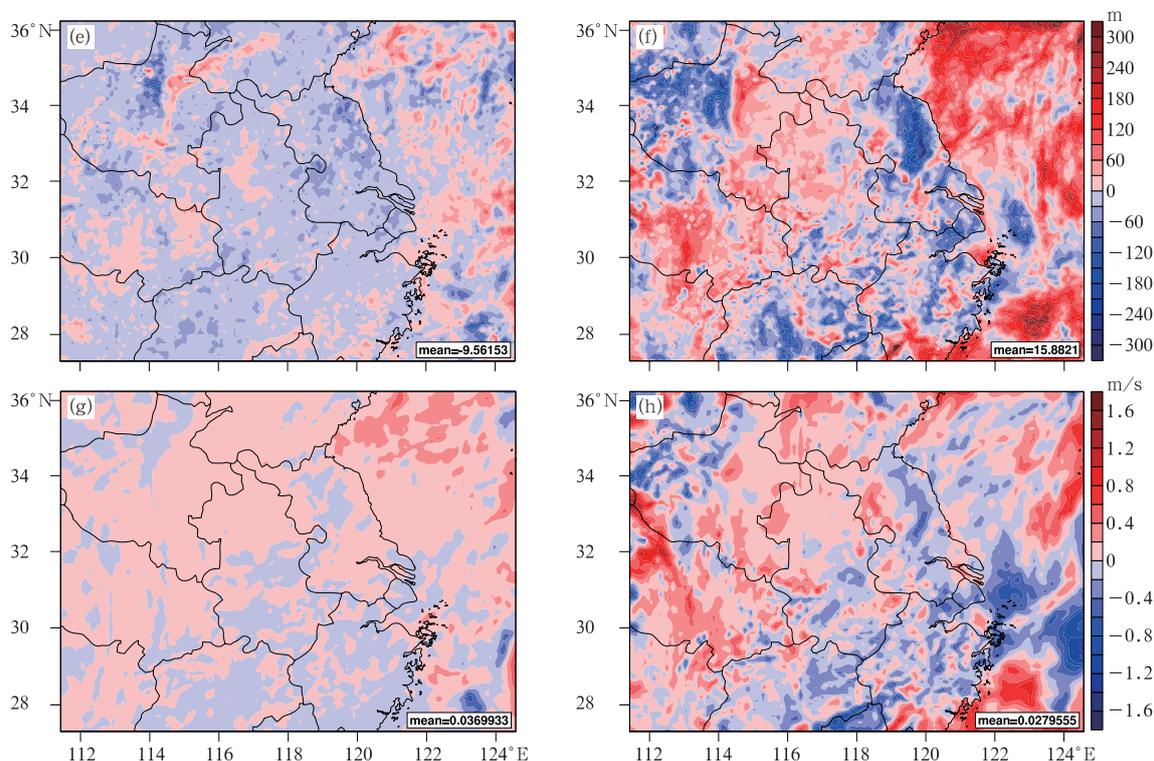


图6 雾、霾过程气溶胶直接、半直接辐射效应(a,c,e,g)和总辐射效应(b,d,f,h)对平均地表短波辐射(a,b)、2 m 高度气温(c,d)、边界层高度(e,f)、10 m 高度风速(g,h)的影响
 Fig. 6 The effects of DRE (a,c,e,g) and TRE (b,d,f,h) on the averages of surface shortwave radiation (a, b), T_2 (c, d), PBL height (e, f) and 10 m wind speed (g, h)



续图 6
Continued

直接、半直接效应使得模拟区域雾、霾期间平均气温下降了 0.017°C 。气温的改变与气溶胶浓度分布类似,气温下降最为明显的区域在污染最严重地区。图 6d 中,在引入气溶胶间接效应后,模拟区域气温几乎都进一步下降,南京及其附近区域气温约下降了 1.2°C 。

图 6e、f 给出了不同试验模拟的平均大气边界层高度差异情况。考虑气溶胶直接、半直接效应对模拟区域雾、霾过程中边界层高度的平均影响时,模拟区域平均边界层高度降低了 10 m 左右,并且在污染区域降低更为明显。加上间接辐射效应时,对大气边界层高度的影响进一步增强,从而使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区污染进一步加重,雾区边界层更加稳定,利于雾的发展和维持,此次雾过程中最低能见度达到 30 m 左右。由于部分区域近地面气温升高等原因,出现了边界层高度升高的状况。

图 6g 为模拟区域在气溶胶直接、半直接效应的影响下 10 m 高度风速在雾、霾过程中的平均变化情况,由于海面温度和边界层高度的升高,风速的增大较为明显,对其他区域风速的影响比较微弱。而总辐射效应(图 6h)使得污染区域的风速出现不同程度降低,因为地面气温的降低和大气边界层的稳

定,抑制了空气的流动。

4.1.2 气溶胶辐射效应对南京地区边界层气象要素的影响

图 7 为试验 1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在雾、霾期间随高度的平均变化, $\text{PM}_{2.5}$ 地表平均浓度约 $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度快速减小,气溶胶的影响随之越来越弱,本研究分析气溶胶辐射效应对 920 hPa 高度以下气象场的影响。

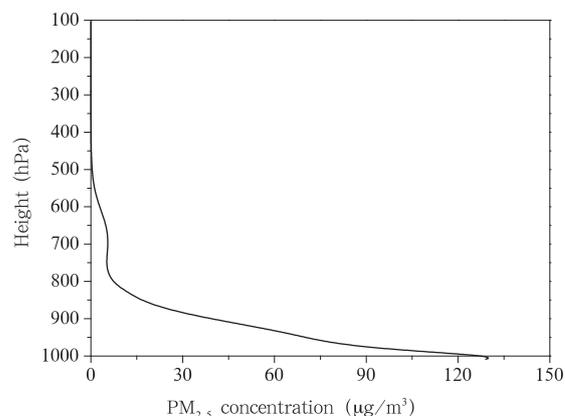


图 7 试验 1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在雾、霾期间平均垂直廓线
Fig. 7 Average vertical profile of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during the smog event simulated by Experiment 1

图 8 是雾、霾期间南京地区不同试验模拟气温、湿度和风速的垂直变化情况。对比各试验风速演变可知,气溶胶直接、半直接效应和气溶胶总辐射效应对南京地表风速影响较小,通过计算得出雾、霾期间平均风速分别降低了 0.37 和 0.52 m/s,低风速能够导致污染物和水汽的累积,对雾的形成有促进作用,并进一步使大气稳定度增大,使污染程度加重。随着高度的上升,1000 hPa 高度附近开始辐射效应对风速的影响逐渐转为正偏差,正偏差的值呈现先增大后减小的趋势。

比较各试验气温随时间的改变,不论气溶胶直接、半直接效应还是气溶胶总辐射效应均使雾霾期间南京近地层气温下降(除了 12 月 8 日 13—16 时),通过计算得出雾、霾期间 2 m 高度平均气温分别降低了 0.646 和 0.935℃,气温的负偏差随高度逐渐趋近于 0,气温的降低使大气层结更加稳定,而大气层结更稳定,对于夜间气温下降比白天的影响更为明显,对于 980 hPa 高度以上影响较小。气温

降低,饱和水汽压越小,相对湿度也就相应增大,也就是说,气溶胶的总辐射效应和直接、半直接辐射效应均有利于雾的形成和发展。

根据 Kohler 理论以及观测研究,大气相对湿度是气溶胶粒子能否吸湿增长为雾滴或霾滴的关键因素之一(Xiao, et al, 2011),模拟发现湿度差异与气温垂直变化有着相反的变化规律,气溶胶直接、半直接辐射效应和气溶胶总辐射效应均使南京地表相对湿度上升。经计算气溶胶总辐射效应使南京地表相对湿度上升了 9.75%,其中直接、半直接效应使地表相对湿度上升了 1.92%,这与之前所说的气溶胶辐射效应对气温的影响造成湿度改变吻合。随高度的升高,气溶胶直接、半直接辐射效应和总辐射效应对相对湿度的正强迫整体呈现出减弱的趋势。从试验中雾、霾过程的演变来看,气溶胶直接、半直接辐射效应和总辐射效应使得雾的持续时间变长,发展高度更高。

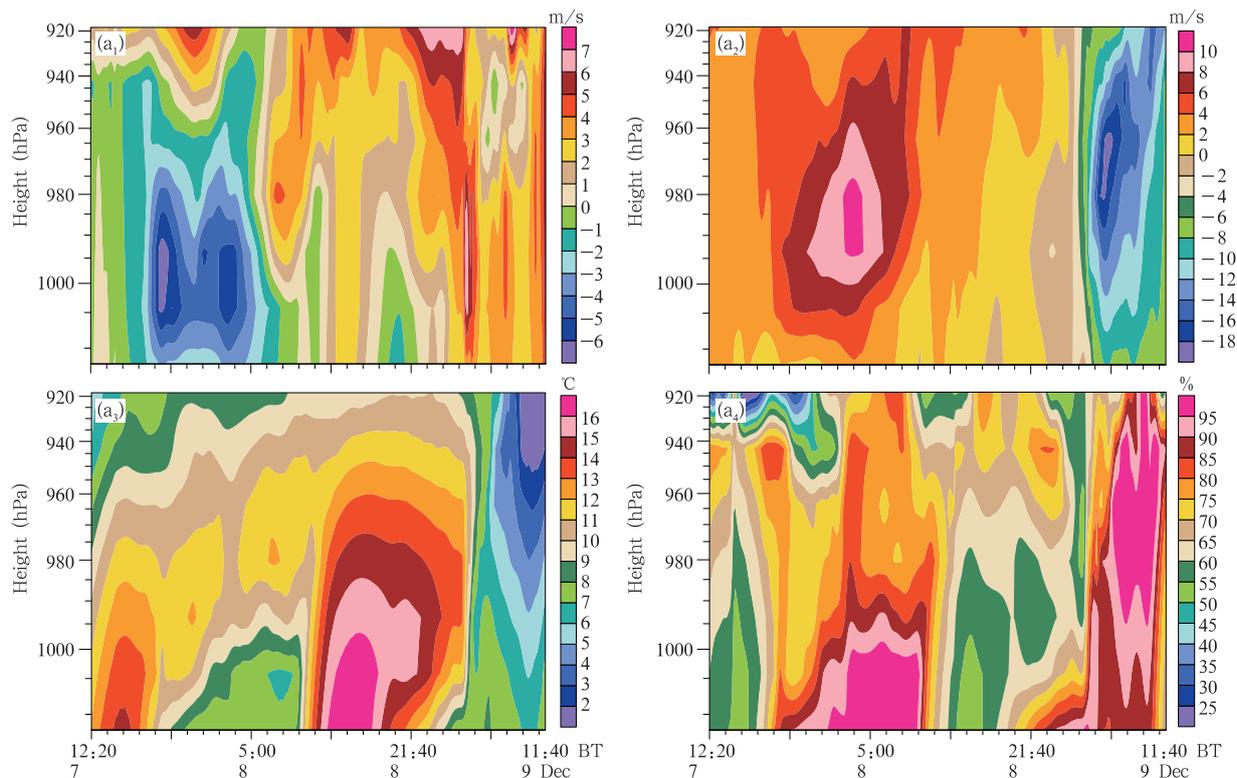
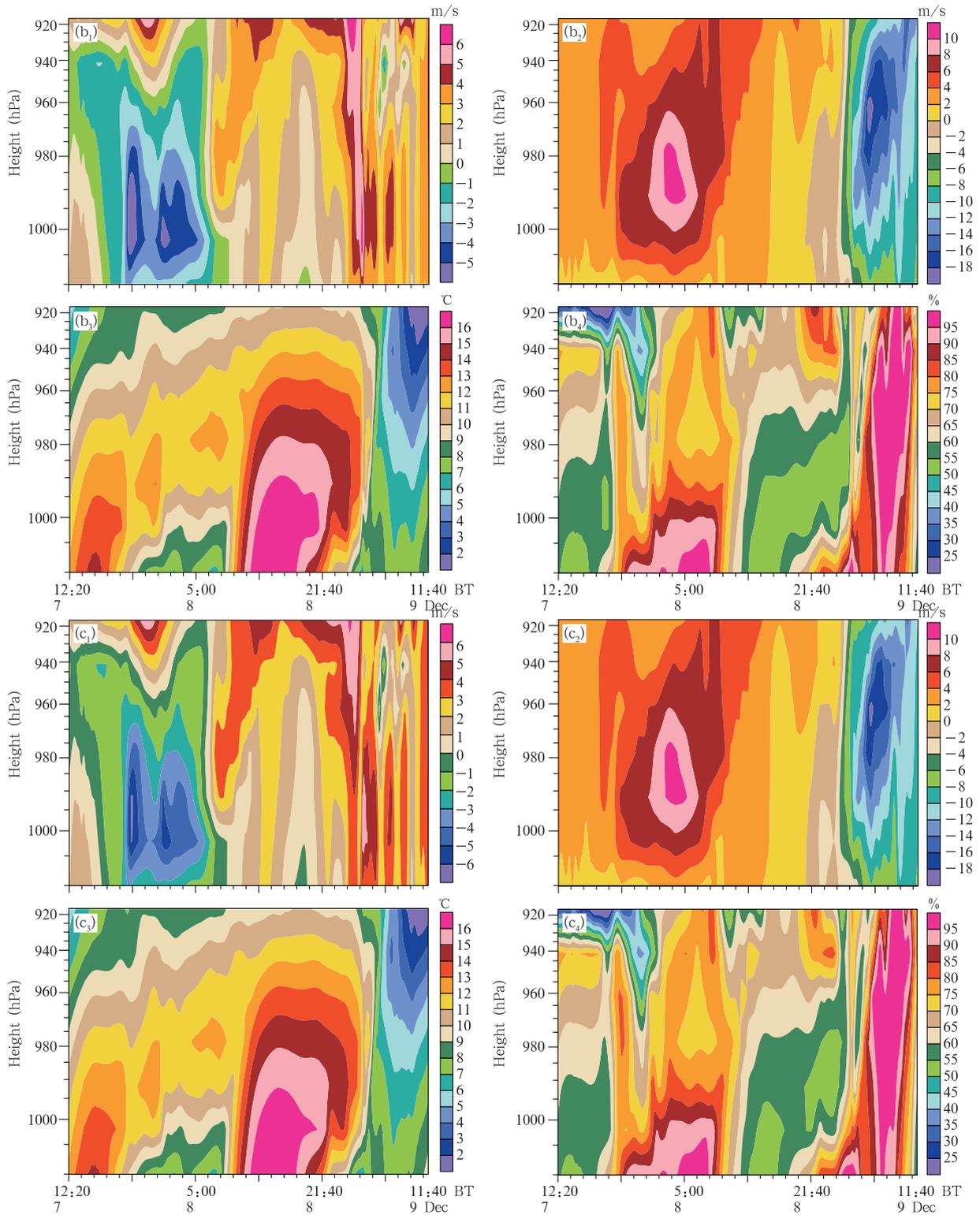


图 8 试验 1(a)、试验 2(b)和试验 3(c)雾、霾期间气象要素(风速(x 方向(a₁—c₁))、y 方向(a₂—c₂))、温度(a₃—c₃)、湿度(a₄—c₄)的时空变化

Fig. 8 Spatial and temporal variations of meteorological elements (wind speed (x (a₁—c₁) and y (a₂—c₂)) directions), temperature (a₃—c₃) and relative humidity (a₄—c₄)) during the smog event simulated by the three experiments (a, b and c represents experiment 1, 2 and 3, respectively)



续图 8

Continued

4.2 气溶胶辐射效应对大气污染物的影响

4.2.1 对模拟区域地面大气污染物的影响

大气污染物的影响主要源于局地的气温、风速

和边界层高度等气象条件的改变以及发生的液相反应。之前的分析中,无论是气溶胶直接、半直接效应还是间接效应,都使得 $PM_{2.5}$ 浓度高值区大气边界

层趋于稳定,不利于污染物的扩散,水汽和气溶胶粒子向近地层堆积,利于雾的发生、发展。图 9a、b 为

雾、霾期间气溶胶辐射效应对近地层 PM_{2.5} 浓度的影响。由图 9a 可知,气溶胶直接、半直接辐射效应

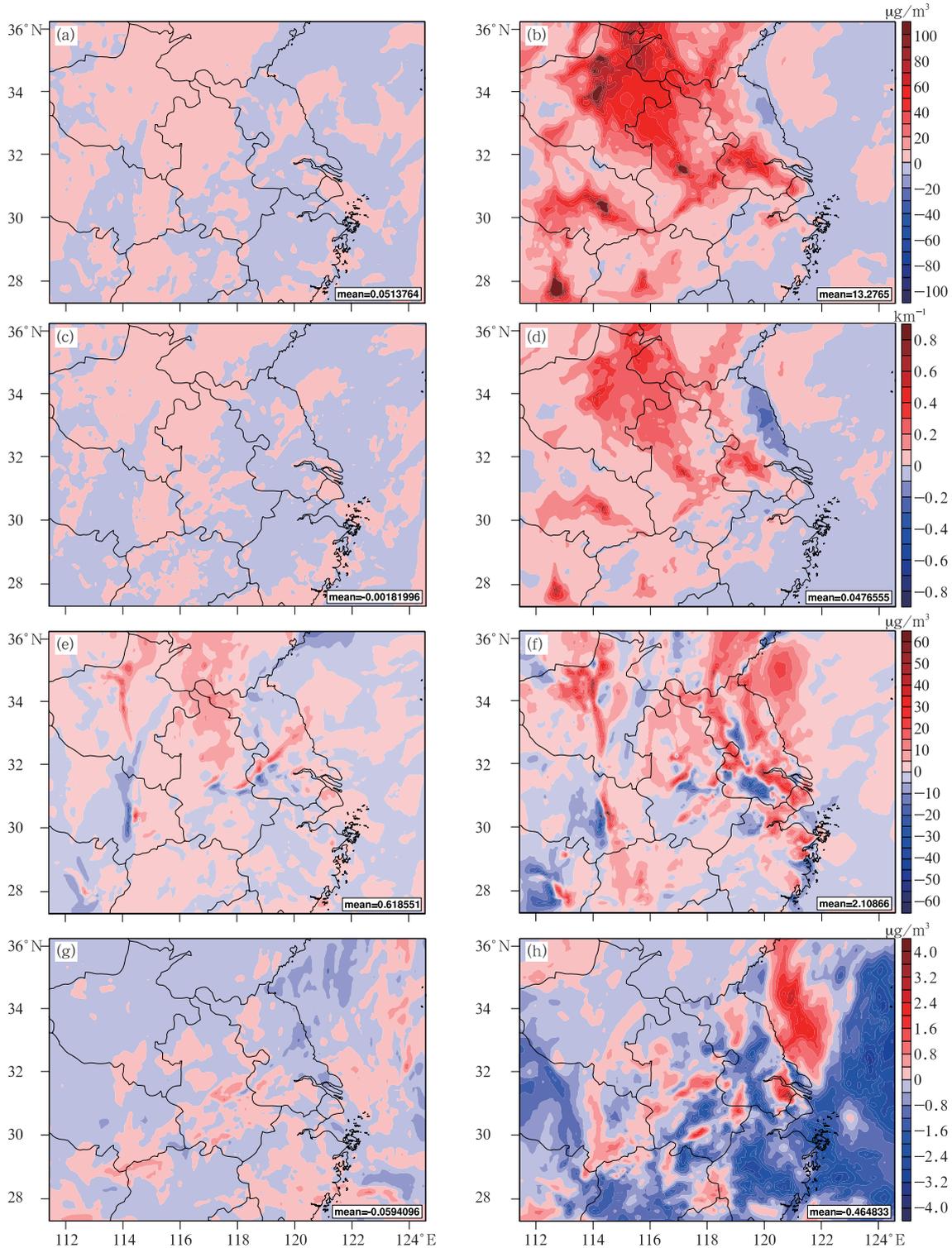


图 9 雾、霾过程不同试验模拟的地表 PM_{2.5} 浓度(a,b)、消光系数(c,d)、氮氧化物浓度(e,f)、臭氧浓度(g,h)的差异 (a,c,e,g. 气溶胶直接、半直接效应的影响,b,d,f,h. 总辐射效应的影响)

Fig. 9 Averages of surface concentration of PM_{2.5} (a, b), extinction coefficient (c, d), concentration of NO_x (e, f) and concentration of O₃ (g, h) simulated by different experiments (a, c, e, g. DRE, b, d, f, h. TRE)

对模拟区域近地层 $PM_{2.5}$ 浓度的影响几乎为正强迫,负强迫主要出现在沿海地区。总辐射效应在此基础上开启了气溶胶反馈机制以及液相反应,气溶胶浓度在部分区域出现了降低。但雾、霾发生区域近地面 $PM_{2.5}$ 浓度仍然升高,且 $PM_{2.5}$ 浓度高值区的增大较为明显。

气象因素和大气污染均能造成低能见度,但重污染条件下颗粒物的消光贡献最大。由图 9c、d 可知,不同试验下模拟区域消光系数的差异与 $PM_{2.5}$ 浓度的差异较为一致,图 9c 中,气溶胶直接、半直接辐射效应使大部分模拟区域气溶胶浓度升高,从而消光系数增大,图 9d 中,颗粒物浓度减小的区域消光系数出现了降低的现象。

VOCs 与氮氧化物在紫外线照射下发生复杂的光化学反应,生成光化学氧化剂(主要为臭氧)及其他多种复杂的化合物。图 9e、f 为雾、霾期间气溶胶辐射效应对近地层氮氧化物浓度的影响情况。只考虑气溶胶直接、半直接效应时(图 9e),大部分区域近地层氮氧化物浓度升高。这是因为消耗氮氧化物

的光化学反应中的主要条件短波辐射减少(图 6a),氮氧化物的反应速率下降;并且边界层高度的降低也使氮氧化物浓度相应升高,大气层结稳定,氮氧化物无法快速扩散,从而发生进一步的累积。气溶胶的总辐射效应使江苏大部分地区氮氧化物浓度降低(图 9f),可能是开启液相反应的结果。

图 9g、h 为雾、霾期间气溶胶辐射效应对近地层臭氧浓度的影响。近地层中的臭氧浓度主要受光化学反应的影响。在气溶胶直接、半直接效应的影响下。地表接收的太阳短波辐射减少,阻碍了臭氧的生成,因此虽然大气边界层高度降低,但是污染区域的臭氧浓度降低(图 9g)。图 9h 中,考虑了间接辐射效应以后,地表接收的太阳短波辐射进一步减少(图 6b),对臭氧浓度的负强迫影响进一步增强。

4.2.2 气溶胶辐射效应对南京地区 $PM_{2.5}$ 、氮氧化物和臭氧浓度垂直廓线的影响

从雾、霾过程南京地区不同试验模拟的 $PM_{2.5}$ 、氮氧化物和臭氧浓度平均差异的垂直廓线(图 10)可知,气溶胶总辐射效应使南京近地表 $PM_{2.5}$ 浓度

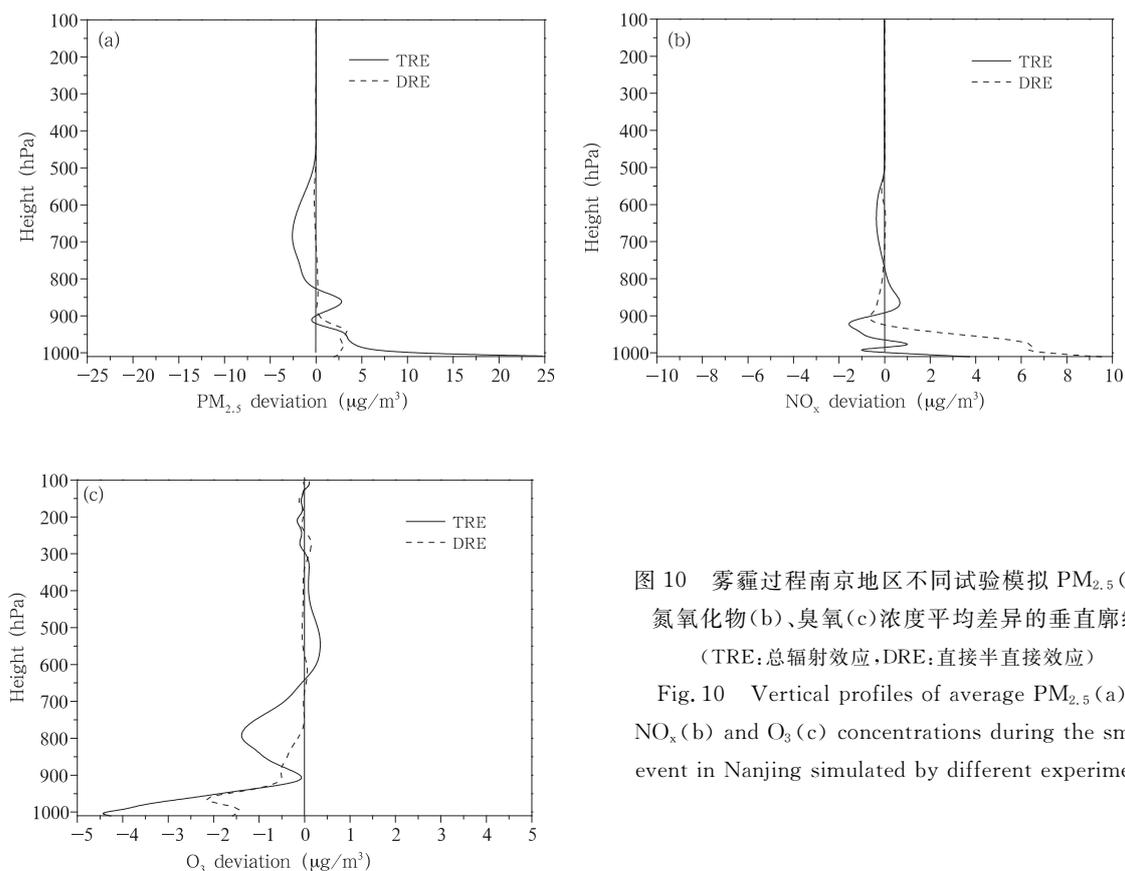


图 10 雾霾过程南京地区不同试验模拟 $PM_{2.5}$ (a)、氮氧化物(b)、臭氧(c)浓度平均差异的垂直廓线 (TRE:总辐射效应,DRE:直接半直接效应)

Fig. 10 Vertical profiles of average $PM_{2.5}$ (a), NO_x (b) and O_3 (c) concentrations during the smog event in Nanjing simulated by different experiments

增大 $18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中直接、半直接效应使地表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增大 $2.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图 10a)。气溶胶总辐射效应对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的正强迫随高度的升高 (900 hPa 以下) 快速降低, 在 900—800 hPa 有一个小波动, 从 800 hPa 高度上下开始气溶胶总辐射效应对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响为负强迫, 因为间接辐射效应气溶胶粒子可以作为云凝结核与冰核参与云滴活化过程, 导致气溶胶数量减小; 而直接、半直接辐射效应的正偏差在 920 hPa 左右出现减少的趋势, 在 500 hPa 以上高度趋近于 0。

气溶胶总辐射效应对南京地表氮氧化物浓度的正强迫为 $2.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而直接、半直接效应的正强迫远大于总辐射效应, 为 $9.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图 10b)。从而可知气溶胶间接辐射效应对近地层氮氧化物浓度的影响为负强迫, 这是氮氧化物参与液相反应导致的。总辐射效应的影响随高度的升高不断改变, 而直接、半直接辐射效应的正偏差则先快速减弱, 达到负偏差极值后缓慢增加直至 0 附近。

气溶胶总辐射效应使南京近地表臭氧浓度降低 $5.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 直接、半直接效应使地表臭氧浓度降低 $1.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图 10c)。总辐射效应对臭氧浓度产生负偏差随高度先快速减弱, 从 900 hPa 开始又呈现增强的趋势并在 800 hPa 左右达到极值, 可能是因为这两个高度层之间吸收性气溶胶较多, 减弱短波辐射造成的。气溶胶的直接、半直接辐射效应导致的负偏差则先增大后减小, 在 800 hPa 高度以上几乎为 0。

5 结 论

为了研究气溶胶辐射反馈效应对雾、霾过程的影响, 设置 3 组模拟试验, 通过对比差异, 得出以下结论:

(1) 在本次雾、霾过程中, 气溶胶直接、半直接辐射效应使污染地区短波辐射减少、2 m 气温下降、大气边界层高度降低, 10 m 风速受影响微弱; 气溶胶总辐射效应使得污染地区上述气象参数 (短波辐射、2 m 气温、边界层高度) 进一步减小, 风速降低, 边界层更加稳定, 不利于水汽与污染物的扩散, 空气污染进一步加重, 雾结构进一步稳定。

(2) 气溶胶直接、半直接辐射效应使得污染地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高、消光系数增大、氮氧化物浓度升高, 臭氧浓度降低; 间接辐射效应使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和消

光系数进一步增大, 氮氧化物、臭氧浓度降低;

(3) 气溶胶直接、半直接效应和气溶胶总辐射效应在雾、霾期间使得 10 m 高度平均风速分别降低了 0.37 和 0.52 m/s, 2 m 高度平均气温分别降低了 0.646 和 0.935 $^{\circ}\text{C}$, 地表相对湿度分别上升了 1.92% 和 9.75%。气溶胶直接、半直接辐射效应和气溶胶总辐射效应均使南京地区近地层大气层结更加稳定, 湿度增大, 利于雾的发生, 污染物 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2) 浓度升高, 污染加重。

致 谢: 感谢沈新勇教授细致地审阅了初稿并提出了很有意义的修改意见。

参 考 文 献

- 陈林, 牛生杰, 仲凌志. 2006. MODIS 监测雾的方法及分析. 南京气象学院学报, 29(4): 448-455. Chen L, Niu S J, Zhong L Z. 2006. Detection and analysis of fog based on MODIS data. J Nanjing Inst Meteor, 29(4): 448-455 (in Chinese)
- 高怡, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析. 气候与环境研究, 19(2): 140-152. Gao Y, Zhang M G. 2014. Numerical simulation of a heavy smog episode over the North China Plain in January 2013. Climatic Environ Res, 19(2): 140-152 (in Chinese)
- 郭丽君, 郭学良, 方春刚等. 2015. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析. 中国科学: 地球科学, 45(4): 427-443. 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 smog episode in North China. Science China: Earth Sciences, 58(3): 329-344
- 廖礼, 漏嗣佳, 符瑜等. 2015. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响. 大气科学, 39(1): 68-82. Liao L, Lou S J, Fu Y, et al. 2015. Radiative forcing of aerosols and its impact on surface air temperature on synoptic scale in eastern China. Chinese J Atmos Sci, 39(1): 68-82 (in Chinese)
- 毛节荣, 李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究. 气象学报, 63(5): 622-635. Mao J T, Li C C. 2005. Observation study of aerosol radiative properties over China. Acta Meteor Sinica, 63(5): 622-635 (in Chinese)
- 沈新勇, 黄伟, 陈明诚等. 2014. 人为气溶胶的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响. 气候与环境研究, 19(4): 393-406. Shen X Y, Huang W, Chen M C, et al. 2014. Direct radiative effects of anthropogenic aerosols and their effects on the South Asian-winter monsoon. Climatic Environ Res, 19(4): 393-406 (in Chinese)
- 吴兑. 2008. 霾与雾的识别和资料分析处理. 环境化学, 27(3): 327-330. Wu D. 2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data. Environ Chem, 27(3): 327-330 (in Chinese)
- 张华, 马井会, 郑有飞. 2009. 沙尘气溶胶辐射强迫全球分布的模

- 拟研究. 气象学报, 67(4): 510-521. Zhang H, Ma J H, Zheng Y F. 2009. A modeling study of global radiative forcing due to dust aerosol. *Acta Meteor Sinica*, 67(4): 510-521 (in Chinese)
- 张立盛, 石广玉. 2002. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响. 气象学报, 60(2): 230-337. Zhang L S, Shi G Y. 2002. The impact of relative humidity on the radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol. *Acta Meteor Sinica*, 60(2): 230-337 (in Chinese)
- 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 2013. 一次南海海雾微物理结构个例分析. 大气科学, 37(3): 552-562. Zhang S T, Niu S J, Zhao L J. 2013. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea. *Chinese J Atmos Sci*, 37(3): 552-562 (in Chinese)
- Charlson R J, Pilat M J. 1969. Climate: The influence of aerosols. *J Appl Meteor*, 8(6): 1001-1002
- Forkel R, Werhahn J, Hansen A B, et al. 2012. Effect of aerosol-radiation feedback on regional air quality: A case study with WRF/Chem. *Atmos Environ*, 53: 202-211
- Guenther A, Karl T, Harley P, et al. 2006. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmos Chem Phys*, 6(11): 3181-3210
- Hansen J, Sato M, Ruedy R. 1997. Radiative forcing and climate response. *J Geophys Res*, 102(D6): 6831-6864
- Jacobson M Z, Kaufman Y J, Rudich Y. 2007. Examining feedbacks of aerosols to urban climate with a model that treats 3-D clouds with aerosol inclusions. *J Geophys Res*, 112 (D24): D24205
- McKeen S A, Eder B, Grell G A, et al. 2003. Evaluation of Prototype Air Quality Forecast Models; Chemistry. NOAA/OAR Report
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview. *Adv Atmos Sci*, 27(3): 639-662
- Park R J, Kim M J, Jeong J I, et al. 2010. A contribution of brown carbon aerosol to the aerosol light absorption and its radiative forcing in East Asia. *Atmos Environ*, 44(11): 1414-1421
- Rosenfield D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 321 (5894): 1309-1313
- Xiao Z M, Zhang Y F, Hong S M, et al. 2011. Estimation of the main factors influencing haze, based on a long-term monitoring campaign in Hangzhou, China. *Aeros Air Qual Res*, 11(7): 873-882
- Zhang B, Wang Y, Hao J. 2015. Simulating aerosol-radiation-cloud feedbacks on meteorology and air quality over eastern China under severe haze conditions in winter. *Atmos Chem Phys*, 15 (5): 2387-2404
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 12(2): 779-799
- Zhang Y, Wen X Y, Jang C J. 2010. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental U. S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem). *Atmos Environ*, 44(29): 3568-3582