

刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 2014. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 164–172, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13224.
Liu Ruiting, Han Zhiwei, Li Jiawei. 2014. Analysis of meteorological characteristics during winter haze events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 164–172.

北京冬季雾霾事件的气象特征分析

刘瑞婷^{1,2} 韩志伟¹ 李嘉伟¹

¹ 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 利用观测的气象要素和细颗粒物 (即 PM_{2.5}) 浓度资料, 并结合中尺度数值天气模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model), 对 2013 年 1 月北京地区雾霾污染期间天气条件和边界层气象特征进行了分析。模拟与观测对比表明, WRF 模式可以较好地反映北京—天津—河北地区地面和高空主要气象要素的时空分布。对 1 月 10~14 日、27~31 日两次重雾霾天气的分析表明, 雾霾的形成是高浓度的大气颗粒物和特殊的气象条件共同作用的结果。小风或静风、稳定的大气层结, 使大气扩散能力减弱, 造成污染物堆积, 偏南气流将周边污染物和水汽输送到北京, 不仅增加了污染物浓度, 而且有利于气溶胶吸湿增长, 消光增强, 使能见度下降, 进而形成雾霾。

关键词 雾霾 数值模拟 气象要素 细颗粒物 成因分析

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0164-09

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13224

Analysis of Meteorological Characteristics during Winter Haze Events in Beijing

LIU Ruiting^{1,2}, HAN Zhiwei¹, and LI Jiawei¹

¹ Key Laboratory of Regional Climate–Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract By using observations of meteorological variables and PM_{2.5} concentration, together with the meso-scale numerical *Weather Research and Forecasting* (WRF) model, the weather conditions and boundary layer meteorological features were investigated during haze periods in Beijing in January 2013. The comparison with observations shows that WRF is able to reasonably reproduce the spatial and temporal distributions of the meteorological variables. Analysis of the heaviest haze periods, which occurred during 10–14 January and 27–31 January, shows that meteorological factors and high concentrations of atmospheric particulates are both responsible for the haze pollution. Small or calm wind and steady atmospheric stratification led to a decrease in atmospheric diffusivity and accumulation of pollutants. In addition, the southerly wind carried surrounding pollutants and water vapor to Beijing, which not only increased pollutant concentrations, but also favored aerosol hygroscopic growth, and extinction increase, which consequently led to haze formation and visibility decrease.

Keywords Haze, Numerical simulation, Meteorological factor, PM_{2.5}, Cause analysis

收稿日期 2013-12-17 收到, 2013-12-30 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41375151

作者简介 刘瑞婷, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事大气环境模式研究。E-mail: liurt@tea.ac.cn

通讯作者 韩志伟, E-mail: hzw@mail.iap.ac.cn

1 引言

近年来,我国的工业化、城市化进程不断加强,经济持续增长,但对能源的过度使用,环保意识淡薄,环保技术落后,向大气排放的各种污染物持续增加,大气污染状况日益恶化。据统计,2012年我国原煤产量 36.5×10^8 t, 占一次能源消费总量的70%,煤炭仍是我国的主体能源;此外,我国城市机动车也迅速增加,2012年,我国汽车保有量超过1亿辆,汽车尾气成为大气污染的又一重要来源。燃油、燃煤的高消耗加上较低的能源利用率,产生了大量的大气污染排放。2012年的中国环境状况公报最新统计显示,二氧化硫排放总量为 2117.6×10^4 t, 氮氧化物排放总量 2337.8×10^4 t。这些排放到大气中的气态污染物可通过化学反应产生二次气溶胶,加上通过直接排放进入大气的一次气溶胶、散射和吸收太阳辐射,使能见度降低,雾霾现象日趋严重,已经成为一种新的灾害性天气(吴兑等, 2008)。

中国气象局行业标准《霾的观测和预报等级》(QX/T113-2010, 中国气象局, 2010)中,定义霾(haze)为大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10.0 km的空气普遍浑浊的现象。雾霾天气期间,能见度差,空气质量明显下降,给人们的生产、生活及身体健康造成严重的不良影响。研究发现,雾霾天气中大量细微的粒子,可通过呼吸道进入人体肺泡,对人群造成伤害。统计结果也表明,在高污染大城市中,如广州,灰霾天气增加与肺部疾病造成的死亡率增加有密切关系(Tie et al., 2009)。

近年来国内关于雾霾的研究较多。吴兑(2011)研究发现,近年来灰霾的出现频率越来越高,以我国东部城市区域为例,灰霾天气从1950~1970年的每年几天增加到目前的每年100~200 d以上。张小曳等(2013)通过分析雾霾与气溶胶的联系,指出我国现今雾霾天气发生的主要原因是严重的气溶胶污染。我国气溶胶主要化学成分硫酸盐、有机碳、硝酸盐、铵和元素碳的质量浓度远高于欧洲,这与经济快速发展导致的人为污染高排放密切相关。彭应登(2013)通过对北京2013年初雾霾天气的细颗粒物(PM_{2.5})来源分析发现,其外地传输的贡献率为27.6%,本地污染源中机动车和燃

煤的贡献率分别为21.5%和18.7%。此外,闵敏等(2009)对河北香河县2007年4月初的一次灰霾天气过程中的气溶胶特性进行了遥感研究,发现灰霾爆发期间,气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)在3个波段上都明显增加,且局地气溶胶散射能力增强,吸收能力减弱。戴永立等(2013)通过分析2006~2009年我国超大城市霾天气特征,指出PM₁₀和相对湿度是影响能见度和霾天气频率关键因子,其中北京能见度变化对相对湿度比较敏感。高岑等(2012)通过对2009年10月14~27日,南京地区发生的一次持续性灰霾天气过程中天气形势和气象要素特征的分析发现,南京地区天气形势稳定,温度持续偏高、干燥无雨,有利于灰霾天气的发生,其来源主要是上游乡村地区秸秆焚烧产生的污染物的长距离输送。陈训来等(2008)利用空气质量模式系统Models-3(MM5/SMOKE/CMAQ)对珠江三角洲地区大气灰霾进行研究,结果表明离岸背景风和海陆风的相互作用对灰霾天气的生成与分布有重大影响。潘本锋等(2013)对北京市2011年雾霾天气发生时大气相对湿度、风速、气温等气象要素以及细颗粒物质量浓度等环境要素变化特征进行了分析,指出雾霾天气是由气象要素和环境要素共同作用形成的。

2013年1月,雾霾天气笼罩我国中东部大部分地区,多地空气质量严重恶化,北京共出现4次严重雾霾天气,南郊观象台测得的雾霾天数为1954年以来同期最多。此次长时间、大范围的雾霾天气引起了社会各界的高度关注。

本文利用观测的气象要素和细颗粒物浓度资料,结合中尺度天气研究与预报模式WRF的模拟结果,对2013年1月北京地区雾霾污染过程及其天气背景和边界层气象特征进行了分析,研究结果将对认识我国北方雾霾天气的成因提供一些参考。

2 观测数据

本研究中,2013年1月地面气象观测数据来源于中国气象局的中国地面气候资料日值数据集(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>[2013-12-17]),包括日均气压、温度、风速和相对湿度。共选取8个观测站点(位置如图1所示),序号1~8分别代表北京站、宝坻站、唐山站、塘沽站、天津站、霸州站、

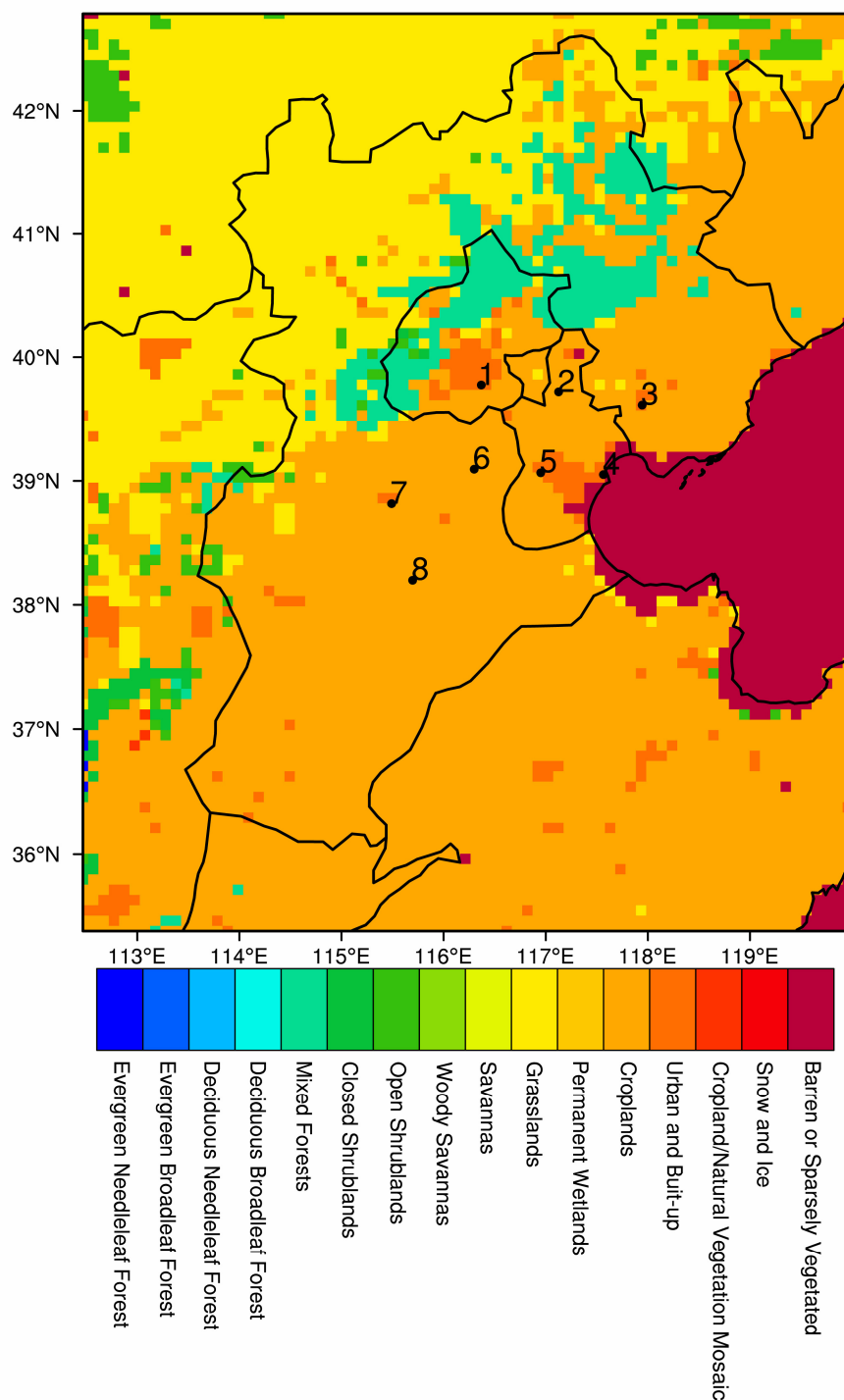


图1 模式模拟区域设置及区域内土地利用类型、各地面观测站点位置

Fig. 1 Setting of simulation area in model and land use type in the study domain and the locations of sites

保定站和饶阳站。

北京站(编号 54511)的探空数据来源于美国怀俄明州大学(<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> [2013-12-17]), 研究时段分别为 2013 年 1 月 12 日、29 日的 08:00 (北京时间, 下同) 和 20:00。

本研究中的空气质量指数(AQI: 定量描述空气质量状况的无量纲指数)来自于北京市环境保护局网站(<http://wsbs.bjepb.gov.cn/air2008/Air1.aspx> [2013-12-17]) 所提供北京市 35 个监测子站的逐日数据。按照中华人民共和国环境保护部(2012)发布的《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》

(HJ633-2012)，将各子站空气质量指数转化为细颗粒物的质量浓度，文中使用的北京细颗粒物逐日浓度值为北京市 35 个监测子站的平均值。

3 模式介绍

本文使用的模式是 NCAR 等联合开发的中尺度天气研究与预报模式 Weather Research and Forecasting Model。此次模拟研究采用 2 层网格嵌套，第一层以 (35°N, 115°E) 为中心，东西方向 160 个格点，南北方向 140 个格点，水平分辨率为 27 km，覆盖了中国大部分地区；第二层嵌套范围是北京—天津—河北地区，东西方向 76 格点，南北方向 91 格点，区域水平分辨率为 9 km。模式层顶气压为 50 hPa，垂直分为 30 层。本文模拟试验中，云微物理过程采用 Lin et al. 参数化方案 (Lin et al., 1983)；长波辐射采用 RRTM 方案 (Borge et al., 2008)；短波辐射采用 Dudhia 方案；每 30 min 进行一次辐射过程的计算；边界层过程采用 Yonsei University PBL 方案 (Hu et al., 2010)；积云对流过程采用 Kain-Fritsch (new Eta) (Kain, 2004) 方案；陆面过程采用耦合了城市冠层模式 UCM (Urban Canopy Model) (Kusaka and Kimura, 2004) 的 Noah LSM 陆面过程模式。第二层嵌套的模拟区域、下垫面类型如图 1 所示。

模式选用 6 h 1 次，1° (纬度) × 1° (经度) 的 NCEP 再分析资料 (FNL) 为模式提供初始场和边界条件。模拟时间为 2012 年 12 月 27 日至 2013 年

1 月 31 日，前 5 天为初始化时间。选择距离观测站点最近的模式格点结果与观测进行比较 (董俊玲等, 2011)。

4 结果分析

4.1 模拟和观测地面气象要素对比

4.1.1 地面气象要素对比统计表

从表 1 可以看出，模式可以较好地反映近地面气温的变化，总的相关系数为 0.82，其中北京和天津相关系数接近 0.9，但模式结果总体偏低约 15%，其中天津偏低最多，而唐山模拟略有偏高。

风速模拟的相关系数比气温要低，总的相关系数为 0.62，其中天津的相关系数最高 (0.8)。风速模拟总体偏高 (9%)，但天津和保定模拟偏低，其中唐山偏差最少 (2%)，保定偏低最多。

相对湿度的相关系数总体为 0.76，其中北京、宝坻的相关系数最高 (约为 0.9)，模式对 8 个站点相对湿度模拟均偏小，总体偏低约 20%，其中天津偏差最小 (2%)。

总之，WRF 可以较好地反映北京—天津—河北地区地面主要气象要素的时空分布特征。

4.1.2 北京地面站日均气象要素对比

模式很好地再现了 1 月地面气压的变化 (图 2a)，如：1 月 3 日、17 日的高压，1 月 12 日、23 日和 28 日的低压。模式较好地反映出地面气温逐渐增加的趋势，但总体上模拟比观测偏低 (0.9 °C)，特别是 1 月上旬。模拟的风速比观测略高，但模式

表 1 北京—天津—河北地区 8 个地面观测站 2013 年 1 月模拟和观测气象要素的对比统计 (高媛媛等, 2007)
Table 1 Comparisons between the observed and simulated ground meteorological elements at eight stations in Beijing–Tianjin–Hebei area in Jan 2013

城市	气温					风速					相对湿度				
	平均值/°C		相关系数	平均偏差/°C	标准化平均偏差	平均值/m s ⁻¹		相关系数	平均偏差/m s ⁻¹	标准化平均偏差	平均值		相关系数	平均偏差	标准化平均偏差
	观测	模拟				观测	模拟				观测	模拟			
北京	-4.68	-5.56	0.85	-0.88	0.23	1.82	2.16	0.72	0.34	0.19	61.29%	48.00%	0.89	-13.29%	-0.22
霸州	-6.87	-7.03	0.92	-0.16	0.02	1.58	1.86	0.64	0.28	0.18	83.16%	63.22%	0.83	-19.94%	-0.24
宝坻	-5.79	-8.53	0.91	-2.74	0.47	1.64	1.94	0.75	0.30	0.19	66.58%	63.88%	0.88	-2.70%	-0.04
天津	-4.74	-7.29	0.88	-2.55	0.54	2.23	1.87	0.80	-0.36	-0.16	67.06%	65.47%	0.77	-1.59%	-0.02
唐山	-6.93	-5.93	0.91	1.00	-0.14	2.06	2.11	0.68	0.05	0.02	74.61%	46.17%	0.81	-28.44%	-0.38
保定	-5.97	-6.22	0.86	-0.25	0.04	1.95	1.24	0.62	-0.71	-0.37	79.29%	62.53%	0.81	-16.76%	-0.21
塘沽	-3.96	-4.33	0.83	-0.37	0.10	2.28	3.04	0.69	0.76	0.33	65.87%	49.98%	0.86	-15.89%	-0.24
饶阳	-5.55	-5.95	0.92	-0.40	0.07	1.14	1.84	0.54	0.70	0.62	80.97%	66.22%	0.81	-14.75%	-0.18
站点平均	-5.56	-6.36	0.82	-0.80	0.15	1.84	2.01	0.62	0.17	0.09	72.35%	58.18%	0.76	-14.17%	-0.20

比较合理地反映了风速的变化,如 1 月 1 日、8 日、24 日的大风和 7 日、12 日、28 日的小风。模式模拟的相对湿度比观测整体偏低约 22%,但是与观测的变化趋势基本一致,能反映出湿度较高的时段(如 1 月 12 日、23 日、29 日)以及研究时段内湿度逐渐增加的趋势。

4.2 雾霾污染的气象特征分析

4.2.1 雾霾天气和天气背景

2013 年 1 月,北京—天津—河北地区共发生 4 次雾霾污染过程,第一次高峰是 1 月 10~14 日;另一个高峰则是从 27 日一直延续到 31 日。图 3 显示的是地面观测的北京市 1 月细颗粒物日均浓度变化,可以看到,10~14 日、27~31 日北京市经历了 2 次重度污染事件,在 12 日和 29 日,细颗粒物

日均浓度分别达到 $403.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $343.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

图 4a 显示华北地区上空维持稳定的西风气流,无强冷空气活动,低空温度较高;图 4b 显示,北京市地面处于弱的气压场,为弱的偏南风控制,由于北京三面环山的独特地形,来自南方的暖湿气流和污染物受到阻挡会停滞或堆积,近地面气溶胶浓度和相对湿度增加,有利于雾霾天气的形成。

4.2.2 地面气象特征

通过对北京近地面气象要素和细颗粒物浓度变化(图 2 和图 3)的对比分析发现,雾霾污染的发生与气象条件有密切的关系。研究发现 12~13 日、28~30 日平均相对湿度都大于 75%,29 日高达 89%;重污染期间气压值均较低,28 日仅为

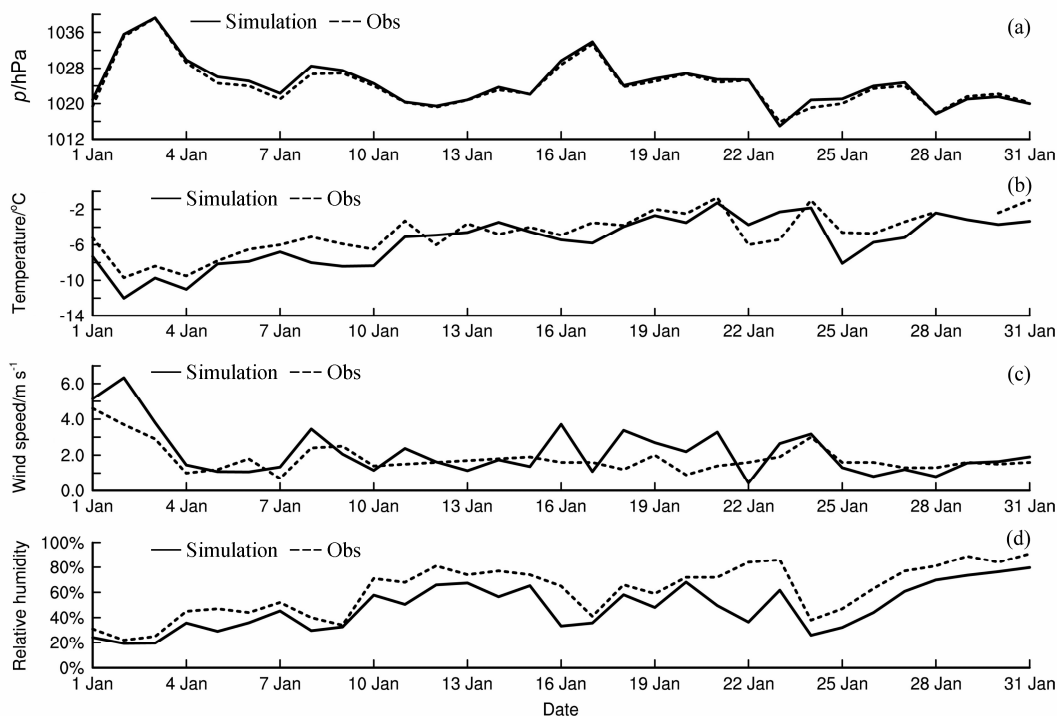


图 2 北京站 2013 年 1 月 (a) 气压、(b) 温度、(c) 风速和 (d) 相对湿度的模拟与观测逐日对比

Fig. 2 Comparisons of simulated and observed daily mean (a) air pressure, (b) temperature, (c) wind speed, and (d) relative humidity at Beijing station in Jan 2013

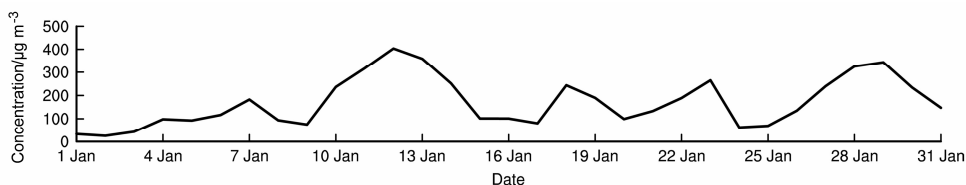


图 3 观测的北京站 2013 年 1 月细颗粒物日均浓度

Fig. 3 The observed daily mean concentrations of PM_{2.5} at Beijing station in Jan 2013

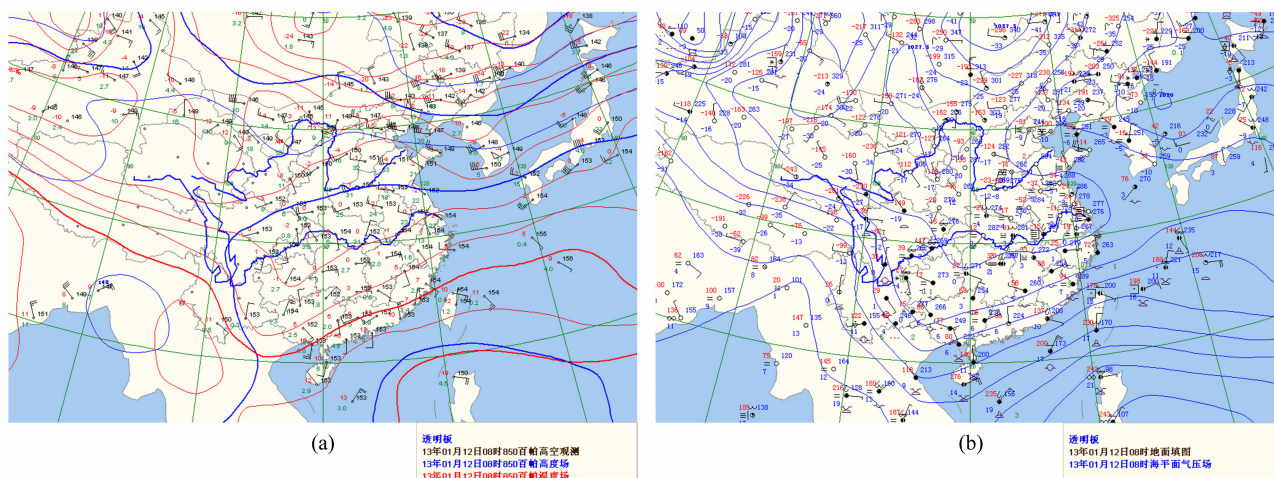


图4 2013年1月12日08:00 (a) 850 hPa 和 (b) 地面天气图 (天气图来源 http://218.94.36.199:5050/dmsg/korea_map.htm[2013-12-17])

Fig. 4 (a) 850 hPa and (b) surface weather conditions at 0800 LST 12 Jan 2013 (weather map source http://218.94.36.199:5050/dmsg/korea_map.htm [2013-12-17])

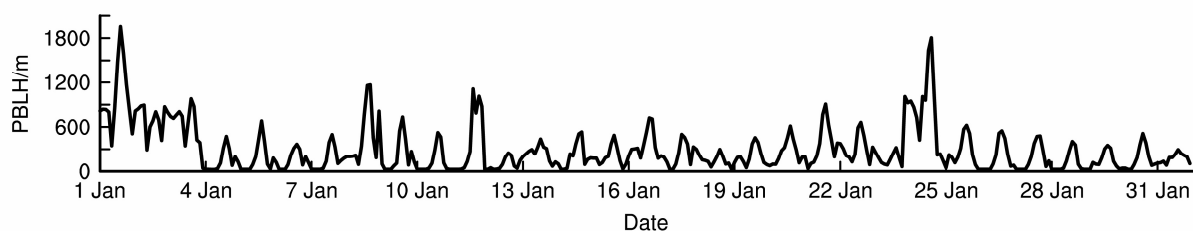


图5 2013年1月北京站模拟边界层高度逐时变化

Fig. 5 Variation of the simulated hourly mean planetary boundary layer height (PBLH) at Beijing station in Jan 2013

1017.8 hPa; 风速也均低于 1.7 m/s。图 5 给出了模式模拟的边界层高度的时间变化, 可以看到在污染最重的 12 日和 29 日, 白天的混合层高度都在 300 m 左右, 是全月最低值, 这与 1 月细颗粒物浓度最高的出现时间 (12 日、29 日) 有很好的对应。

上述分析说明 2013 年 1 月雾霾事件的发生与气象条件的剧烈变化有密切的关系。在污染源排放变化较小的情况下, 气象条件成为决定污染物浓度和雾霾形成的关键因素。本文研究的 2 个重污染时段 (12 日和 29 日左右), 地面弱低压、小风和稳定的大气结构使大气扩散能力减弱, 有利于污染物的累积; 偏南气流带来水汽和周边污染物, 不仅加重污染, 而且潮湿的环境有利于气溶胶的吸湿增长, 使消光增强, 进而使能见度降低, 发生雾霾。

4.2.3 高空气象特征

1 月 12 日 08:00, 模拟和观测都显示近地面的逆温层达 800 m 和相对湿度高值 (80%~90%, 见

图 6), 20:00 近地面逆温层依然存在, 但相对湿度有所减小 (70%~80%), 大气稳定和高湿条件有利于气溶胶的积累和吸湿增长, 促使雾霾发生; 13 日 (图略) 08:00 近地面为中性或弱不稳定, 20:00 在近地面有一弱的逆温层, 与此对应的是细颗粒物浓度的减小, 而近地面相对湿度与 12 日基本相当。29 日 08:00 和 20:00 在近地面有较强的逆温层, 高度达到 1400 m, 相对湿度在 90% 左右, 无论是逆温的强度还是相对湿度都略大于 12 日, 另一个不同的特征是 29 日 08:00 在高空 5 km 左右出现相对湿度的高值区 (~60%), 这种垂直方向水汽的多层分布增强了大气稳定性和气溶胶吸湿增长, 使雾霾加重并易于维持。模式准确地模拟了气温的垂直分布, 合理地反映了近地面逆温层的生消, 对相对湿度垂直分布和变化趋势的模拟也基本合理, 但绝对值的偏差相对较大。

4.3 严重雾霾污染过程的模拟结果分析

由图 7 可见, 11 日, 北京地区为西北风控制,

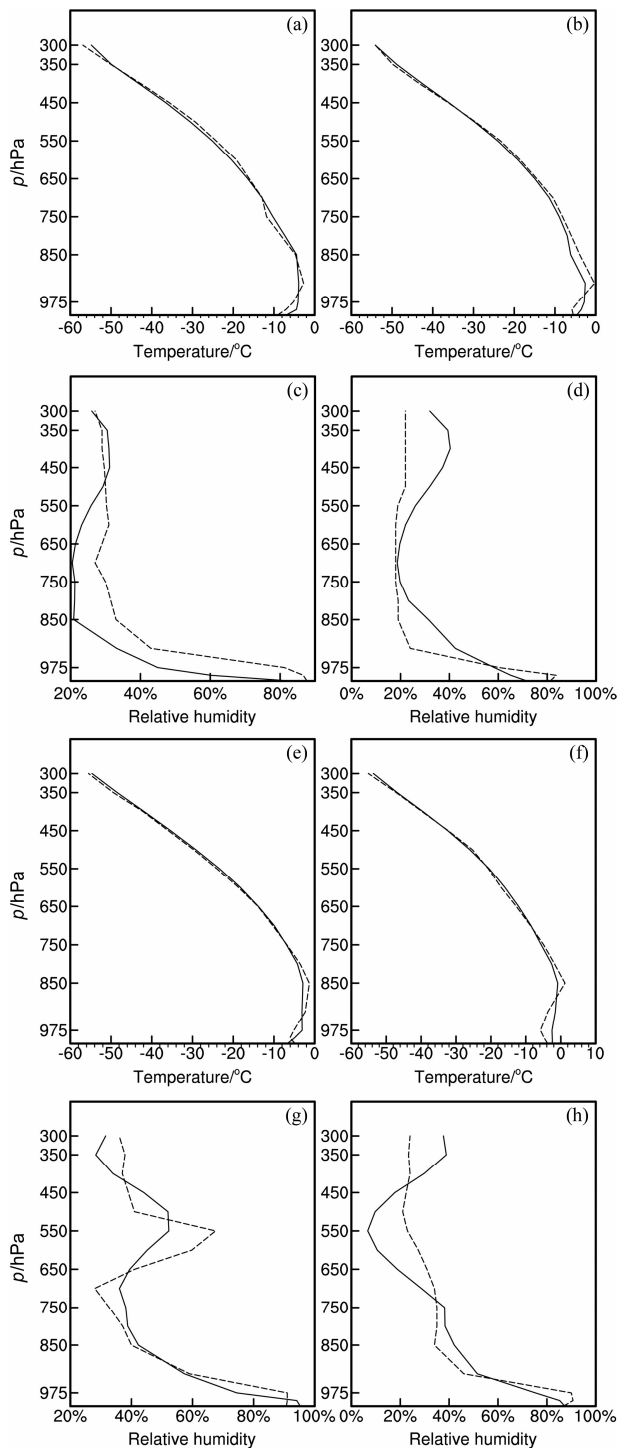


图6 北京2013年1月(a-d)12日、(e-h)29日08:00(左列)和20:00(右列)模拟和探空观测的气温和相对湿度垂直廓线图(实线为模拟值,点线为观测值)

Fig. 6 Simulated and observed vertical profiles of air temperature and relative humidity at 0800 LST (left panel) and 2000 LST (right panel) on (a-d) 12 Jan and (e-f) 29 Jan 2013 in Beijing (model results: solid lines, observations: dotted lines)

风速约为 3 m/s, 相对湿度较低, 大部分地区为 40%~60%; 而在天津南部有相对湿度高值区。到 12 日, 北京南部风向变为南风, 与西北风在北京相遇, 在市区附近形成 ≤ 2 m/s 的小风或静风区, 风速的减小使污染物扩散能力明显减弱, 加上从河北和天津随南风输送而来的污染物, 使污染物增加并不断积累, 由于南风的输送, 北京市东南部和城区的相对湿度也明显增加至 60%~80%, 有利于气溶胶的吸湿增长和消光增强, 进而形成雾霾天气。28 日, 北京地区为西北和东南风交汇区, 风速不大, 约为 1~2 m/s, 北京东部地区相对湿度为 60%~90%, 到 29 日, 北京的南部变为偏东风, 风速变化不大, 但相对湿度有所增加, 在北京东南部相对湿度超过 90%, 对雾霾的形成非常有利。

上述结果说明北京的雾霾事件发生与风向风速和扩散能力的变化, 以及周边污染物和水汽输送密切相关, 在污染源基本不变的情况下, 气象条件的急剧变化是雾霾形成的关键因素。雾霾天气的形成, 一方面是因为存在高浓度的大气颗粒物, 另一方面是受到特殊的天气和气象条件影响, 是人为和自然因素共同作用的结果。

5 结论

本文利用观测气象要素和细颗粒物浓度资料, 并结合新一代中尺度数值天气模式 WRF 的模拟, 对 2013 年 1 月北京地区雾霾污染的天气形势和边界层气象特征进行了分析, 得到以下结论:

(1) WRF 模式可以较好地反映北京—天津—河北地区地面主要气象要素的时空分布。模式对气压和温度的模拟总体上好于对风速和相对湿度的模拟。可以较好地模拟垂直方向温、湿分布的主要特征, 合理地反映近地面逆温层的生消和水汽的输送过程。

(2) 通过对 1 月 10~14 日、27~31 日两次重雾霾天气的分析表明, 小风或静风、稳定的大气层结, 以及周边污染物和水汽的输送, 不仅增加了北京地区污染物浓度, 而且有利于气溶胶的吸湿增长, 使消光增强, 形成雾霾。

(3) 在污染源基本不变的情况下, 风向风速和相对湿度的急剧变化是雾霾形成的关键因素。

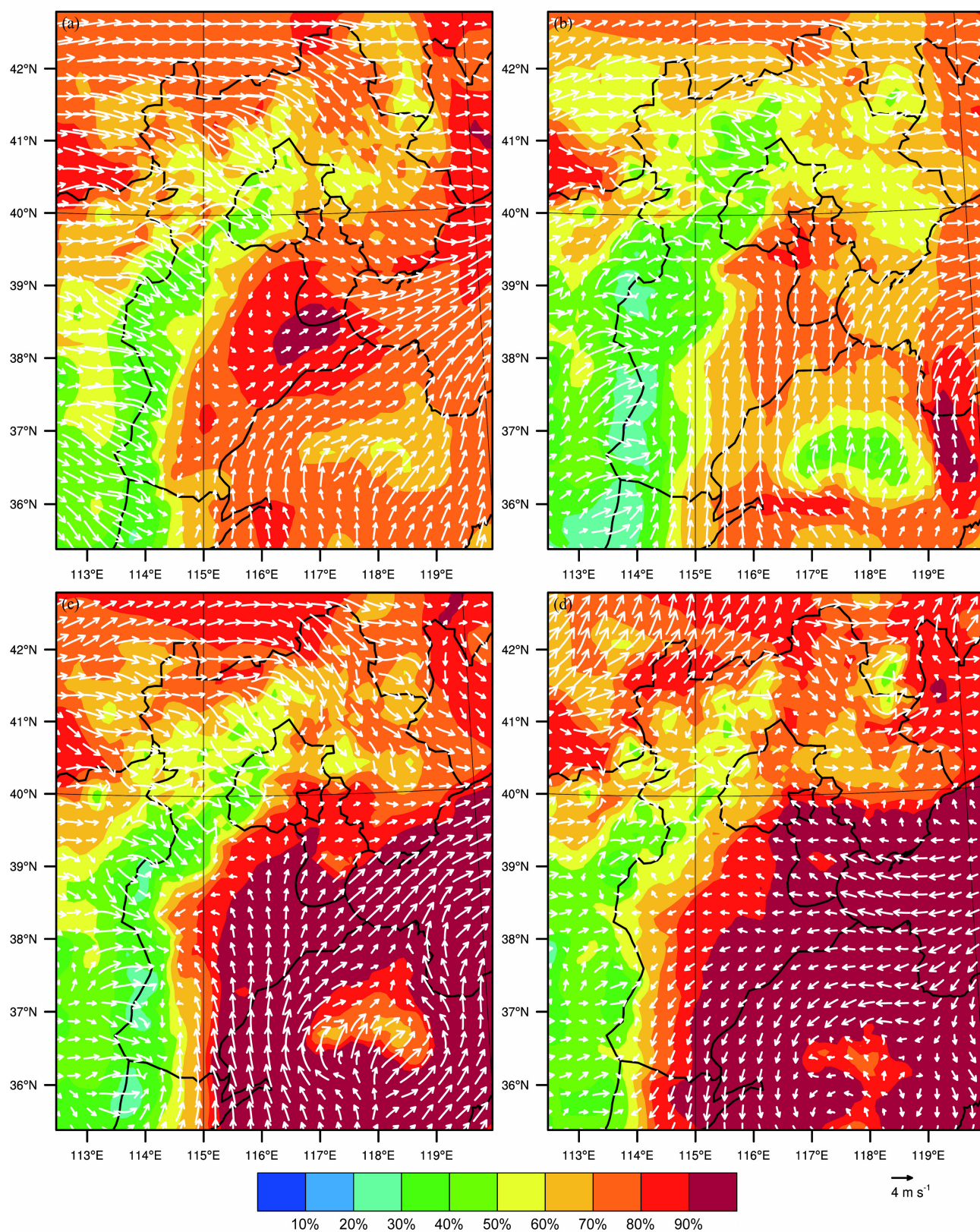


图 7 模式模拟的北京—天津—河北地区 2013 年 1 月 (a) 11 日、(b) 12 日、(c) 28 日、(d) 29 日日平均风和相对湿度空间分布

Fig. 7 Simulated daily mean surface wind field and relative humidity in the Beijing-Tianjin-Hebei area on (a) 11 Jan, (b) 12 Jan, (c) 28 Jan, and (d) 29 Jan in 2013

致谢 感谢董俊玲博士、陈亮博士、韩作强博士在模式调试过程中提供的帮助。

参考文献 (References)

- Borge R, Alexandrov V, del Vas J J, et al. 2008. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (37): 8560–8574.
- 陈训来, 冯业荣, 范绍佳, 等. 2008. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响 [J]. *大气科学*, 32 (3): 530–542. Chen Xunlai, Feng Yerong, Fan Shaojia, et al. 2008. Effect of the off-shore background flow and sea-land breezes on haze weather over the Pearl River Delta region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 530–542.
- 戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2013. 2006~2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 34 (8): 2925–2932. Dai Yongli, Tao Jun, Lin Zejian, et al. 2013. Characteristics of haze and its impact factors in four megacities in China during 2006–2009 [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 34 (8): 2925–2932.
- 董俊玲, 韩志伟, 张仁健, 等. 2011. WRF 模式对中国城市和半干旱地区气象要素的模拟检验和对比分析 [J]. *气象科学*, 31 (4): 484–492. Dong Junling, Han Zhiwei, Zhang Renjian, et al. 2011. Evaluation and analysis of WRF-simulated meteorological variables in the urban and semi-arid areas of China [J]. *Journal of the Meteorological Science (in Chinese)*, 31 (4): 484–492.
- 高岑, 王体健, 吴建军, 等. 2012. 2009 年秋季南京地区一次持续性灰霾天气过程研究 [J]. *气象科学*, 32 (3): 246–252. Gao Cen, Wang Tijian, Wu Jianjun, et al. 2012. Study on a continuous haze weather event during autumn of 2009 in Nanjing [J]. *Journal of the Meteorological Science (in Chinese)*, 32 (3): 246–252.
- 高媛媛, 何金海, 王自发. 2007. 城市化进程对北京区域气象场的影响模拟 [J]. *气象与环境学报*, 23 (3): 58–64. Gao Yuanyuan, He Jinhai, Wang Zifa. 2007. Simulation for impact of urbanization on meteorological conditions in Beijing area [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 23 (3): 58–64.
- Hu Xiaoming, Nielsen-Gammon J W, Zhang Fuqing. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49 (9): 1831–1844.
- Kain J S. 2004. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43 (1): 170–181.
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (1): 67–80.
- 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.
- 闵敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 2009. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究 [J]. *气候与环境研究*, 14 (2): 153–160. Min Min, Wang Pucai, Zong Xuemei, et al. 2009. Observation and study on aerosol properties in hazy days [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (2): 153–160.
- 潘本锋, 汪巍, 李亮, 等. 2013. 我国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因分析 [J]. *环境与可持续发展*, 38 (1): 33–36. Pan Benfeng, Wang Wei, Li Liang, et al. 2013. Analysis of the reason of formation and the characteristic of pollution about fog or haze at key cities in autumn and winter in China [J]. *Environment and Sustainable Development (in Chinese)*, 38 (1): 33–36.
- 彭应登. 2013. 北京近期雾霾污染的成因及控制对策分析 [J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 5 (3): 233–239. Peng Yingdeng. 2013. Analysis of the causes of recent Beijing haze pollution and its countermeasures [J]. *Journal of Engineering Studies (in Chinese)*, 5 (3): 233–239.
- Tie Xuexi, Wu Dui, Brasseur G. 2009. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou China [J]. *Atmos. Environ.*, 43 (14): 2375–2377.
- 吴兑. 2011. 灰霾天气的形成与演化 [J]. *环境科学与技术*, 34 (3): 157–161. Wu Dui. 2011. Formation and evolution of haze weather [J]. *Environmental Science and Technology (in Chinese)*, 34 (3): 157–161.
- 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 2008. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究 [J]. *应用气象学报*, 19 (1): 1–9. Wu Dui, Liao Guolian, Deng Xuejiao, et al. 2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (1): 1–9.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. *科学通报*, 58 (13): 1178–1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 58 (13): 1178–1187.
- 中国气象局. 2010. 霾的观测和预报等级 [S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2010. Observation and forecasting levels of haze (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press.
- 中华人民共和国环境保护部. 2012. 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行) [S]. 中国环境科学出版社. Ministry of Environmental Protection. 2012. Technical Regulation on Ambient Air Quality Index (on trial) (in Chinese) [S]. China Environmental Science Press.