

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 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 140–152, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13135. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog–haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 140–152.

2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析

高怡 张美根

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 2013 年 1 月 11~14 日, 华北地区经历重雾霾过程。为了探讨其形成原因, 利用大气化学模式系统 Weather Research and Forecasting (WRF)-Chem 模拟 2013 年 1 月华北地区气溶胶的时空变化。模拟的能见度、气象要素 (温度、湿度、降水、风速和风向) 以及细颗粒物 (PM_{2.5}, 大气中直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物) 地表浓度的时间变化与近地面观测值都较为吻合。模拟结果表明, 1 月 11~14 日, 细颗粒物高值分布于河北省南部和东部、天津地区以及北京地区, 其日均值约为 $400\sim 500\ \mu\text{g m}^{-3}$ 。通过与历史气候数据比较发现, 2013 年 1 月 10~15 日华北地区的气象条件表现为较大的相对湿度正距平 ($20\%\sim 40\%$) 以及风速的负距平 ($-1\ \text{m s}^{-1}$)。北京站点的探空数据还表明, 在 1 月 11~13 日期间, 垂直方向上, 1 km 以下的大气中存在明显的逆温层, 并且湿度保持较高的值 ($80\%\sim 90\%$)。模拟结果表明, 1 月 11~14 日, 近地面南向风和东向风将水汽输送到华北地区, 上层大气 (850 hPa) 的西北风则将沙尘输送到华北地区。以上气象条件有利于气溶胶的吸湿增长和浓度的聚集。硝酸盐的收支分析表明, 在北京地区, 与 1~9 日相比, 10~14 日夜间化学生成和传输的显著增加都贡献于硝酸盐浓度, 是重雾霾形成的主要原因。

关键词 雾霾 华北地区 WRF-Chem 气象条件

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0140-13

中图分类号 X16

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13135

Numerical Simulation of a Heavy Fog–Haze Episode over the North China Plain in January 2013

GAO Yi and ZHANG Meigen

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A heavy fog–haze episode occurred over the North China Plain during 11–14 January 2013. To investigate the reason for its formation, the Weather Research and Forecasting (WRF)–Chem model was applied to simulate the temporal and spatial distribution features of air pollutants during this fog–haze episode. Compared with observations, the model can reasonably predict temporal and spatial variation of visibility, meteorological conditions such as temperature, relative humidity (RH), wind, and precipitation, and the surface concentration of PM_{2.5} (particle matter $2.5\ \mu\text{m}$ or less in aerodynamic diameter) in January 2013 over the North China Plain. The model results show that during the study period, high PM_{2.5} persisted over southern and eastern parts of Hebei Province and the Tianjin and Beijing areas with the highest daily average value ranging from approximately $400\sim 500\ \mu\text{g m}^{-3}$. The analysis of historical climate data from 1951 to 2013 indicated a large positive anomaly ($20\%\sim 40\%$) of RH and a negative anomaly ($-1\ \text{m s}^{-1}$) of wind speed during the

收稿日期 2013-08-06 收到, 2013-11-27 收到修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 (B) XDB05030105、XDB05030102、XDB05030103

作者简介 高怡, 女, 1986 年出生, 助理研究员, 主要从事大气环境数值模拟研究。E-mail: ygao@mail.iap.ac.cn

study period. The sounding data also showed the presence of temperature inversion layers over Beijing with a difference of approximately 5 °C and high RH maintained at 80%–90% under 1 km. The model results show that during the study period, water vapor was transported with southerly or easterly wind over the near-surface layer and that dust aerosol was transported with northwesterly wind over the upper layer (850 hPa) to the North China Plain. Such meteorological conditions are favorable for the hygroscopic growth and accumulation of aerosols. The balance analysis of nitrate shows that over the Beijing area, a significant increase in chemistry and transport during the nighttime of 10–14 January 2013, contributed to nitrate concentration and the formation of heavy fog-haze.

Keywords Fog-haze, North China Plain, WRF-Chem, Meteorological condition

1 引言

近年来,雾天和灰霾天气[悬浮在空气中的大气气溶胶导致可察觉的能见度下降的一种天气现象 (Husar and Holloway, 1984)]在较发达地区和大型城市出现的频率越来越高。Kaiser and Qian (2002) 分析了 1954~1998 年中国气象局的 600 个观测台站处的每日温度、能见度和日照持续时间,发现日照持续时间在中国大陆特别是东半部地区,从 1980 年显著下降。Che et al. (2007, 2009) 分析了 1980~2005 年的中国 31 个不同省份的气象观测台站的能见度数据,认为在中国东部和西南部灰霾天气发生频率呈上升的趋势。王喜全等 (2013) 利用高时空密度机场逐时能见度和天气现象的历史数据,分析得出北京—天津—河北平原的大城市灰霾天气日数呈增加的趋势。孙彧等 (2013) 根据 1971~2010 年 567 个中国地面观测站点的雾日数和霾日数的资料,指出雾主要分布在东南沿海地区、四川盆地地区、湖南—贵州交界、山东沿海以及云南南部等地区,而霾主要集中于华北、河南以及珠三角和长三角地区,并且秋、冬季雾和霾的分布大于春、夏季。Zhang et al. (2012) 根据 681 个气象台站观测的能见度数据总结了我国灰霾高发地区有华北地区、长三角地区、珠三角地区以及四川盆地。樊文雁等 (2009) 分析了北京地区雾霾天气下气溶胶垂直分布观测数据,指出雾霾天细粒子主要来源于局地,表现为时空分布均匀的城市区域污染特征。闵敏等 (2009) 分析了河北香河县太阳光度计以及激光雷达数据,指出灰霾过程中气溶胶光学特性呈现散射能力增强,吸收能力减弱的特征。雾霾天气已经成为一种新型的灾害性天气,不仅仅导致能见度下降,给交通、人民生活带来不便,也对人类的身体健康有很大的危害 (Kunii et al., 2002)。2013 年 1 月期间,尤其是 11~14 日,在华北地区,中国气象局发布

了多次大雾黄色警报,中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台显示,北京、河北、山东等多地空气质量达严重污染,细颗粒物 (PM_{2.5}, 大气中直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物) 指数直逼最大值,中华人民共和国环境保护部公布的北京地区的空气污染指数也频繁在 300 之上,即为严重的空气污染 (<http://www.gz.chinanews.com/content/2013/01-13/25632.shtml>[2013-07-15])。

大量排放源 (Streets et al., 2001; Zhang et al., 2009) 排放出一次气溶胶和二次气溶胶的前体物,使经济发达地区大气气溶胶的浓度值增高 (Chan and Yao, 2008),是城市雾霾天气形成的主因。很多观测研究揭示了中国地区灰霾天气下的气溶胶浓度变化特征。Tan et al. (2009) 基于 2002~2003 年夏季和冬季灰霾日和非灰霾日的气溶胶观测数据,发现灰霾日的颗粒物主要是细颗粒物,其中二次颗粒物是主要的化学成分并且浓度显著增高,之后通过能见度和化学成分的相关分析指出在非灰霾日含碳气溶胶和硫酸盐气溶胶是主要成分而在灰霾日硝酸盐气溶胶和含碳气溶胶是主要成分,通过能见度和气象要素的相关分析指出在灰霾日,能见度随着温度和风速的上升而上升,随着相对湿度的增加而减小。Wang et al. (2006) 分析了 2001~2004 年北京城区春季灰霾天气和沙尘天气的细颗粒物和总悬浮颗粒物 (Total Suspended Particle, TSP) 的观测资料显示,在灰霾天气,硫酸铵、硝酸铵以及硝酸钙是气溶胶的主要成分,而在沙尘天气,碳酸钙、硫酸钙和硫酸铵则是主要成分。Cheng et al. (2011) 则分析了 2006 年 4 月至 2007 年 1 月的济南市灰霾日和非灰霾日的气溶胶观测资料发现, TSP、PM₁₀ (大气中直径小于等于 10 μm 的颗粒物) 和 PM_{1.8} (大气中直径小于等于 1.8 μm 的颗粒物) 在灰霾日是非灰霾日的 1.5~5.5 倍,而硫酸盐和硝酸盐的粒径分布都是双模态,其中细模态占主导地位。Li et al. (2011) 基于 2009 年 11 月 9~20 日的

华北地区的痕量气体和气溶胶的观测资料,指出在灰霾日氮氧化物、二氧化硫和一氧化碳是非灰霾日的 2~6 倍,而臭氧的变化不大,细颗粒物和黑碳气溶胶则是非灰霾日的 3 倍,并且结合 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 卫星真彩图,发现灰霾不仅覆盖城市工业区也覆盖了临近的乡村地区。除了高浓度的大气气溶胶,典型的天气形势和气象要素也是雾霾形成的主要影响因素。根据 Kohler 理论和观测研究,环境相对湿度对于气溶胶粒子是否吸湿增长成为霾滴或雾滴是非常重要的 (Xiao et al., 2011)。Wu et al. (2005) 分析广州地区观测的能见度数据表明在 2003 年 11 月 2 日的平均能见度不足 2 km,其中瞬时能见度低于 200 m,通过分析气象条件,指出由于广州市在当时台风的外围,大气底层出现较强的下沉运动,地表风速和边界层高度很低,使得气溶胶聚集在大气低层,无法扩散、浓度升高,致使能见度急剧降低。Ji et al. (2012) 分析了华北地区 PM₁₀ 的观测资料,发现在 2009 年 10 月 27 日至 11 月 10 日出现严重的大气污染,并且伴随着区域灰霾和低能见度,其中最高的 PM₁₀ 浓度出现在石家庄市,达到 600 $\mu\text{g m}^{-3}$,通过分析气象条件,指出天气形势和长距离输送是灰霾和大气污染主要的形成原因,低风速、逆温层以及低对流层高度使得颗粒物浓度升高。Han et al. (2013) 利用空气质量模式 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)-CMAQ (Community Multiscale Air Quality) 模拟了 2010 年 12 月的华北地区的一次空气污染事件,模拟结果表明在华北地区,低能见度 (小于 10 km) 主要是在北京、天津、河北和山东地区,敏感性试验表明低能见度主要是由局地污染聚集和长距离输送引起的高浓度的细颗粒物造成的,当细颗粒物浓度高于 75 $\mu\text{g m}^{-3}$ 的时候,易造成 10 km 以下的低能见度,并且硫酸盐和硝酸盐是两种主要的无机气溶胶成分,对消光的贡献可达 40%~50%。

如上所述,对雾霾天气的观测研究较多,而模式研究较少。为了对雾霾天气进行预报以及探讨其形成原因,本文应用 WRF (Weather Research and Forecasting)-Chem 大气化学数值模式对 2013 年 1 月华北地区的重雾霾过程进行模拟,将模拟所得的气象要素和能见度与观测值进行对比,再进一步对重雾霾过程个例的污染物和气象条件的时空分布特征进行详细分析,计算气溶胶的收支平衡,讨论

其成因。

2 观测数据

能见度和气象参数的观测数据来自于中国气象科学数据共享服务网,包括 1951~2013 年 1 月的各气象要素 (温度、湿度、降水、风速、风向、能见度) (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>[2013-04-01])。本文主要用到的是北京站点 (站号 54511, 39.96°N, 116.28°E) 和天津站点 (站号 54527, 39.10°N, 117.17°E),其中温度、湿度、降水、风速和风向为日均值,能见度为每天 4 次 (00:00、06:00、12:00、18:00,北京时间,下同) 的小时值。北京站的温度和湿度的气象探空资料来自于 <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> [2013-04-01]。污染物浓度的观测数据来自北京市环境监测中心发布的实时空气质量数据 (<http://zx.bjmemc.com.cn/>[2013-04-01]),本文所用的站点为奥体中心 (39.96°N, 116.40°E) 的细颗粒物地表浓度,其观测时间为 1 月 16~31 日。

3 模式介绍

WRF 模式是新一代的中尺度模式,与化学模块耦合之后,WRF-Chem 可以同时模拟痕量气体和气溶胶浓度以及气象场 (Grell et al., 2005),Chem 作为一个模块与 ARW 的动力计算部分具有相同的时间步长,在动力输送每次计算之前,Chem 模块中的化学模块和气溶胶模块都会计算一次。本文模拟水平区域 (见图 1) 为 90 (东西) × 80 (南北) 网格点,水平分辨率为 27 km,区域中心位于中国中部 (117°E, 36°N),覆盖中国中东部地区 (25°N~46°N, 101°E~134°E)。垂直方向有 35 层,最高至 10 hPa 处,约有 13 层在 2 km 以下。本文使用龙格库塔三阶时间积分方案,NOAH 陆面模式,Mellor-Yamada-Janjic 行星边界层方案,Grell-Devenyi 集合积云对流参数化方案,Lin 微物理过程方案,RRTMG 长波/短波方案。化学过程方面,本文使用 CBMZ (Carbon Bond Mechanism) 光化学机制,MOSAIC (Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry) 气溶胶方案。此气溶胶方案按粒径将气溶胶分为 8 个档位,在档位内假设气溶胶为内部混合、在档位外假设气溶胶为外部混合。模式所需的气象场的侧边界条件和初始条件由 NCEP 6 h

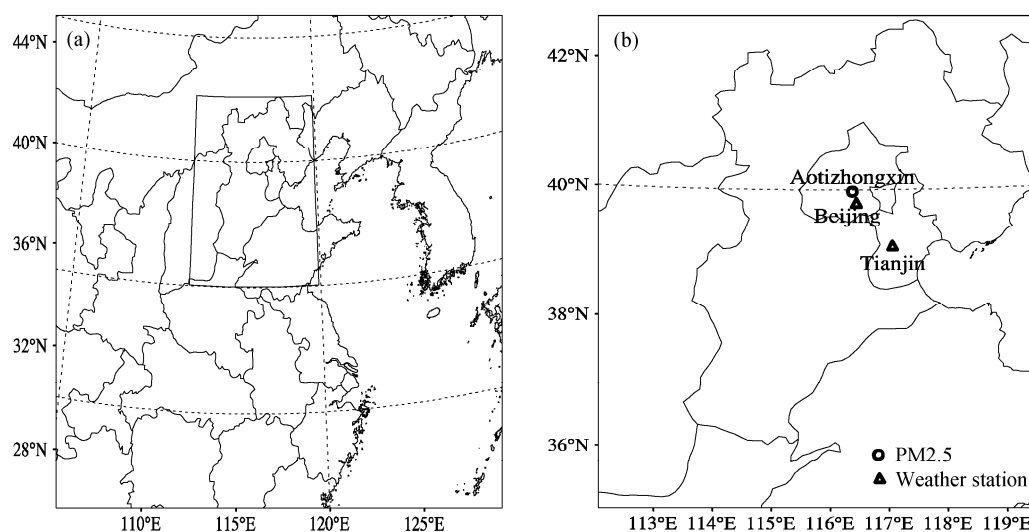


图 1 模拟区域以及各观测站点的位置

Fig. 1 The study domain and the locations of observation stations

间隔的 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 最终分析资料 (FNL) 提供。化学场的侧边界条件是 WRF-Chem 中的缺省值 (McKeen et al., 2003), 是来自于飞机观测的清洁大气和海洋上空的中纬度平均状态的无变化垂直廓线。

模式中考虑的气溶胶包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳、沙尘以及海盐气溶胶。模式中气溶胶的光学特性包括气溶胶消光系数 b_{ext} 、单次散射反照率 ω_0 , 非对称散射因子 g 的计算是基于 Mie 理论, 是波长 λ 以及三维位置 $\mathbf{x}$ 的函数。 b_{ext} 、 ω_0 和 g 的计算公式如下:

$$b_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{i=3} Q_e(x_i, \mathbf{x}) \pi r_i^2 n(r_i, \mathbf{x}), \quad (1)$$

$$\omega_0(\lambda, \mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} Q_s(x_i, \mathbf{x}) \pi r_i^2 n(r_i, \mathbf{x})}{b_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{x})} = \frac{b_s(\lambda, \mathbf{x})}{b_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{x})}, \quad (2)$$

$$g(\lambda, \mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} Q_s(x_i, \mathbf{x}) \pi r_i^2 n(r_i, \mathbf{x}) g'(x_i, \mathbf{x})}{b_s(\lambda, \mathbf{x})}, \quad (3)$$

其中, i 表示所在的模态, r_i 是湿半径, x_i 是粒径参数, n 是数浓度, b_s 是散射系数, Q_e 是消光效率, Q_s 是散射效率, g' 是中间不对称因子。 Q_e 、 Q_s 和 g' 的计算是基于 Ghan et al. (2001) 的参数化方法, 根据 Mie 理论, 是粒径参数化 $x=2\pi r/\lambda$ 的函数, 其中 r 是粒子的湿半径。例如, Q_e 有如下的 Chebyshev 多项式计算公式

$$Q_e(x) = \sum_{k=0}^{k=N} A_k T_k(x), \quad (4)$$

其中, $T_k(x)$ 是 k 阶的 Chebyshev 多项式。系数 A_k 取决于模态内的平均折射指数, 在每个模态中, 每种化学组分都对应一个复折射指数, 然后此模态的折射指数通过体积平均得到。为了减小计算量, 将折射指数划分为 7 组, 计算每组折射指数对应的一套 Chebyshev 扩展系数, 并对 Chebyshev 扩展系数使用双线性。将系数带入到公式 (4) 中, 计算消光效率, 进而计算消光系数 (Fast et al., 2006)。由于这种方法的计算量没有实时地对影响气溶胶光学性质的各种参数, 如尺度分布、相对湿度、入射波长进行灵活调整以适应实际模式的运算需要, 因此在计算上会存在一定误差。

模式中气溶胶的吸湿增长的描述则是以 Kohler 理论为基础, 每个模态内的吸湿增长由相对湿度、平均干半径、每种气溶胶成分对吸湿的贡献、以及上一个时间步长处气溶胶水的含量计算得出的。每个模态内的总的吸湿因子 B 由以下公式计算:

$$B = \frac{\sum_{j=1}^J (B_j q_j / \rho_j)}{\sum_{j=1}^J q_j / \rho_j}, \quad B_j = \frac{v_j \phi_j \varepsilon_j \rho_j M_w}{\rho_w M_j}, \quad (5)$$

其中, j 代表某种特定的化学成分, B_j 是每种化学成分的吸湿因子, q_j 是每种化学成分的质量混合比, v_j 是可溶粒子的数量, ϕ_j 是渗透参数, ε_j 是可溶质量比例, ρ_j 和 M_j 是气溶胶成分的密度和摩尔质量, ρ_w 和 M_w 是水的密度和摩尔质量。在模式中, 各气溶胶成分 (包括硫酸铵、海盐、沙尘、黑碳、有机碳) 的以上参数都参考观测值和经验值设定一个固

定值, 其中黑碳是假定为不可溶的物质, 吸湿因子很小。之后湿半径 r_w 就可由以下公式解出:

$$\ln R = \frac{A}{r_w} - \frac{Br_d^3}{(r_w^3 - r_d^3)}, \quad A = \frac{2M_w \sigma_{s/a}}{RT \rho_w}, \quad (6)$$

其中, R 为相对湿度, r_d 是干半径, A 是开尔文效应参数, $\sigma_{s/a}$ 是溶液滴表面张力, T 是温度。这种计算吸湿增长的方法由于对以上吸湿因子的各种参数都是给定固定值, 在相对湿度较高的时候, 计算结果会比较合理, 而相对湿度较低的时候, 计算结果会具有较大的不确定性。

CO (carbon monoxide)、氮氧化物 (NO_x , nitrogen oxides)、 SO_2 (sulphur dioxide)、挥发性有机化合物 (VOCs, volatile organic compounds)、黑碳 (black carbon, BC)、有机碳 (organic carbon, OC)、细颗粒物以及 PM10 的人为排放源是由清华大学提供的东亚地区 2010 年排放源月均值, 它由 4 个部分 (电力、工业、住宅和运输) 组成, 并根据 Wang et al. (2010) 的研究结果, 加入排放源的日变化信息。 NH_3 的排放源由 REAS (Regional Emission inventory for Asia domain, <http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d4/emission.htm> [2012-09-10]) 提供。由于东亚的人为排放源没有垂直分布信息, 因此, 排放源信息是作为模式中物种的最底层浓度。生物质燃烧排放源是来自 GFED (Global Fire Emissions Database, Version 3) 提供的 (van der Werf et al., 2010) 月均值。生物排放源是来自 MEGAN (Model of Emission of Gases and Aerosol from Nature) (Guenther et al., 2006)。沙尘排放源是在模式中实时计算的, 按照 Zhao et al. (2010)。

4 分析与讨论

4.1 模式验证与重雾霾过程模拟

表 1 是北京站和天津站气象要素和能见度的观测值和模拟值的统计分析。可以看到, 模式可以较好地模拟温度和湿度 (见图 2), 模拟值和观测值的相关系数都在 0.83~0.92 之间, 标准偏差约为 10%, 模式也可以模拟出 1 月 20~21 日之间两个站点有降水, 但是低估了日降水量。风速的模拟值和观测值之间的相关系数约在 0.4~0.6 之间, 模式低估了平均风速, 这可能是由于模式使用的下垫面资料比较陈旧。模式对最大风速的模拟较好, 也合理地模拟了最大风速的风向的日平均值。总体来说, 模式合理地模拟了 2013 年 1 月各气象要素的变化特征, 这是模拟化学场的基础。

2013 年 1 月华北地区北京站和天津站能见度的模拟值由经验公式 $v_{is}=3.912/e_{xt}$ 计算得到 (Seinfeld and Pandis, 1998), 其中 e_{xt} 表示气溶胶消光系数, 一般取 550 nm 处的气溶胶消光系数, 因此能见度的模拟值和观测值的对比 (见图 3) 也代表了模式对气溶胶的模拟效果。图 4 是 2013 年 1 月奥体中心站处观测的细颗粒物地表浓度小时值以及相应的模拟值。奥体中心站和北京站地理位置相近 (图 1)。由图 3 和表 1 可以看到, 模式可以较好地模拟各站点处的能见度的小时值变化特征: 在北京站和天津站处, 能见度的模拟值与观测值之间的相关系数分别为 0.72 和 0.60, 平均偏差分别为 -21.5% 和 31.6%, 这也说明模式对气溶胶浓度和

表 1 2013 年 1 月北京站和天津站气象要素和能见度的观测值和模拟值的统计分析

Table 1 Statistical analysis of the simulated and observed meteorological elements and visibilities at Beijing and Tian stations in Jan 2013

	样本数	观测的平均值	模拟的平均值	模拟值和观测值的相关系数	平均偏差	正态平均偏差	均方根误差
温度	北京 31	-4.6 °C	-5.0 °C	0.83	-0.4	8.7%	1.5
	天津 31	-4.7 °C	-5.3 °C	0.92	-0.6	12.8%	1.4
相对湿度	北京 31	60.8%	66.8%	0.83	5.9	9.8%	12.9
	天津 31	66.6%	73.9%	0.86	7.3	11.0%	12.2
平均风速	北京 31	1.7 m s ⁻¹	2.6 m s ⁻¹	0.42	0.86	48.9%	1.3
	天津 31	2.2 m s ⁻¹	3.5 m s ⁻¹	0.60	1.30	58.0%	1.7
最大风速	北京 31	3.8 m s ⁻¹	3.87 m s ⁻¹	0.53	0.06	1.8%	1.5
	天津 31	4.9 m s ⁻¹	4.8 m s ⁻¹	0.44	-0.10	-2.1%	2.2
最大风速的风向	北京 31	194.5°	208.2°	0.16	13.7	7.0%	118.5
	天津 31	204.0°	280.8°	0.16	76.9	37.7%	140.8
能见度	北京 124	10.39 km	10.41 km	0.76	0.02	0.2%	6.16
	天津 122	9.68 km	7.35 km	0.60	2.32	31.6%	6.91

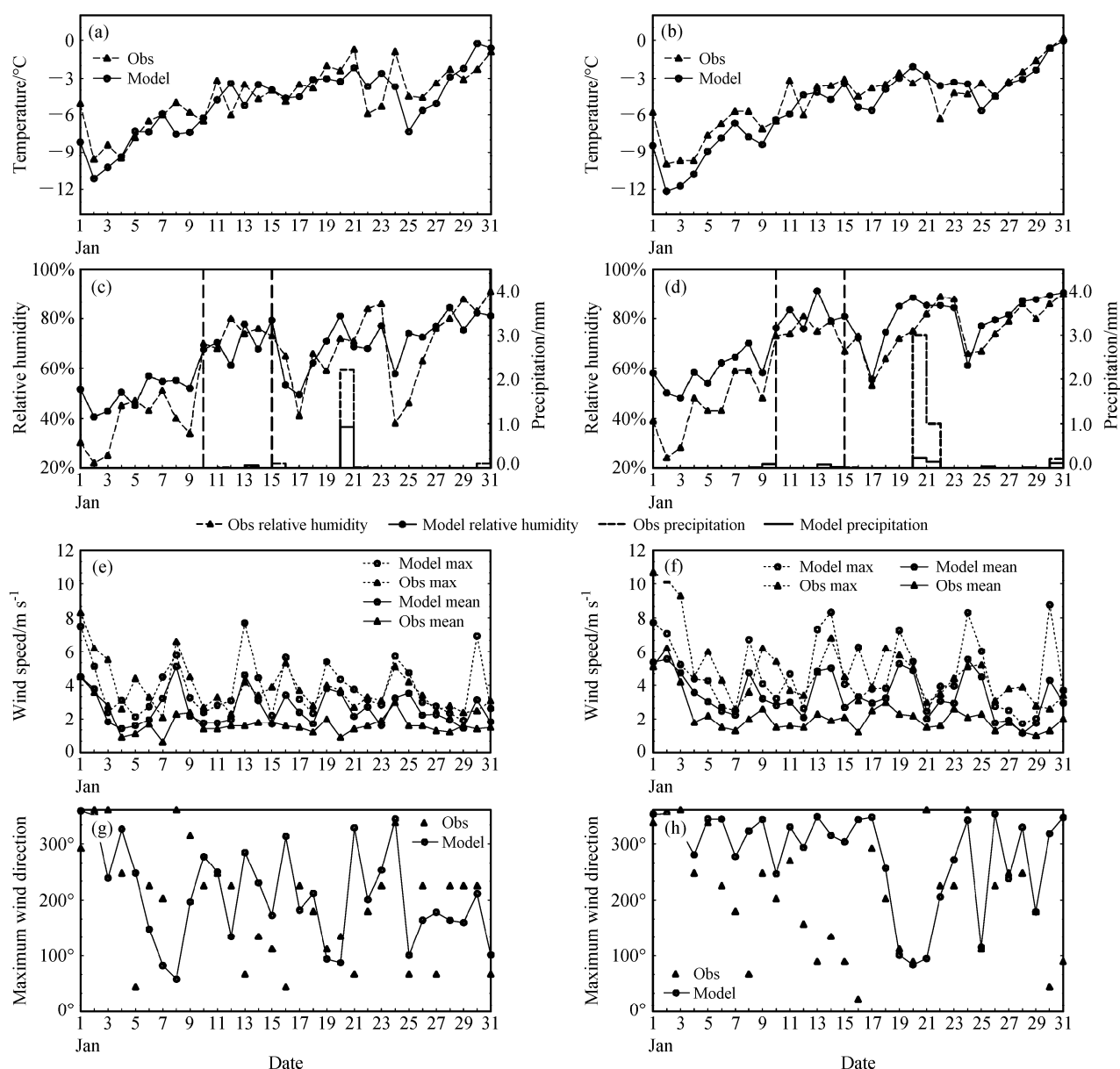


图 2 2013 年 1 月华北地区北京站 (左列) 和天津站 (右列) 观测和模拟的 (a、b) 温度日平均值、(c、d) 相对湿度日平均值和日降水量、(e、f) 风速和最大风速的日平均值、(g、h) 最大风速的风向的日平均值

Fig. 2 observed and simulated (a, b) daily averaged temperature, (c, d) daily averaged relative humidity and daily precipitation, (e, f) daily averaged wind speed and daily averaged maximum wind speed, and (g, h) daily averaged wind direction of maximum wind speed at Beijing (left panel) and Tianjin (right panel) stations in Jan 2013

光学特性模拟较好。在奥体中心站点, 细颗粒物观测值缺失较多, 但是可以看到 16~31 日模拟值与观测值大体吻合, 其中 22 日、29~31 日的细颗粒物地表浓度小时值被模式高估, 22 日的高估可能是由于 22 日的降水量被模式低估 (图 2c)。从图 3a 中可以看到, 北京站点处的模拟值和观测值均显示 1 月 4 日和 6 日夜, 10~14 日、16 日夜、17~19 日、20~23 日、27~31 日, 北京站点能见度低于 10 km, 其中 11~13 日 12 个时次观测的能见度

有 8 个时次的在 0.6~2.5 之间; 相应的, 10~14 日的日均相对湿度 (图 2c) 为 68%~80%, 并且模式模拟的 10~14 日期间每天的相对湿度小时值在一些时次处是在 80%~90% 之间, 显示这段时间为重雾霾或雾霾混合的过程。图 3b 中, 天津站的能见度变化和北京站类似, 表明 1 月的重雾霾过程是区域性的。从图中可以看出, 模拟值对能见度的高估主要是出现在 14~15 日夜、19~20 日夜、22 日、24~25 日夜能见度较好的时候, 例如观测值

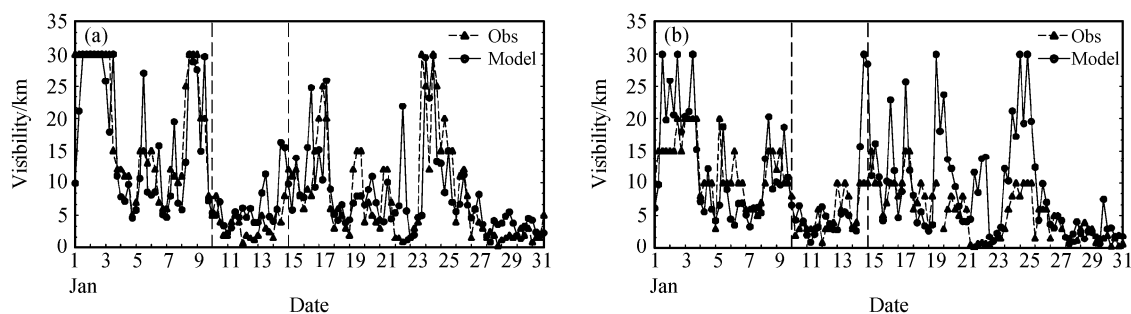


图3 2013年1月华北地区(a)北京站和(b)天津站观测的能见度以及相应的模拟值

Fig. 3 Observed and simulated hourly visibility at (a)Beijing and (b) Tianjin stations in Jan 2013

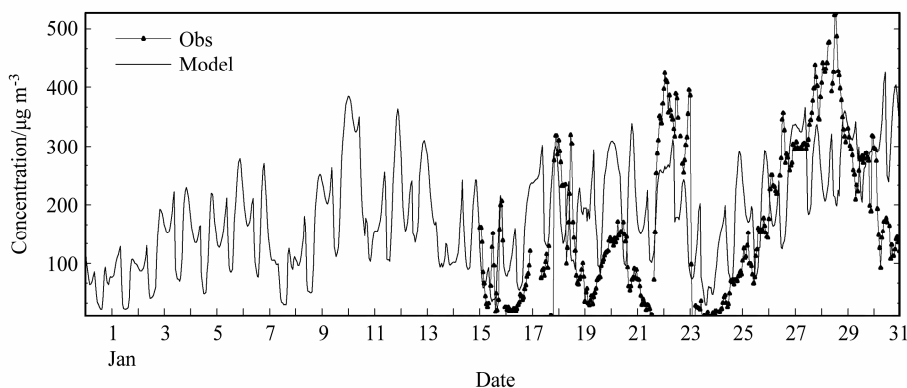


图4 2013年1月北京奥体中心站点观测的细颗粒物地表浓度小时值以及相应的模拟值

Fig. 4 Observed and simulated hourly PM2.5 surface concentration at Aotizhongxin station, Beijing in Jan 2013

为 10 km 而模拟值则是 30 km, 这说明模式模拟的气溶胶浓度可能过低。由图 2 中天津站风速的模拟可以看出, 最大风速的高估可能对气溶胶浓度的低估有一定的贡献。另外天津站处的模式格点的代表性也是模拟值和观测值的对比存在差异的原因之一。在图 4 中, 奥体中心站点处的模拟的细颗粒物地表浓度和北京站点处的能见度的变化对应得较好, 在上述能见度低于 10 km 的时间点, 模拟的地表浓度值都比较高, 尤其是在夜间, 细颗粒物地表浓度都达到峰值, 均大于 $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 。本文将 10~14 日作为重雾霾过程的个例, 进行详细的讨论。

由图 5 可以看到, 此次重雾霾过程从 10 日晚上开始, 细颗粒物浓度在河北省南部和东部最高, 可达 $360\sim 500 \mu\text{g m}^{-3}$; 在天津地区也很高, 达到 $280\sim 360 \mu\text{g m}^{-3}$; 在北京市区则达到 $200\sim 280 \mu\text{g m}^{-3}$ 。1 月 11 日 00:00 和 06:00, 细颗粒物地表浓度升高, 河北省南部和东部、天津地区和北京市区, 均增高到 $360\sim 500 \mu\text{g m}^{-3}$ 。1 月 11 日 12:00、18:00, 细颗粒物地表浓度的高值区域向南移, 主要分布于河北省南部、东部和天津地区 ($320\sim 500 \mu\text{g m}^{-3}$), 而在北京地区则降低到 $80\sim 240 \mu\text{g m}^{-3}$ 。之后从 12

日 18:00 至 14 日 00:00, 细颗粒物地表浓度的高值区都是在 18:00 和 00:00 北移, 使得北京市区细颗粒物地表浓度增高, 而在 06:00 和 12:00 则分布于河北省南部。14 日 12:00、18:00 和 15 日 00:00 和 06:00, 细颗粒物地表浓度在华北地区有所降低, 高值区只分布于河北省最南部, 约为 $240\sim 400 \mu\text{g m}^{-3}$, 在其他区域则为 $40\sim 160 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

4.2 重雾霾过程气象条件分析

张小曳等 (2013) 对比了 2013 年 1 月 6~16 日之前和期间的欧亚地区地面天气图, 指出持续性雾霾天气的气象条件与前期最大的不同是中纬度地区径向型环流较弱, 没有明显的冷空气, 南方暖湿气流相对增强, 中东部地区处于弱的均压区。因此, 分析雾霾过程的气象条件对于理解其成因十分必要。首先, 将 2013 年 1 月各气象要素与历史平均值进行比较, 图 6 是 2013 年 1 月华北地区北京站和天津站处观测的温度、湿度、风速和最大风速的日平均值相对历史气候平均值 (1951~2013 年) 的距平。由图 6a 可以看出, 2013 年 1 月 10~16 日、18~23 日以及 26~31 日, 北京站相对湿度具有正距平, 比历史平均值偏高 20%~40%, 有利于气溶

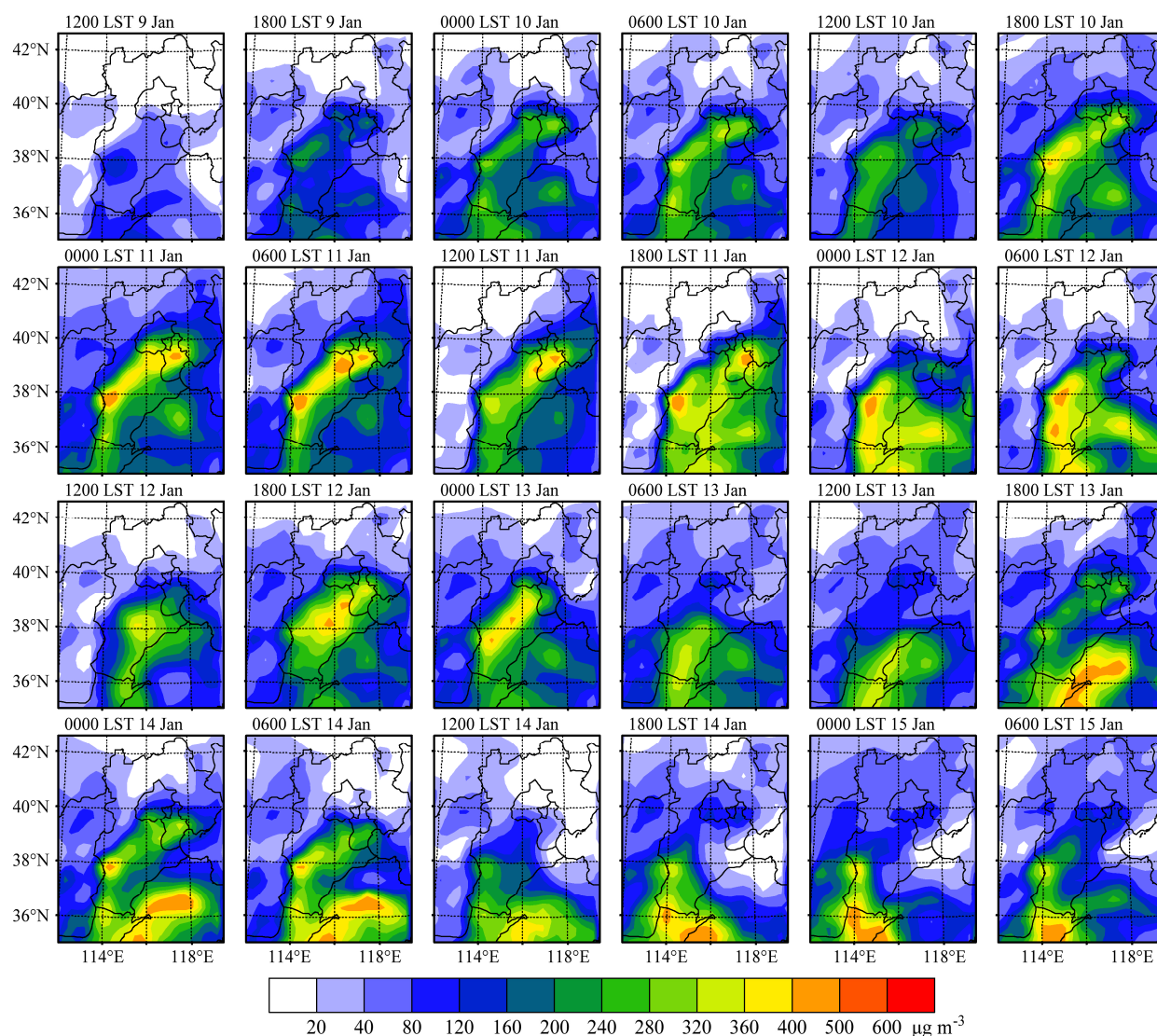


图 5 2013 年 1 月 9~15 日 00:00、06:00、12:00 和 18:00 的细颗粒物地表浓度的水平分布

Fig. 5 The spatial distributions of PM_{2.5} surface concentration at 0000 LST, 0600 LST, 1200 LST, and 1800 LST during 9–15 Jan 2013

胶粒子的吸湿增长, 因此高的相对湿度除了与 22 日的降水对应之外, 都对应了较低的能见度和较高的细颗粒物地表浓度; 温度与历史平均值相比, 相差不大; 风速与历史平均值相比, 在以上湿度正距平的时间点处, 平均风速偏低 1 m s^{-1} , 而最大风速则偏低约 3 m s^{-1} , 因此风场不利于污染物的扩散。天津站的湿度同样是正距平, 温度变化不大, 风速的负距平要比北京站小。

从图 7 中可以看到, 1 月 11 日 08:00 大气层底部出现逆温层, 温度差约有 4°C , 20:00 500 m 以下逆温层已经十分明显, 温度相差约有 5°C , 这种情况持续到 12 日 08:00、1000 m 以下有约 6°C 的逆温层, 12 日 20:00, 逆温层消失, 但是到 13 日 08:00

500 m 以下再次出现约 9°C 的逆温层, 并且在 20:00 1 km 以下仍然保持逆温层的状态。14 日和 15 日, 逆温层消失。由以上描述可以看到, 持续的强逆温层使得大气层处于稳定的状态, 不利于污染物的扩散。对于湿度的垂直分布, 同样的, 在 1 月 10 日 08:00 和 20:00、11 日 20:00、12 日 20:00、13 日 08:00 以及 14 日的 08:00 和 20:00, 1 km 以下的大气层都呈现较高的湿度 ($70\%\sim 90\%$), 这说明在垂直方向上一整层的大气都在连续几天保持着较高的湿度, 这有利于气溶胶的吸湿增长。

由图 8 可以看到, 相对湿度和风向的变化和细颗粒物地表浓度的变化是相互对应的。10 日 12:00 之前, 河北省北部、天津地区和北京地区受西北风

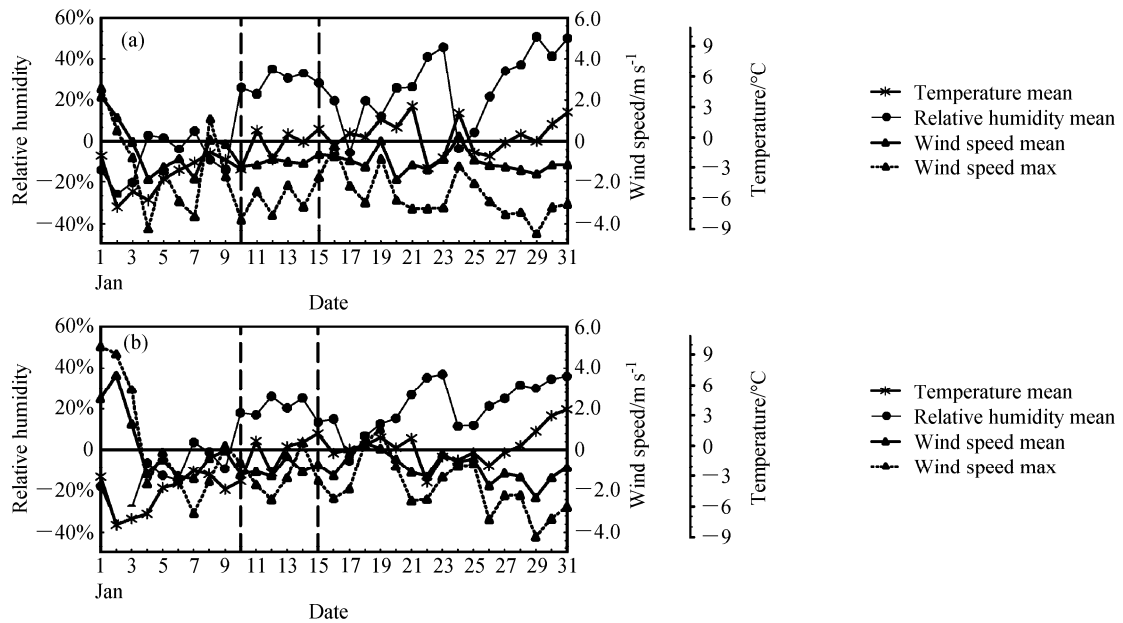


图6 2013年1月华北地区(a)北京站和(b)天津站点处观测的温度、相对湿度、风速和最大风速的日平均值与相应的历史气候平均值(1951~2013年)的距平
Fig. 6 Time series of the anomaly of observed daily averaged temperature, relative humidity, wind speed, and maximum wind speed to historical climate data at (a) Beijing and (b) Tianjin stations over North China in Jan 2013

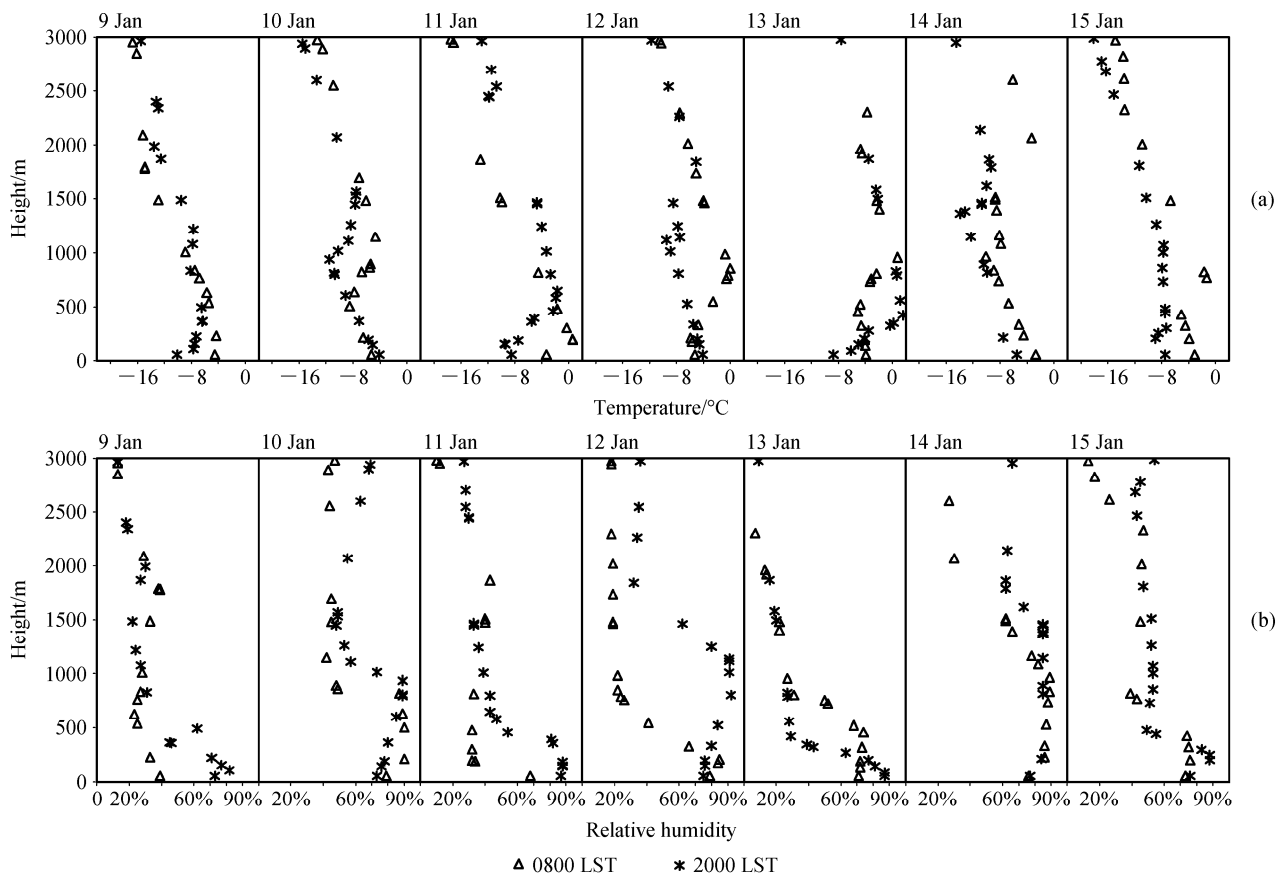


图7 2013年1月9~15日08:00和20:00北京站点处观测的(a)温度和(b)相对湿度垂直分布
Fig. 7 Vertical distributions of (a) temperature and (b) relative humidity at 0800 LST and 2000 LST at Beijing station during 9–15 Jan 2013

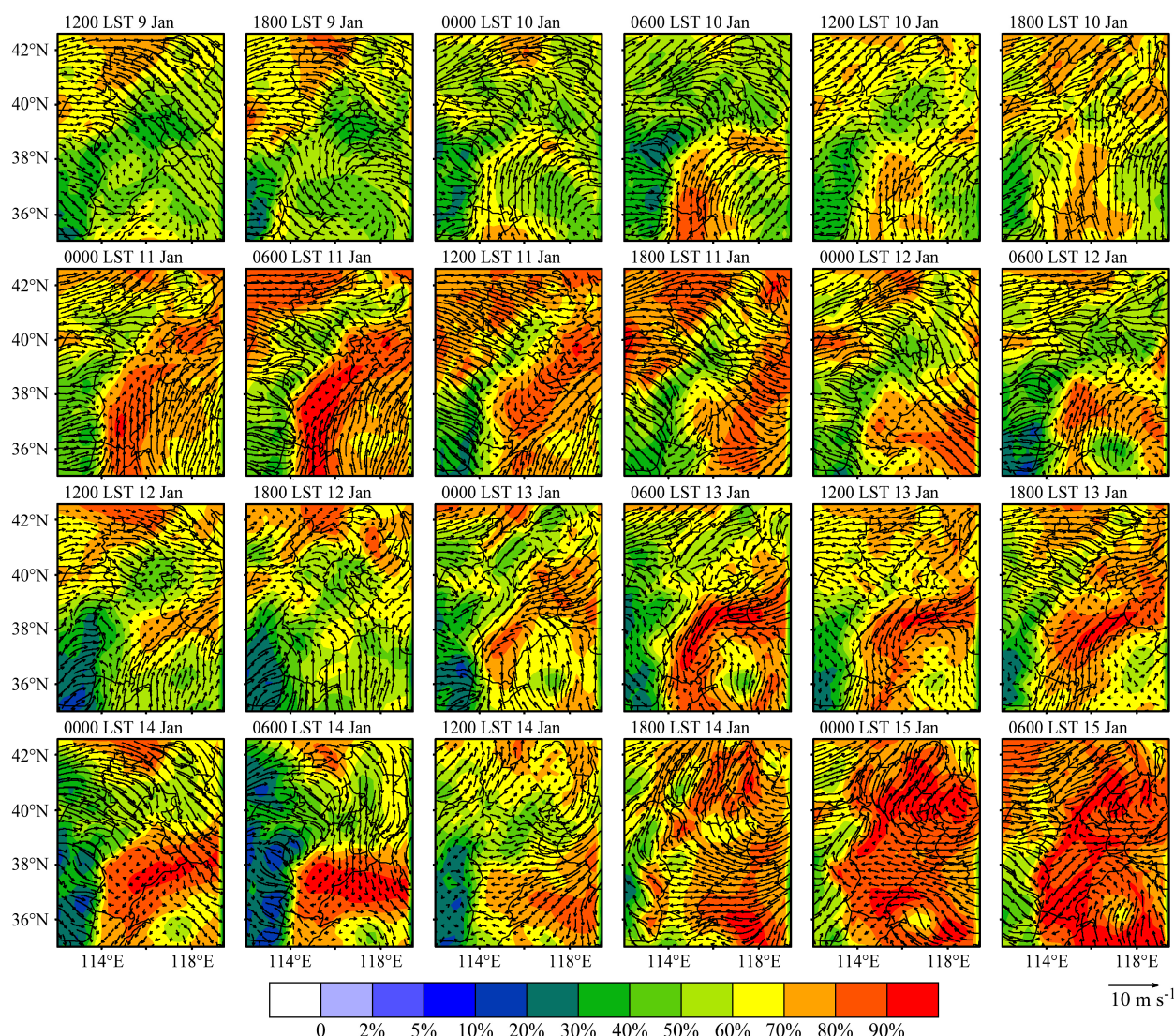


图 8 2013 年 1 月 9~15 日 00:00、06:00、12:00 和 18:00 的地表相对湿度和风场的水平分布

Fig. 8 Spatial distributions of surface relative humidity and wind fields at 0000 LST, 0600 LST, 1200 LST, and 1800 LST during 9–15 Jan 2013

影响, 相对湿度较低, 在大部分区域约为 30%~50%。10 日 12:00 和 18:00, 华北地区没有明显的西北风, 河北省、天津地区和北京地区风向转变为南风, 且风速较小, 相对湿度在大部分地区增加至 60%~80%, 此时华北地区的细颗粒物浓度也开始增加 (图 4)。1 月 11 日 00:00 和 06:00, 河北南部、北京地区和天津地区仍然是南向风, 且河北省南部风速增大, 相对湿度增加至 70%~90%, 此时上述地区的细颗粒物地表浓度也增高到 $360\sim500\ \mu\text{g m}^{-3}$ (图 4)。1 月 11 日 12:00、18:00 和 12 日 00:00、06:00、12:00, 北京地区又出现西北风, 相对湿度减小, 而河北省南部仍然是南向风和高湿度, 相应的细颗粒物地表浓度的高值区南移 (图 4)。之后从

12 日 18:00 至 14 日 00:00, 河北省南部、天津地区和北京地区变为受东向和东南向风影响, 由于渤海湾的水汽传输, 华北地区的相对湿度再次增加至 70%~90%, 特别是北京地区在 13 日 18:00 相对湿度明显增加, 相应的细颗粒物地表浓度值也在这个时段变得更高 (图 4)。14 日 06:00, 华北地区出现明显的北风, 且风速较大, 相应地, 此时的细颗粒物浓度减小。

4.3 重雾霾过程沙尘气溶胶的传输

一些卫星的观测研究表明 (Tao et al., 2012), 冬季盛行的西北风能够频繁地把沙尘传输到华北地区上空, 虽然规模要比沙尘暴小很多, 但是这种沙团会与较高背景浓度的人为污染物快速混合, 形

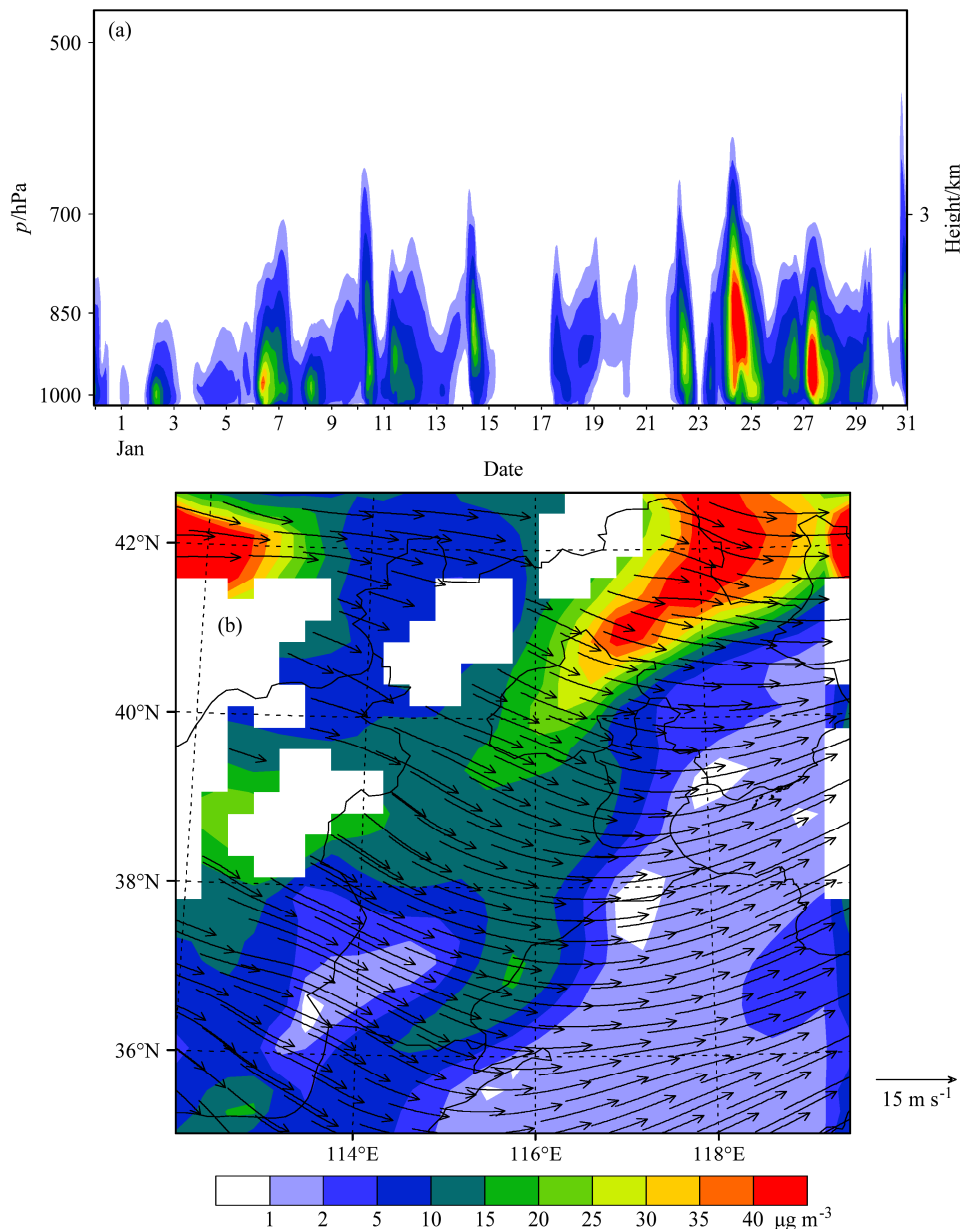


图9 2013年(a)1月北京地区区域平均的沙尘气溶胶浓度的垂直分布的时间变化和(b)1月11日12:00华北地区850 hPa处沙尘气溶胶和风场的水平分布

Fig. 9 (a) Time serial of the vertical distribution of dust concentration averaged over the Beijing area in Jan 2013 and (b) the spatial distribution of dust concentration and wind field at 850 hPa at 1200 LST 11 Jan 2013

成霾污染。图9是北京地区区域平均的沙尘气溶胶的垂直分布的时间变化以及1月11日12:00 850 hPa 沙尘气溶胶和风场的水平分布。可以看到, 沙尘浓度较高的时间中, 11~13日、23日、28日都对应较高的细颗粒物浓度(图9a)。可以看到11日12:00, 850 hPa层上是西北风, 将沙尘传输到华北地区(图9b)。因此, 在10~14日, 近地面的南向风或东向风传输水汽, 高空西北气流传输沙尘, 两者的叠加可能加剧了华北地区的重雾霾过程。这其

中的机制还需要更加深入的讨论。

4.4 重雾霾过程污染物的收支分析

为了说明重雾霾期间的输送和化学过程的相对贡献, 需要计算污染物的浓度的收支。重雾霾过程期间气溶胶的成分包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳以及沙尘气溶胶。以往针对硫酸盐的分析有很多, 而重雾霾期间的一些观测研究(张小曳等, 2013)则表明雾霾期间硝酸盐的浓度也是很高的, 另一方面硝酸盐气溶胶联系着机动车排放

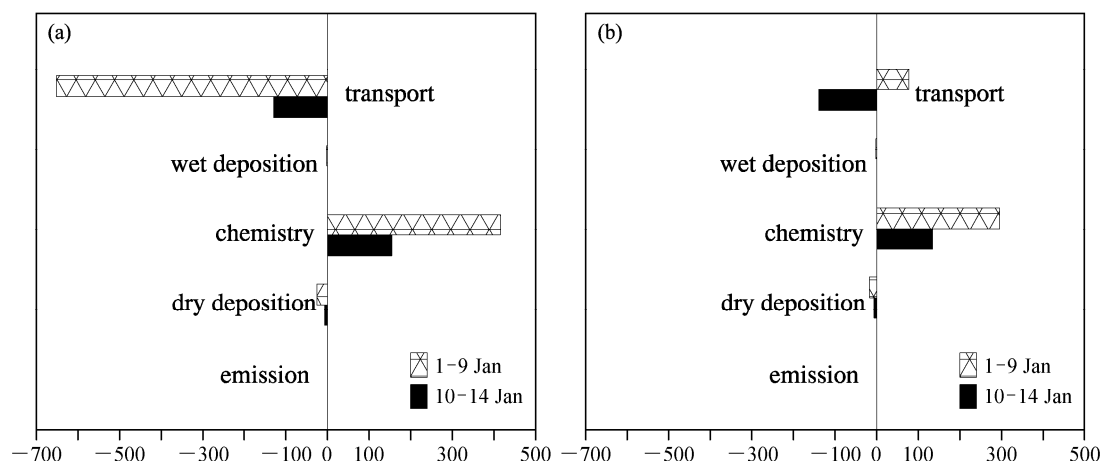


图 10 2013 年 1 月 1~9 日和 10~14 日北京地区 (a) 白天和 (b) 夜晚硝酸盐气溶胶 (单位: t d^{-1}) 的收支平衡

Fig. 10 The budgets (t d^{-1}) of NO_3^- in (a) daytime and (b) night over the Beijing area during 1-9 Jan and 10-14 Jan 2013

源,也是公众比较关心的焦点问题,因此将其作为一个个例来研究。另外,黑碳气溶胶的化学过程较少,而有机碳气溶胶目前在模式中的描述还不是很完备,考虑到计算收支的目的是为了说明重雾霾期间的输送和化学过程的相对贡献,最终选择硝酸盐气溶胶作为计算收支的对象。

由图 4 可以看到,1~9 日细颗粒物浓度较低,因此可将这两个时段的收支做对比。从图 10a 中可以看出,白天,1~9 日和 10~14 日,传输是北京地区硝酸盐气溶胶浓度降低的主要贡献因子,而化学过程是硝酸盐气溶胶浓度增加的主要贡献因子。在夜晚,此时细颗粒物浓度达到峰值(图 4 和图 10b),1~9 日,传输仍然是降低了硝酸盐浓度,但是在 10~14 日则是增加了硝酸盐浓度。对比 1~9 日和 10~14 日的收支平衡,可以发现无论是白天还是夜间,10~14 日硝酸盐气溶胶的化学生成显著增加。在排放源浓度基本相同的情况下,不同的气象条件使得 10~14 日二次气溶胶的生成剧烈增加,加上传输的贡献,形成了这个时间段的非常高的细颗粒物浓度。

5 结论

本文利用大气化学模式系统 WRF-Chem 模拟 2013 年 1 月华北地区气溶胶的时空变化。模拟的能见度、气象场(温度、湿度、降水、风速和风向)以及细颗粒物浓度的时间变化与近地面观测值都较为吻合。模拟结果表明,1 月 11~14 日,细颗粒物高值分布于河北省南部和东部、天津地区以及北

京地区,其日均值约为 $400\sim 500 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

通过与历史气候数据比较发现,2013 年 1 月 10~15 日华北地区的气象条件表现为较大的相对湿度正距平($20\%\sim 40\%$)以及风速的负距平(-1 m s^{-1})。北京站点的探空数据还表明,在 1 月 11~13 日期间,垂直方向上,1 km 以下的大气中存在明显的逆温层,并且湿度保持较高的值($80\%\sim 90\%$)。模拟结果表明,1 月 11 日~14 日,近地面南向风和东风将水汽输送到华北地区,上层大气(850 hPa)的西北风则将沙尘输送到华北地区。以上气象条件有利于气溶胶的吸湿增长和浓度的聚集。

收支分析表明,在北京地区,与 1~9 日相比,10~14 日夜间化学生成的显著增加和传输都贡献于硝酸盐浓度,是重雾霾形成的主要原因。

参考文献 (References)

- Chan C K, Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (1): 1-42.
- Che H, Zhang X, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981 - 2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24706. doi:10.1029/2007GL031450.
- Che H, Zhang X, Li Y, et al. 2009. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981 - 2005 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 97: 235-242.
- Cheng S H, Yang L X, Zhou X H, et al. 2011. Size-fractionated water-soluble ions, situ pH and water content in aerosol on hazy days and the influences on visibility impairment in Jinan, China [J]. *Atmos. Environ.*, 45 (27): 4631-4640.
- 樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 2009. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测 [J]. *气候与环境研究*, 14 (6): 631-638, doi:10.3878/

- j.issn.1006-9585.2009.06.06. Fan Wenyan, Hu Bo, Wang Yuesi, et al. 2009. Measurements on the vertical distribution of PM_{2.5} concentration in fog and haze days in Beijing city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 631–638.
- Fast J D, Gustafson Jr. W I, 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.
- Ghan S, Laulainen N, Easter R, et al. 2001. Evaluation of aerosol direct radiative forcing in MIRAGE [J]. J. Geophys. Res., 106 (D6): 5295–5316.
- 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.
- 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) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 6 (11): 3181–3210.
- Han X, Zhang M, Tao J, et al. 2013. Modeling aerosol impacts on atmospheric visibility in Beijing with RAMS-CMAQ [J]. Atmos. Environ., 72: 177–191.
- Husar R B, Holloway J M. 1984. The properties and climate of atmospheric haze [M]// Ruhnke L H, Deepak A, Eds. Hygroscopic Aerosols. Deepak, Hampton, VA, USA.
- Ji D S, Wang Y S, Wang L L, et al. 2012. Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China [J]. Atmos. Environ., 50: 338–348, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.11.053.
- Kaiser D P, Qian Y. 2002. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954–1998: Indication of increased haze pollution? [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (21): 2042, doi:10.1029/2002GL016057.
- Kunii O, Kanagawa S, Yajima I, et al. 2002. The 1997 haze disaster in Indonesia: Its air quality and health effects [J]. Archives of Environmental Health, 57 (1): 16–22.
- Li W J, Zhou S Z, Wang X F, et al. 2011. Integrated evaluation of aerosols from regional brown hazes over northern China in winter: Concentrations, sources, transformation, and mixing states [J]. J. Geophys. Res., 116: D09301, doi:10.1029/2010JD015099.
- McKeen S A, Eder B, Grell G A, et al. 2003. Evaluation of prototype air quality forecast models—Chemistry [R]. NOAA/OAR report.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.02.05. 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.
- van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, et al. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (23): 11707–11735.
- Seinfeld J, Pandis S. 1998. Atmospheric Chemistry and Physics [M]. New York, USA: Wiley.
- Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. 2001. Black carbon emissions in China [J]. Atmos. Environ., 35 (25): 4281–4296.
- 孙斌, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 397–406, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12170. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 397–406.
- Tan J H, Duan J C, Chen D H, et al. 2009. Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. Atmospheric Research, 94 (2): 238–245.
- Tao M H, Chen L F, Su L, et al. 2012. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain [J]. J. Geophys. Res., 117 (D12), doi:10.1029/2012JD017915.
- Wang X Y, Liang X Z, Jiang W M, et al. 2010. WRF-Chem simulation of East Asian air quality: Sensitivity to temporal and vertical emissions distributions [J]. Atmos. Environ., 44 (5): 660–669.
- 王喜全, 孙明生, 杨婷, 等. 2013. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 165–170, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11094. Wang Xiquan, Sun Mingsheng, Yang Ting, et al. 2013. Interdecadal change in frequency of dust–haze episodes in North China Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(2): 165–170.
- Wang Y, Zhuang G, Sun Y, et al. 2006. The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing [J]. Atmos. Environ., 40 (34): 6579–6591.
- Wu D, Tie X, Li C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmos. Environ., 39 (35): 6568–6577.
- 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 [J]. Aerosol and Air Quality Research, 11 (7): 873–882.
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14): 5131–5153.
- 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 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12 (2): 779–799.
- 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.
- Zhao C, Liu X, Leung L R, et al. 2010. The spatial distribution of mineral dust and its shortwave radiative forcing over North Africa: Modeling sensitivities to dust emissions and aerosol size treatments [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (18): 8821–8838, doi: 10.5194/acp-10-8821-2010.