

刘丽丽, 王莉莉. 2015. 天津冬季重霾污染过程及气象和边界层特征分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 129-140, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14096. Liu Lili, Wang Lili. 2015. Characteristics of winter heavy pollution episodes and meteorological causes and structures of boundary layer in Tianjin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (2): 129-140.

天津冬季重霾污染过程及气象和边界层特征分析

刘丽丽¹ 王莉莉²

¹ 天津市气象科学研究所, 天津 300074

² 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 京津冀大气灰霾污染严重, 天津市作为其核心组成之一其污染形势亦严峻。选取 2013 年 2 月 20~28 日天津重霾污染时段 7 站 PM_{2.5} (空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 即细颗粒物) 和气象污染物数据, 结合北京污染数据、地面气象要素、能见度、边界层温湿和风廓线、后向轨迹, 深入分析重霾污染过程特征及气象和边界层成因。结果显示, 研究时段天津 PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 浓度均值为 150、87、56、2.4 和 22 $\mu\text{g m}^{-3}$, 气象污染物各站差异显著, 但仅有 SO₂ 全面超过国家空气质量一级标准 (50 $\mu\text{g m}^{-3}$), 而 PM_{2.5} 具有区域同步变化特征, 且严重超标, 是一级标准 (35 $\mu\text{g m}^{-3}$) 的 2~8 倍, 最高小时均值高达 364 $\mu\text{g m}^{-3}$; 高浓度 PM_{2.5} 是导致低能见度的主因, 能见度小于 10 km 对应 PM_{2.5} 阈值为 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。弱风和高湿度导致局地排放累积, PM_{2.5} 始增, 在高湿度条件下, 持续偏南风促使其稳步增加, 配合弱北风和弱东风 PM_{2.5} 震荡上扬, 污染高值阶段, 南北气流短时迅速切换, 区域污染传输叠加污染的循环累积, PM_{2.5} 浓度峰值达到最高; 除因边界层强东风导致的平流逆温外, 高浓度 PM_{2.5} 与平流逆温密切相关; 高污染时段高湿主要集中在 500 m 以下, 且随高度递减幅度较大; 位于 200~600 m 的低空急流一定程度抑制污染上升, 尤其持续强东风使 PM_{2.5} 浓度稳步降低到二级水平, 污染迅速有效清除最终依赖整层的强西北风。北京、环绕天津的河北中部和西南部地区对天津重污染有显著贡献。

关键词 天津 PM_{2.5} 能见度 气象要素 廓线

文章编号 1006-9585 (2015) 02-0129-12

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14096

Characteristics of Winter Heavy Pollution Episodes and Meteorological Causes and Structures of Boundary Layer in Tianjin

LIU Lili and WANG Lili

¹ Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074

² State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The Beijing-Tianjin-Hebei area, including Tianjin, incurs severe haze pollution. In this study, the mass concentrations of PM_{2.5} and gaseous pollutants for seven sites in Tianjin, together with pollutants in Beijing, ground meteorological factors, visibility, temperature, and humidity profiles, wind profiles, and backward trajectories during 20–28 February 2013, are used to analyze the pollution characteristics, meteorological causes, and boundary layer characteristics of heavy haze episodes. The average concentrations of PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, and O₃ were 150, 87, 56, 2.4, and 22 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively. Although the variation of gaseous pollutants in different sites was large and significant,

收稿日期 2014-05-12; **网络与出版日期** 2014-10-21

资助项目 国家自然科学基金项目 41230642, 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) XDB05020203, 欧盟 PANDA 项目 606719

作者简介 刘丽丽, 女, 1983 年出生, 博士, 主要研究方向为污染气象学。E-mail: lililiuwu@126.com

通讯作者 王莉莉, E-mail: wll@mail.iap.ac.cn

only SO_2 concentrations were in non-attainment, according to air quality grade limit of $50 \mu\text{g m}^{-3}$. The $\text{PM}_{2.5}$ variation over various sites in Tianjin showed regional and synchronous characteristics. $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during the research period far exceeded the grade limit value of $35 \mu\text{g m}^{-3}$ and were 2–8 times higher, with a maximal hourly mean of $364 \mu\text{g m}^{-3}$. High $\text{PM}_{2.5}$ concentration is a key factor contributing to low visibility; the threshold $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration, corresponding to visibility $<10 \text{ km}$, is $50 \mu\text{g m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ concentration began to increase because of the local emission accumulating under weak winds and high humidity and rose steadily under sustained south winds; in addition, a fluctuating increase was found under weak north and east winds. The south and north winds then sheared quickly, and the peak value of $\text{PM}_{2.5}$ reached the maximum because of the regional transport and repeated circulation and accumulation processes during the heavy pollution period. High $\text{PM}_{2.5}$ concentration is associated with advection inversion, except when the advection inversion is caused by a prevailing strong east wind. During haze pollution episodes, high humidity occurred in the low and moderate layers of less than 500 m, and decreased quickly with height. The low-level jet between 200 m and 600 m curtailed the growth in $\text{PM}_{2.5}$ concentration to some degree; in particular, the persistent, strong east wind contributed to a steady drop in $\text{PM}_{2.5}$ to Grade II level. Pollution was removed effectively and quickly only when the entire layer was controlled by the strong northwest wind. Pollutants transported from Beijing and central and southwest area of Hebei province surrounding Tianjin made remarkable contributions to heavy pollution in Tianjin.

Keywords Tianjin, $\text{PM}_{2.5}$, Visibility, Meteorological factor, Profile

1 引言

天津市作为我国四大直辖市之一,地处华北平原东北部,东临渤海,北依燕山,西接北京,被河北环绕,是京津冀经济圈的重要组成。随着经济发展,空气质量恶化,能见度逐年下降(Quan et al., 2011; Zhao et al., 2011),而冬季由于采暖排放源增多,叠加不利气象条件,空气污染严重(姚青等, 2010a; 王莉莉等, 2011),持续性霾污染集中爆发(宋连春等, 2013; Wang et al., 2014),对环境、气候以及人体健康产生极大影响。 $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学当量直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物,即细颗粒物)是致霾的主因(王跃思等, 2014),天津低能见度和霾污染同样与 $\text{PM}_{2.5}$ 密切相关(姚青等, 2010b, 2012),所以为改善空气质量,2013 年国家颁布《大气污染防治行动计划》,要求到 2017 年天津市细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)浓度在 2012 年基础上下降 25%左右。天津市于同年出台《天津市清新空气行动方案》,进而加快以控制细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为重点的大气污染治理。

空气质量由排放源和天气过程共同决定,尤其城市环境下持续性重污染事件,更是由不利于扩散的气象状况决定,所以在从源头逐渐减排控制污染的情况下,明确客观天气过程对污染形成的作用尤为重要。研究表明大尺度环流背景场、气象要素和边界层结构对大气污染存在显著影响(Chen et al., 2008; Demuzere et al., 2009; Fan et al., 2011)。

针对天津空气质量与气象状况及边界层结构,已有一些研究,地形槽、高压底部、均压场和弱低压不利于 PM_{10} (空气动力学当量直径小于等于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物)扩散(张晓勇等, 2010; 张晓云等, 2012),静风、西南气流和偏北风影响下易导致颗粒物污染高值(姚青等, 2010a);天津 255 m 垂直铁塔数据分析显示,逆温和垂直风速较小使得局地排放累积形成重污染(高文康等, 2012)。但目前的研究,多数集中在单个站点,重霾过程中天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 以及气态污染物的空间分布状态如何,缺乏基础数据研究,不利于认知污染现状;此外,气象状况和边界层结构影响的综合全面分析缺乏, $\text{PM}_{2.5}$ 污染生成、维持和消散的气象成因缺乏针对性研究。所以本文拟利用天津 7 站 $\text{PM}_{2.5}$ 和气态污染物数据,以及对应时段的北京污染数据、地面气象要素、能见度、边界层温湿和风廓线、后向轨迹,深入分析重霾污染过程天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 及气态污染物的分布和变化特征,以及气象成因和边界层特征,从而为模式模拟、预测预警和污染防治提供重要科学参考。

2 数据材料与方法

2.1 站点和数据

天津地区观测站包括北辰科技园区、机车车辆厂、市监测站、空港物流加工区、东丽中学、泰丰工业园和永明路,共 7 个环境监测站点,监测物种为 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 ,其中北辰科技园区同时监测 PM_{10} ,北京监测点为奥体中心站,数

据获取自国家环境监测总站的网上实时发布结果。在这 8 个监测站中, 泰丰工业园和永明路位于天津滨海新区紧邻渤海, 其余各站均位于天津及北京的中心城区; 天津中心城区在北京城区站东南约 120 km, 距离渤海东约 40 km。环境数据选取 2013 年 2 月 20~28 日的日均值 PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、O₃ 浓度数据, 以及 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度的小时均值。气象数据选取对应时段天津站的逐小时观测的风、温度、相对湿度、海平面气压和能见度数据, 以及由 MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System) 系统绘制的每日每隔 3 h 的天气图。各环境观测站及气象站分布见图 1。为研究此次过程中 PM_{2.5} 浓度变化与边界层结构的关系, 利用天津宝坻的边界层风廓线仪获取了逐小时的边界层风场廓线; 因天津无探空数据, 本文利用 NCEP GDAS (National Centers for Environmental Prediction Global Data Assimilation System) 数据 (<http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php/> [2013-01-08]) 绘制了天津的温湿廓线。GDAS 数据提供每 6 h, 空间分辨率为 1° (纬度) × 1° (经度) 的气象参数数据, 同时给出每 3、6 和 9 h 的预报场数据, 整层垂直方向分为 23 层。为分析周边区域对天津 PM_{2.5} 浓度变化的影响, 利用 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 轨迹模式计算了 24 h 后向轨迹 (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php/ [2014-08-13], 气象场选取 NCEP GDAS), 轨迹持续时间为 24 h, 起始高度 200 m, 每条轨迹的时间间隔为 6 h, 选取的坐标经纬度为 (39.1°N, 117.17°E)。

2.2 天气状况

研究时段天津除 25 日傍晚 [19:00 (北京时间, 下同) 至 20:00] 局部零星小雪, 28 日上午 (08:00 至 11:00) 局部零星小雨, 下午 (03:00 至 05:00) 有风沙外, 均无显著天气现象。具体区域环流背景场分析见 3.2 章节。

3 结果与讨论

3.1 天津市 PM_{2.5} 及气态污染物空间分布及变化趋势

2013 年 2 月 20~28 日北京与天津各站 PM_{2.5} 和气态污染物浓度日均值变化见图 2。天津各站 9 天 PM_{2.5} 的浓度日均值全部超过国家空气质量一

级标准 (日均值阈值为 35 $\mu\text{g m}^{-3}$, GB3095-2012), 是一级标准的 1.8~8.2 倍; 除 25 日外, 也均超过国家空气质量二级标准 (日均值阈值为 75 $\mu\text{g m}^{-3}$), 是二级标准的 1.4~3.8 倍, 其中 1 天空气质量指数 (AQI) 达到四级, 3 天达到五级, 1 天达到六级, 区域日均值平均为 150 $\mu\text{g m}^{-3}$, 最高日均值达 287 $\mu\text{g m}^{-3}$, PM_{2.5} 污染非常严重。在研究时段天津市共经历了 3 次霾污染过程 (PM_{2.5} 日均浓度连续 2 天以上达到或超过国家空气质量二级标准定为一个污染过程), 20~22 日、23~25 日、26~28 日, 其中第三次过程污染最强, 图 4 显示区域小时均值最高值达 364 $\mu\text{g m}^{-3}$, 第一次过程次之, 小时均值最高值为 215 $\mu\text{g m}^{-3}$, 第二次过程最弱, 小时均值最高值为 176 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。整体看, 天津市各站 PM_{2.5} 污染具有区域性和同步性特征, 7 站 PM_{2.5} 小时浓度均值相关系数在 0.85~0.97, 反应出在气象条件主控下 PM_{2.5} 的区域同步变化性, 但受排放源影响, 浓度值也有差异, 中心城区各站差异较小, 研究时段平均浓度为 156 $\mu\text{g m}^{-3}$, 但位于渤海附近的滨海新区两站 (泰丰工业园和永明路) 浓度值较低, 均值为 138 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。与北京市的小时均值结果相比, PM_{2.5} 的区域一致性降低, 即具有同相位的变化特征, 但又有少数时段存在反相位的变化特征; 此外, 增长方式也有所差异, 北京 PM_{2.5} 污染过程分为“爆发性增长”和“持续性增长”两种形式 (Wang et al., 2014), 但天津主要变现为“持续性增长”的特点, 这些差异与排放源和气象过程密切相关。24 日为中国的元宵节, 由于燃放烟花, 会导致 PM_{2.5} 局地点源的突然增加, 但从数据上看, 天津仅有小幅增长, 而北京尤其是 24 日夜晚 PM_{2.5} 突增, 对应一次排放气态污染物 SO₂、NO₂ 和 CO 日均值也非常高, 反应北京观测点受烟花燃放影响较大; 28 日凌晨天津 PM_{2.5} 浓度非常高, 霾污染严重, 中午之后大风伴随沙尘来袭, 颗粒物瞬间迅速增长, 尤其粗粒子 PM₁₀ 浓度值高达 1000 $\mu\text{g m}^{-3}$, 使得天津经历了一场霾污染与沙尘混合又交替出现的污染过程。

相比 PM_{2.5}, 气态污染物各站点差异较显著, 尤其是一次排放的气态污染物 SO₂、NO₂ 和 CO 受观测站点排放源影响, 各站差异较大 (图 2)。整个时段, SO₂ 天津市整体平均为 87 $\mu\text{g m}^{-3}$, 虽然仅有个别天数超过国家二级标准, 但几乎都超过国家一级标准, 市监测站和东丽中学浓度最高, 均值为 111

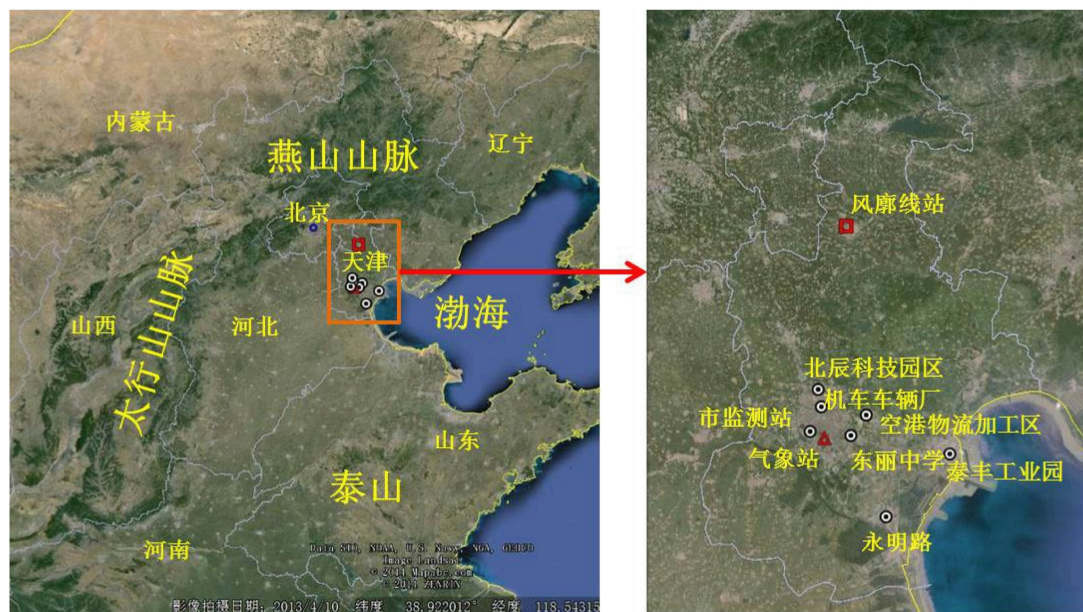
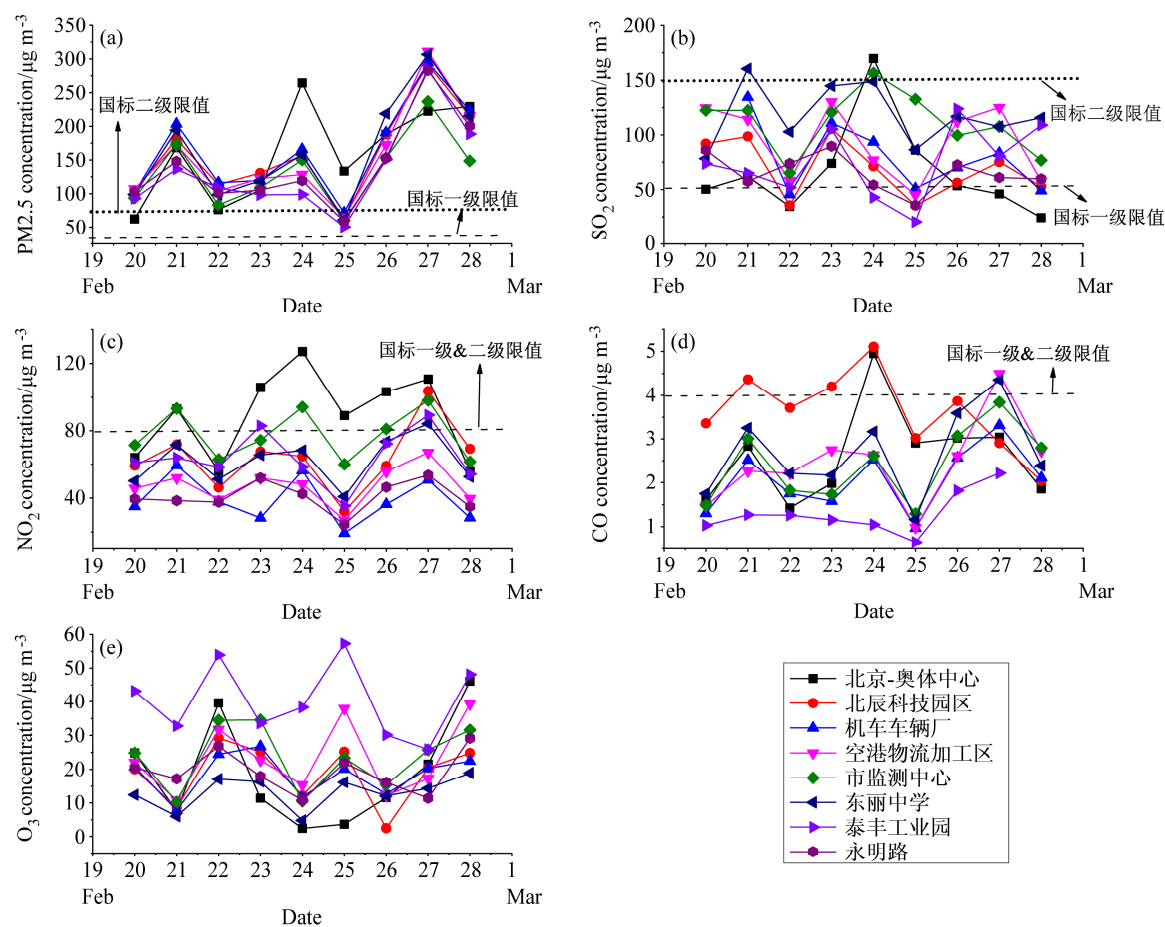


图1 天津周边地形及环境和气象站点分布

Fig. 1 Topography and distribution of monitoring network for atmospheric environment and meteorology in Tianjin and its surrounding region

图2 2013年2月20~28日北京与天津各站 (a) PM_{2.5} 和 (b) SO₂、(c) NO₂、(d) CO、(e) O₃ 浓度日均值Fig. 2 Variation of daily average concentrations of (a) PM_{2.5} and gaseous pollutants (b) SO₂, (c) NO₂, (d) CO, (e) O₃ at different sites in Tianjin and Beijing from 20 to 28 Feb 2013

$\mu\text{g m}^{-3}$ 和 $118 \mu\text{g m}^{-3}$, 永明路和泰丰工业园最低, 分别为 $66 \mu\text{g m}^{-3}$ 和 $75 \mu\text{g m}^{-3}$, 而北京此时段均值为 $67 \mu\text{g m}^{-3}$, 反应出北京采取的煤改气、电取暖和工业压产等一系列措施导致局地燃煤大幅减少。 NO_2 天津市整体平均为 $56 \mu\text{g m}^{-3}$, 仅有个别站在 21 日和 27 日超标, 且 27 日超标站较多, 市监测中心最高 ($77 \mu\text{g m}^{-3}$), 机车车辆厂和永明路最低 (约 $40 \mu\text{g m}^{-3}$), 但均低于北京 (平均为 $89 \mu\text{g m}^{-3}$), 这与北京非常高的机动车保有量排放 NO_x 密切相关。 CO 天津市均值为 2.4 mg m^{-3} , 北辰科技园最高 (3.6 mg m^{-3}), 泰丰工业园最低 (1.3 mg m^{-3}), 北京 CO 均值为 2.6 mg m^{-3} 与天津相当, 原因可能是 CO 天津主要来源是机动车与燃料燃烧, 而北京因为清洁能源使用比重高, 所以 CO 主要排放源为机动车, 但因为北京机动车保有量远远高于天津 (2012 年北京为 520×10^4 辆, 而天津为 236×10^4 辆), 所以导致天津与北京 CO 相当。冬季因气温低辐射弱, O_3 光化学反应弱, 浓度低, 天津均值为 $22 \mu\text{g m}^{-3}$, 其中泰丰工业园最高 ($40 \mu\text{g m}^{-3}$), 东丽中学最低 ($13 \mu\text{g m}^{-3}$), 北京均值为 $19 \mu\text{g m}^{-3}$, 略低于天津, 因一次排放的 NO 对臭氧有滴定作用, 消耗臭氧, 所以污染较重的地区臭氧浓度反而低, 从侧面反应不同的 NO 排放量。就变化趋势而言, NO_2 、 CO 与 $\text{PM}_{2.5}$ 变化趋势类似, 并且在第三次污染过程中浓度最高, 但 SO_2 略有不同, 在污染最高的第三个时段, 浓度值并没有最高, 反应出这个过程中气象条件有利于 SO_2 向硫酸盐转化; O_3 变化趋势与上述污染物相反, 主要由于高污染时段一次排放气态前体物对 O_3 的消耗。

3.2 区域背景场及 $\text{PM}_{2.5}$ 与地面气象要素和能见度的关系

分析天气图可知, 前两次污染过程对应的区域背景场在累积上升阶段主要受高压后部的均压场或高压均压场中, 风力较小, 湿度大, $\text{PM}_{2.5}$ 逐渐累积至高值, 而清除过程背景场不同, 第一次过程的清除来自蒙古高压迅速东移南下带来的西北大风; 第二次污染清除与稳定维持在东北高压底部, 进而受持续强偏东风带来的清洁海洋气团密切相关。但第三次污染过程区别于前两次过程, 如图 3 所示, 26 日受弱气压场影响, 风速减弱, 扩散条件变差, $\text{PM}_{2.5}$ 开始累积增长, 27 日 08:00 弱的蒙古冷高东移, 弱北风将上游北京等地污染吹散至天津, 导致天津污染达到峰值, 之后随着北风延续到

天津地区, 天津污染略有降低, 但 14:00 之后随着蒙古高压向东移出, 海上高压后部的偏南风迅速控制整个区域, 污染循环, $\text{PM}_{2.5}$ 迅速反弹, 到 20:00 区域受控于蒙古低压前部和海上高压后部的偏南气流中, 区域输送再叠加污染循环累积, 同时在高湿状况下颗粒物吸湿增长, 导致天津和北京的污染迅速增加, $\text{PM}_{2.5}$ 峰值进一步抬升, 达到最高值, 超过前两次过程; 28 日中午之后随着蒙古强冷高压迅速东移南下, 冷锋过境彻底清除了污染。此区域背景场的演变与 Chen et al. (2008) 对区域 PM_{10} 污染过程的区域背景场演变结果类似, 在低压前部达到污染的极值, 但本过程又有特殊之处, 由于南部位于海上高压后部的偏南气流中, 而北部出现弱蒙古高压快速东移, 以及随之而来的蒙古低压前部带来的持续偏南风, 导致京津地区风场迅速南北切换, 污染循环累积叠加区域输送以及本地排放, 导致极端重霾污染出现。

天津 $\text{PM}_{2.5}$ 与地面气象要素和能见度的逐小时变化见图 4, 相关系数统计结果见表 1。结果显示 $\text{PM}_{2.5}$ 与海平面气压、风速、能见度存在显著的负相关, 与相对湿度和温度存在显著正相关, 与风向的相关不显著。霾过程 1 从谷值到峰值持续约 58 h, 平均相对湿度高达 78%, 海平面气压变幅较小, 平均为 1028 hPa, 风速和能见度平均分别为 1.8 m s^{-1} 和 3.3 km; 霾过程 2 持续约 40 h, 峰值较第一次过程略低, 相对湿度平均为 55%, 海平面气压变幅小, 平均为 1028 hPa, 风速为 2.3 m s^{-1} , 能见度为 4.6 km。与前两次过程不同, 污染最严重的霾过程 3 在前 36 h 内 $\text{PM}_{2.5}$ 急增至 $364 \mu\text{g m}^{-3}$, 增幅为 $8 \mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, 显著高于前两次过程的增幅, 这一时段相对湿度平均为 74%, 海平面气压为降幅显著, 降低 5 hPa, 风速为 2.1 m s^{-1} , 能见度为 1.7 km, 这一迅速增长过程与周边输送密切相关, 尤其是在北风和西风作用下, 北京急降与天津急升形成鲜明对比, 进一步抬高了污染高值时段的峰值; 之后在 27 日 12:00 至 14:00 在西风和东风作用下, $\text{PM}_{2.5}$ 略有下降, 15:00 强南风控制, 天津 $\text{PM}_{2.5}$ 再次反弹至峰值, 同时由于天津等地高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 储备, 使得北京由北风转南风后 $\text{PM}_{2.5}$ 出现爆发性增长, 增幅 $109 \mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$; 28 日上午虽然仍为南风控制但风速较大, 同时有零星小雨, $\text{PM}_{2.5}$ 略有下降。比较这三次霾污染过程可以发现天津 $\text{PM}_{2.5}$ 污染起源于弱风、高湿, 不利扩散条件加强同时粒子吸湿

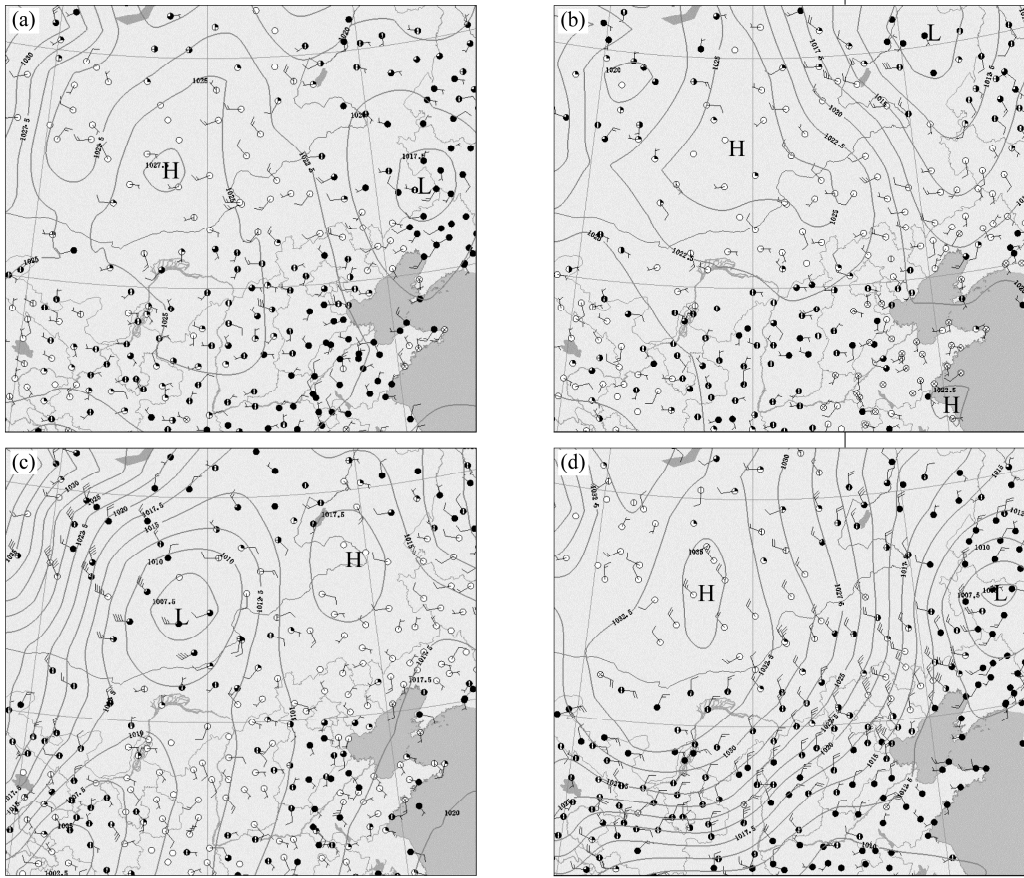


图3 2013年2月(a)26日08:00、(b)27日08:00、(c)27日20:00、(d)28日17:00天气图
Fig. 3 Synoptic maps at (a) 0800 LST 26 Feb, (b) 0800 LST 27 Feb, (c) 2000 LST 27 Feb, and (d) 1700 LST 28 Feb in 2013

增长，继而在偏南风和高湿作用下迅速增长，短时持续且风速较弱的偏北风和偏东风促使PM_{2.5}震荡上扬，而污染高值阶段，南北气流短时迅速切换，区域污染传输叠加污染的循环累积，PM_{2.5}浓度峰值开创新高。三次污染过程的清除阶段特征反应出

表1 PM_{2.5}浓度与能见度、地面气象要素小时均值的相关系数统计

Table 1 Correlation coefficients of PM_{2.5}, visibility, and meteorological factors based on hourly mean data

	PM _{2.5} 浓度	风向	海平面 气压	能见度	风速	温度	相对 湿度
PM _{2.5} 浓度	1.00						
风向	0.01*	1.00					
海平面气压	-0.70	-0.18	1.00				
能见度	-0.69	0.22	0.40	1.00			
风速	-0.39	0.09	-0.08	0.42	1.00		
温度	0.23	0.23	-0.45	0.14	0.36	1.00	
相对湿度	0.49	-0.33	-0.22	-0.69	-0.50	-0.61	1.00

*表示未通过显著水平为0.05的检验；未标*表示均通过显著水平为0.01的检验。

天津的PM_{2.5}污染只有在强北风作用下才能有效清除，长时间持续的强东风虽能减缓PM_{2.5}污染，但空气质量仍徘徊在二级水平(60 μg m⁻³左右)。

PM_{2.5}浓度与风向风速的统计关系(图5)显示偏北风和偏东风对应PM_{2.5}浓度较低，静风(风速≤1 m s⁻¹)和偏西风对应浓度稍高，偏南风对应浓度最高，这主要与风场经过地区的排放源相关，天津的西北面为北京，西南和南面为河北的大中小城市聚集地，人口稠密，排放源较多，而北面 and 东面则分别为环境相对清洁的小城市和渤海，排放源较少；静风浓度较高，反映天津本地排放量较高。东南风、南风、西风、西北风控制时PM_{2.5}浓度随风速增加而增加，反应出周边地区传输加重了天津污染；PM_{2.5}浓度随东风和北风增加减弱，显示北部和东部区域给天津输送了清洁空气，而大风也有利污染物扩散，尽管东部渤海排放源很少，但由于偏东风尤其其风速较小时带来的水汽造成高湿，促使粒子吸湿增长，浓度较偏北风影响时稍高。

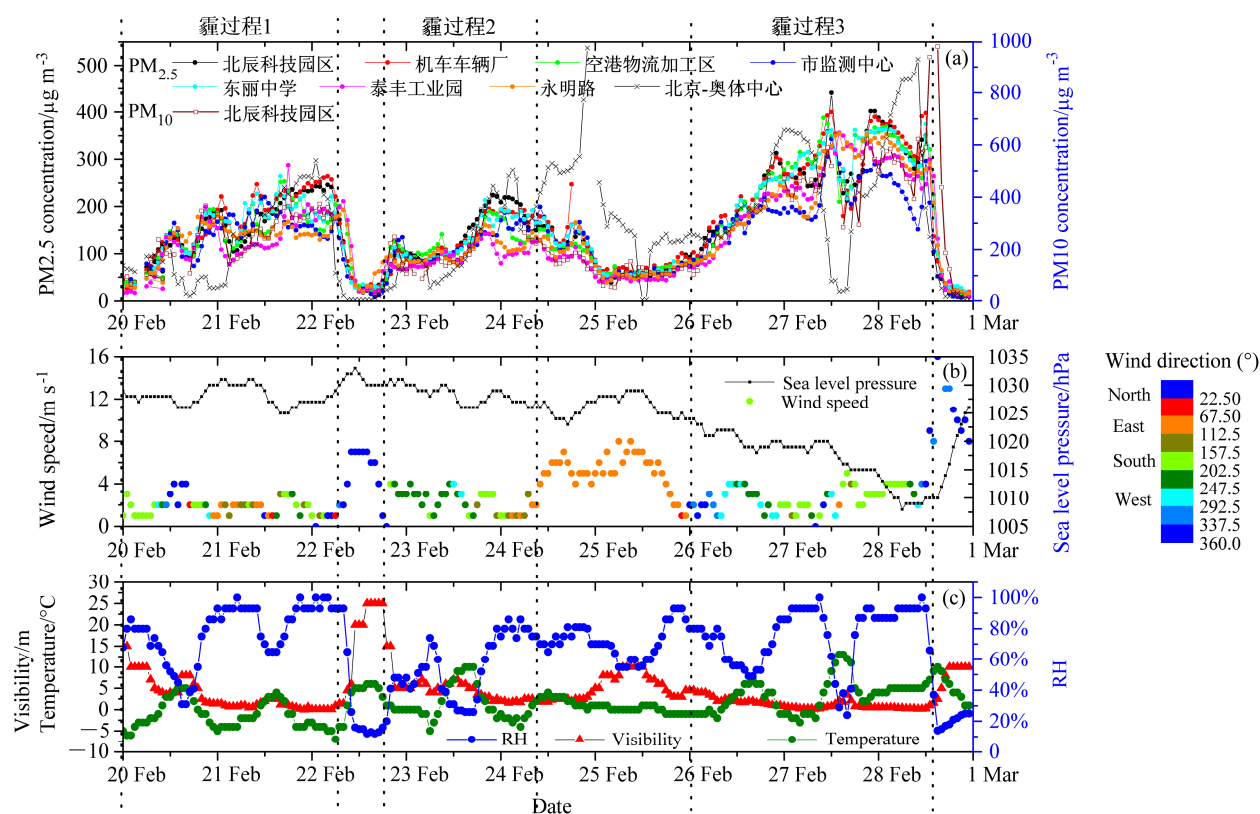


图4 2013年2月20~28日天津与北京各站 (a) PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度小时均值及对应天津气象要素 (b) 风速和气压, (c) 能见度、气温和相对湿度变化

Fig. 4 Variation of hour average values of (a) PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Tianjin and Beijing and meteorological factors (b) wind speed and sea level pressure, (c) visibility, temperature, and RH in Tianjin from 20 to 28 Feb 2013

高浓度 PM_{2.5} 污染对能见度影响显著, 是造成天津大气灰霾的主因 (姚青等, 2012)。本研究去除风沙和降水时段后, PM_{2.5} 和能见度的统计图 (图 6) 显示两者存在显著的幂指数关系, 拟合优度 R^2 为 0.71。由拟合曲线得到能见度为 10 km 时, 对应的 PM_{2.5} 质量浓度约为 $50 \mu\text{g m}^{-3}$, 而其他研究表明北京冬季能见度为 10 km 时, PM_{2.5} 对应 $30 \mu\text{g m}^{-3}$ (张宏等, 2011), 阈值浓度的差异可能由于京津粒子成分不同, 对消光的影响不同导致。此外, PM_{2.5} 小于 $50 \mu\text{g m}^{-3}$ 时对应风速较大, 相对湿度较小, 能见度随颗粒物增加衰减迅速; 而大于 $50 \mu\text{g m}^{-3}$ 时, 对应风速较小, 相对湿度较大, 能见度随颗粒物增加衰减变缓。在 PM_{2.5} 浓度相同的情况下, 相对湿度越大, 能见度越低, 所以在高湿度情况下控制 PM_{2.5} 浓度为控制霾污染尤为迫切。

3.3 边界层特征

图 7 为利用天津宝坻边界层风廓线雷达数据绘制的逐小时风廓线图, 图 8 为不同时段温度和湿度

的垂直廓线图。霾过程 1 和 2 污染累积阶段风场在 600 m 左右的上下层有显著差异, 说明混合层高度在 600 m 左右, 低的混合层高度不利于污染扩散, 具体表现为污染开始阶段 600 m 以下为弱风控制, 扩散状况变差, 同时西南风随高度逐渐向上顺时针切变为西北风, 暖平流导致逆温形成, 污染开始累积; 污染增加阶段 600 m 以下偏南风促使 PM_{2.5} 稳步增加, 期间短而弱的北风和东风的转换, 使得污染继续震荡增加, 主要因为偏南风的持续叠加平流逆温的存在使得扩散状况进一步恶化 (21 日 06:00 至 18:00; 23 日 12:00 至 24 日 03:00), 叠加传输推进污染持续增长, 北风则是将西北方向北京等地污染输送到天津 (20 日 11:00 至 18:00; 22 日 00:00 至 03:00), 伴随低层较弱的下沉气流将污染物输送到地面, 但随着整层北风持续, 扩散状况好转, 并且上游逐渐变为清洁气团, PM_{2.5} 下降, 但如果近地层风速较小 (小于 4 m s^{-1}), 清除有限, 大风则能迅速清除污染, 而东风因携带大量水汽促

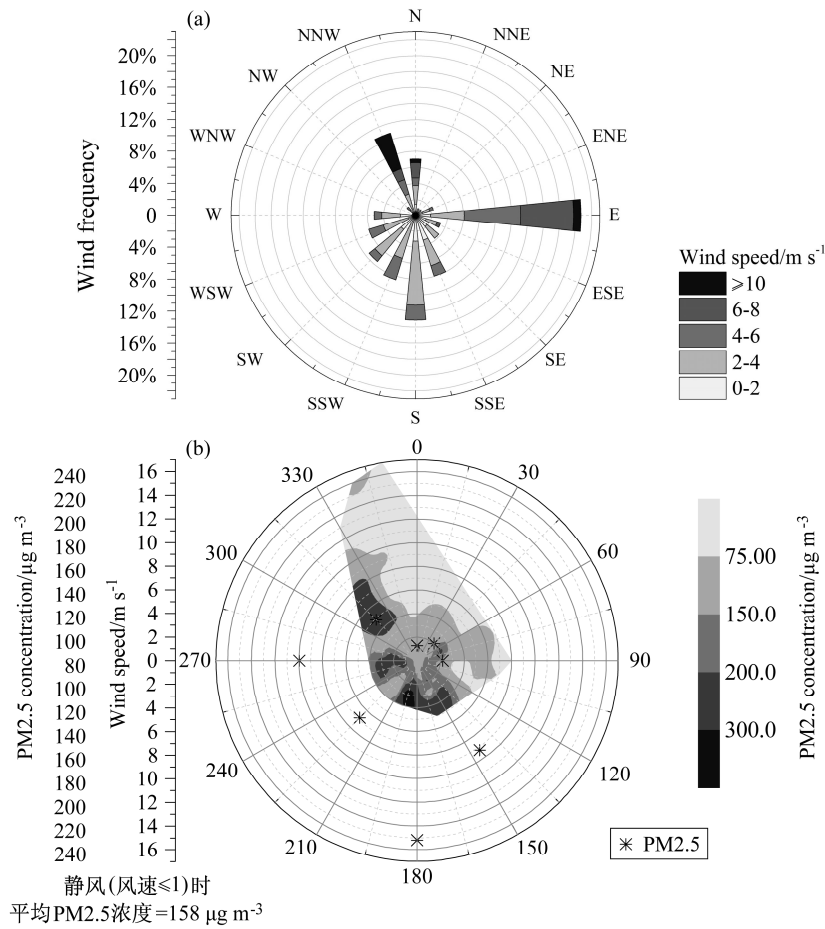


图5 2013年2月20~28日天津 (a) 风玫瑰图以及 (b) PM2.5 浓度和风速、风向的关系图

Fig. 5 Maps of (a) wind rose and (b) relationship between PM2.5 concentration and wind speed, wind direction in Tianjin from 20 to 28 Feb 2013

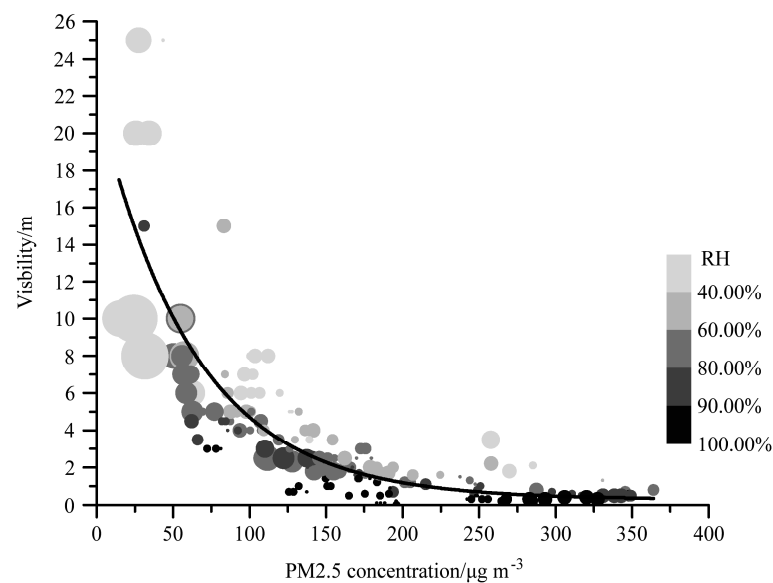


图6 2013年2月20~28日天津 PM2.5 与能见度统计关系图 (图中点的颜色按相对湿度进行分类, 点的大小表示风速)

Fig. 6 Relationship between PM2.5 and visibility (data points are color coded for RH and size coded for wind speed) in Tianjin from 20 to 28 Feb 2013

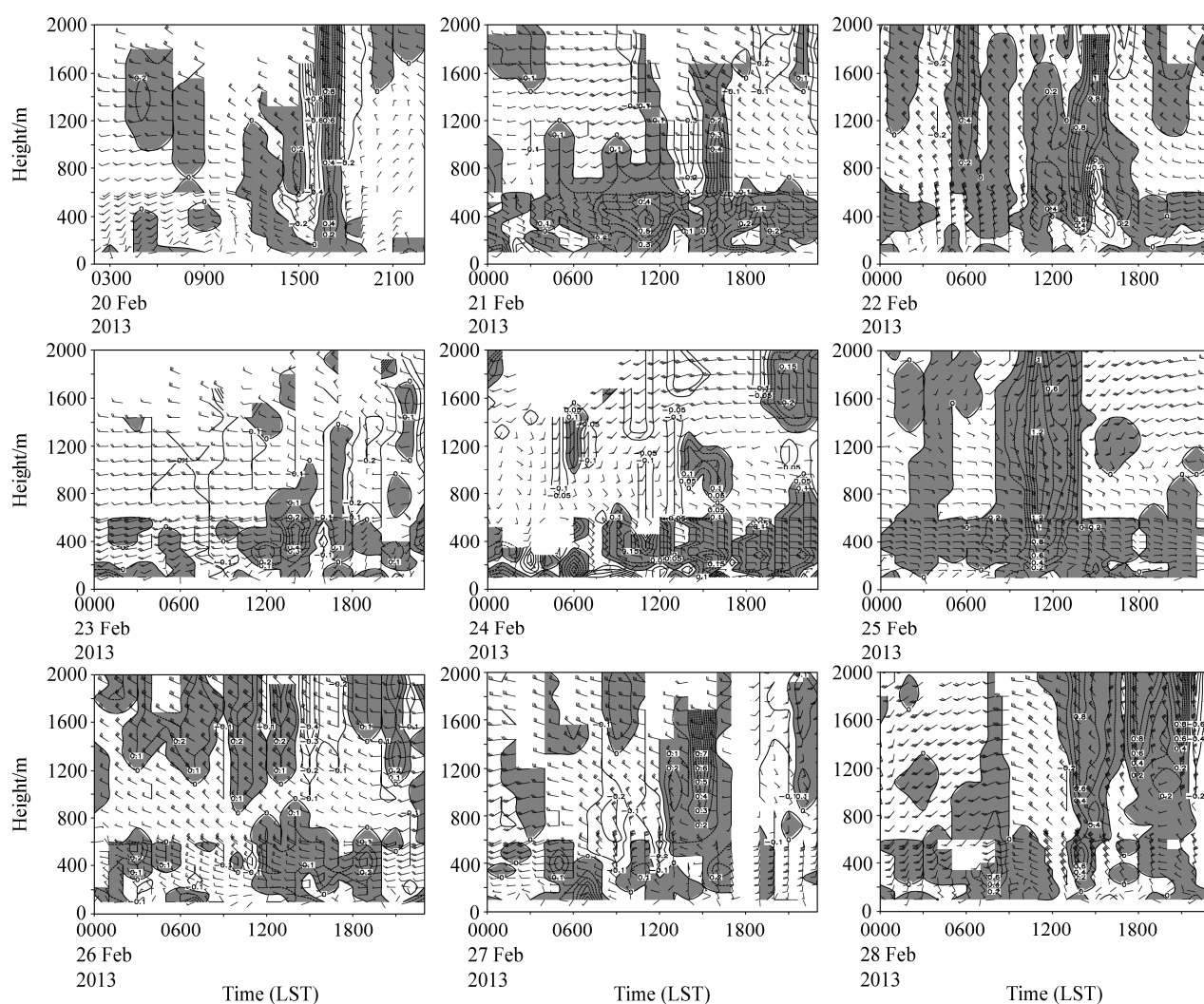


图7 2013年2月20~28日天津风廓线。图中等值线表示垂直速度(单位: m s^{-1}), 正值表示下沉运动如图中灰色阴影部分, 负值表示上升运动

Fig. 7 Wind profiles during 20 to 28 Feb 2013 in Tianjin. The contour is vertical wind speed (m s^{-1}), negative values represent the ascending motion, and positive values represent the descending motion (shading)

使粒子吸湿增长, 浓度增加(20日19至23:00; 24日04:00至11:00), 随着东风带来的持续清洁海洋气团, 污染稀释, 强东风一直持续 $\text{PM}_{2.5}$ 下降较大(24日12:00至25日23:00), 但降低到一定程度后维持恒定, 不能完全清除, 主要由于高湿使得本地排放粒子吸湿增长。此外, 在污染上升阶段边界层低空急流对污染上升有一定抑制作用, 如21日01:00至05:00低层200~400 m强东风, 21日19:00至23:00 200~600 m强西风扰动, 23日00:00至11:00 200~600 m西南风或西风急流。

霾过程3和前两个过程有类似之处, 即弱风导致污染增加, 西南风助其攀升, 之后西南急流抑制升高, 但之后污染进一步抬升至新的峰值, 其边界

层特征较为不同。27日07:00整层为西北风控制, 地面有较强烈下沉运动, 将上游北京等地污染物输送到地面, $\text{PM}_{2.5}$ 再次急增, 污染峰值达到新高度, 12:00至18:00随着600 m以上西北风持续, 上游气团变清洁, 但600 m以下逐渐转为弱东南风, 输送清洁海洋气团, 风场扰动使得 $\text{PM}_{2.5}$ 略有下降, 但19:00整层突变为南风控制, 短短几小时内风向由北转南, 污染循环累积, $\text{PM}_{2.5}$ 迅速反弹, 随着南风一直延续到23:00, 输送叠加本地排放, 在高湿度状况下, $\text{PM}_{2.5}$ 再次达到峰值, 从而导致霾过程3浓度最高, 污染最重。之后28日01:00至09:00 300 m以上有西南风急流, 一定程度减缓了污染, 10:00整层转换为西北风, 加之下沉气流将西北污

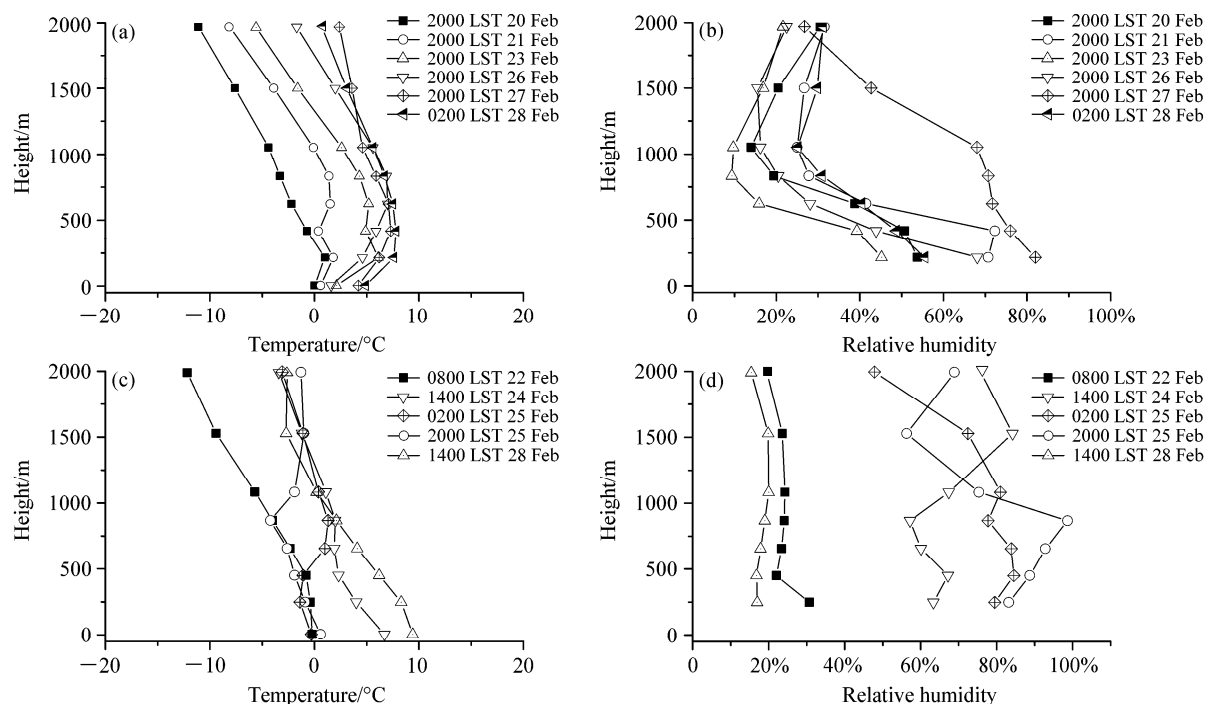


图8 2013年2月20~28日(a、b)污染时段和(c、d)清洁时段天津温度和湿度的垂直廓线

Fig. 8 Profiles of temperature and humidity during (a, b) pollution periods and (c, d) clean periods from 20 to 28 Feb 2013 in Tianjin

染气团传输至天津地面, PM_{2.5} 短时急增, 12:00 之后整层西北大风, 沙尘过境, 粗粒子急增, 但清除了 PM_{2.5}, 之后西北风维持, 空气清洁。

温湿廓线显示污染时段在 1000 m 以下存在逆温, 通过风廓线分析显示以平流逆温为主, 污染最重的霾过程 3 (26、27 和 28 日) 的逆温强度和厚度略高于前两次过程 (20、21 和 23 日), 逆温层从地面延伸到 500~800 m, 此外第三次过程的表现单层逆温, 而前两次表现为两层逆温。为显示污染开始清除阶段的温湿结构, 选取了 3 个霾过程开始清除时刻 (22 日 08:00、24 日 14:00、28 日 14:00) 的结果, 同时对持续低污染时段 25 日的 02:00 和 20:00 的结果进行分析, 显示清除开始时 1000 m 以下无显著逆温层, 反应扩散状况较好, 有利于污染清除, 而污染持续低值阶段, 在 500 m 以上存在逆温层, 逆温层的存在虽然一定程度不利于污染垂直扩散, 但由于此时段强东风带来的海洋清洁气团, 污染被稀释。湿度廓线显示霾污染时段高湿度主要集中在 500 m 以下, 且随高度增加湿度递减较大, 个别时刻还存在逆湿情况 (20 日和 21 日), 而清洁时段整层湿度或很低或很高, 整层变幅相对较小。

3.4 传输路径分析

为分析影响天津 PM_{2.5} 的污染传输路径和气团经过区域, 图 9 给出了天津及周边地区 2013 年 2 月 20~28 日 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 气溶胶光学厚度 (AOD) 空间分布, 以及 20~28 日不同污染和清除时段每隔 6 h 的后向轨迹。MODIS AOD 的数据版本为 Level 3 级 1° (纬度) × 1° (经度) 分辨率的 C5.1 气溶胶光学厚度产品, 包括上午星 Terra 的暗目标算法结果和下午星 Aqua 的暗目标和深蓝算法两个结果, 最后汇总每日 3 种数据结果取平均得到区域分布。结果显示天津南部以及天津以南的河北南部、山东、河南、安徽、江苏等地 AOD 非常高, 而天津以北及西北地区 AOD 较小, 且随纬度升高 AOD 浓度逐渐减小, 说明天津南部及以南区域污染较重, 而以北地区污染较轻。霾过程 1 和霾过程 2 主要经过为天津南部和邻近的西北部地区, 这些地区主要为高污染排放区, 虽部分轨迹经过清洁的海洋地区, 但因海上气团湿度大, 同时气团轨迹较短, 移动慢, 扩散状况差, 并为粒子吸湿增长提供了充分条件, 导致高污染发生。霾过程 3 气团轨迹较为复杂, 虽然也主要以南部气团为主, 但其中有较大的南北切换, 27 日

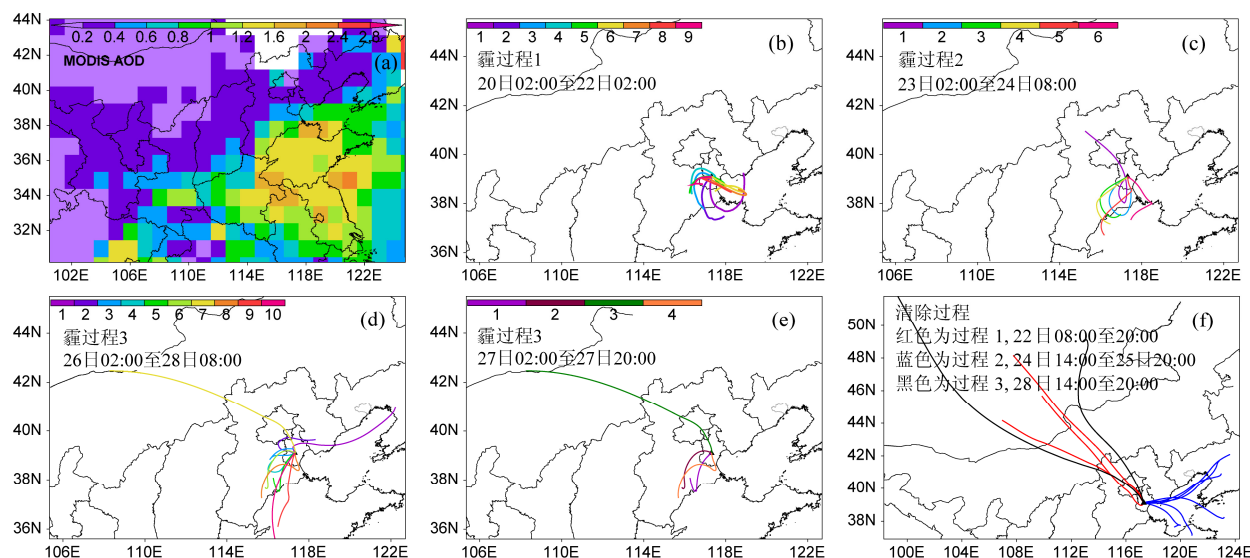


图9 天津及周边地区 2013 年 2 月 20~28 日 (a) MODIS 气溶胶 AOD 的平均值及 (b) 霾过程 1、(c) 霾过程 2、(d)、(e) 霾过程 3 和 (f) 清除过程的后向轨迹, 持续时间为 24 h, 时间间隔为 6 h

Fig. 9 Spatial distributions of (a) MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) AOD (Aerosol Optical Depth) and (b-f) the 24-h backward trajectory for different periods over Tianjin and its surrounding regions during 20 to 28 Feb 2013

(图 9e) 轨迹短时间内经历从南转北再转到南的迅速切换, 将南部地区以及西北部北京等地高浓度污染传输到天津, 区域输送再叠加污染循环累积, 导致天津 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度又抬升至新峰值。清除过程轨迹主要经过西北和东部地区, 西北地区移动迅速的干洁气团, 稀释了污染, 同时促进了空气流通和垂直混合, 污染被迅速彻底清除, 而来自东部清洁的海洋气团, 在稀释污染和改进扩散状况的同时带来高湿空气, 促使粒子吸湿增长, 不能彻底清除污染, $\text{PM}_{2.5}$ 保持在 $60 \mu\text{g m}^{-3}$ 的水平。

4 结论

通过对 2013 年 2 月 20~28 日天津 7 站 $\text{PM}_{2.5}$ 和气态污染物变化特征、气象成因和边界层特征分析, 本文得到如下结论:

(1) 天津冬季重污染时段 $\text{PM}_{2.5}$ 和一次气态污染物浓度值很高, O_3 浓度值则较低, 气态污染物各站差异显著, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化具有区域性和同步性特征, 但一般都是中心城区高于滨海新区; 与北京相比, 天津 SO_2 浓度高, 而 NO_2 浓度低, CO 两者相当, 此外, $\text{PM}_{2.5}$ 天津表现为持续性增长, 而北京还有爆发性增长的特点。

(2) 重霾过程表现为高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 特征, 均

值为 $150 \mu\text{g m}^{-3}$, 超标显著, 其中 5 d 空气质量为四到六级; 高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 导致霾污染, 能见度小于 10 km 的阈值为 $50 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

(3) $\text{PM}_{2.5}$ 污染起始于弱风和高湿, 继而在高湿状况、持续偏南风作用下迅速增加, 短时弱北风和弱东风促使震荡上扬, 污染高值阶段, 南北气流短时迅速切换, 区域污染传输叠加污染的循环累积, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值达到最高。清除污染依赖强北风和东风, 前者快且彻底, 后者缓且仍维持二级水平。

(4) 风随高度顺时针切变引起暖平流, 进而形成平流逆温, 与高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 密切相关, 但强东风控制时除外; 高污染时段高湿主要集中在 500 m 以下, 且随高度递减较大; 200~600 m 的低空急流一定程度抑制污染上升。污染时段边界层内垂直速度一般较弱, 但弱下沉运动促使周边污染传输至地面。

(5) 北京、环绕天津的河北中部和西南部地区对天津重污染有显著贡献。

近年来京津冀城市群冬季频发区域尺度连续严重霾污染过程, 而天津作为主要组成部分, 本地和区域共同影响下亦经常发生重霾污染, 本文对天津重霾发生的污染气象条件的阐述对实际预报或研究都有一定的指导意义。

致谢 感谢中国环境监测总站空气质量发布平台 ([http://113.108.142.147:20035/emcpublish/\[2014-05-12\]](http://113.108.142.147:20035/emcpublish/[2014-05-12])) 提供颗粒物数据。

参考文献 (References)

- Chen Z H, Cheng S Y, Li J B, et al. 2008. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (24): 6078–6087.
- Demuzere M, Trigo R M, Vila-Guerau de Arellano J, et al. 2009. The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM10 levels at a rural mid-latitude site [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9 (8): 2695–2714.
- Fan S J, Fan Q, Yu W, et al. 2011. Atmospheric boundary layer characteristics over the Pearl River delta, China, during the summer of 2006: Measurement and model results [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (13): 6297–6310.
- 高文康, 唐贵谦, 姚青, 等. 2012. 天津重污染期间大气污染物浓度垂直分布特征 [J]. *环境科学研究*, 25 (7): 731–738. Gao Wenkang, Tang Guiqian, Yao Qing, et al. 2012. Vertical distribution of air pollutants during serious air pollution event in Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 25 (7): 731–738.
- Quan J, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China plain (NCP) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (15): 8205–8214.
- 宋连春, 高荣, 李莹, 等. 2013. 1961~2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (5): 313–318. Song Lianchun, Gao Rong, Li Ying, et al. 2013. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961–2012 [J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis (in Chinese)*, 9 (5): 313–318.
- 王莉莉, 王跃思, 吉东生, 等. 2011. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析 [J]. *中国环境科学*, 31 (7): 1077–1086. Wang Lili, Wang Yuesi, Ji Dongsheng, et al. 2011. Characteristics of atmospheric pollutants in Tianjin Binhai new area during autumn and winter [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (7): 1077–1086.
- Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 57 (1): 14–25.
- 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 2014. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望 [J]. *地球科学进展*, 29 (3): 388–396. Wang Yuesi, Zhang Junke, Wang Lili, et al. 2014. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 29 (3): 388–396.
- 姚青, 蔡子颖, 张长春, 等. 2010a. 天津城区大气气溶胶质量浓度分布特征与影响因素 [J]. *生态环境学报*, 19 (9): 2225–2231. Yao Qing, Cai Ziyang, Zhang Changchun, et al. 2010a. Variety characteristics and influence factors of aerosol mass concentrations in Tianjin city [J]. *Ecology and Environmental Sciences (in Chinese)*, 19 (9): 2225–2231.
- 姚青, 张长春, 樊文雁, 等. 2010b. 天津冬季大气能见度与空气污染的相互关系 [J]. *气象科技*, 38 (6): 704–708. Yao Qing, Zhang Changchun, Fan Wenyan, et al. 2010b. Correlation of horizontal visibility and air pollution concentration in winter in Tianjin [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 38 (6): 704–708.
- 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 2012. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析 [J]. *气象*, 38 (6): 688–694. Yao Qing, Han Suqin, Cai Ziyang. 2012. Aanalysis of related factors for a case of low horizontal visibility in Tianjin[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (6): 688–694.
- 张宏, 刘子锐, 胡波, 等. 2011. 北京能见度变化趋势及冬季一次典型污染过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 16 (5): 620–628. Zhang Hong, Liu Zirui, Hu Bo, et al. 2011. Analysis of trends of visibility and its characters during air seriously polluted days in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (5): 620–628.
- Zhao Pusheng, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng, et al. 2011. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Research*, 101 (3): 711–718.
- 张晓云, 郭虎, 易笑园, 等. 2012. 天津市秋季典型环境污染过程个例分析 [J]. *气象与环境学报*, 28 (4): 33–37. Zhang Xiaoyun, Guo Hu, Yi Xiaoyuan, et al. 2012. A case study on a typical environment pollution process in autumn over Tianjin area [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 28 (4): 33–37.
- 张晓勇, 张裕芬, 冯银厂, 等. 2010. 天气类型对天津大气 PM10 污染的影响分析 [J]. *环境科学研究*, 23 (9): 1115–1121. Zhang Xiaoyong, Zhang Yufen, Feng Yinchang, et al. 2010. Influence of synoptic patterns on the concentrations of PM10 in Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 23 (9): 1115–1121.