

一次重度霾后的平流雾过程微物理特征及其对颗粒物浓度的影响

高雅, 于国强, 商建

盐城市气象局, 江苏 盐城

收稿日期: 2022年6月14日; 录用日期: 2022年7月12日; 发布日期: 2022年7月22日

摘要

2016/2017年冬季在天津开展平流雾微物理结构特征观测试验, 结合距地66 m高度处雾滴谱和255 m气象塔大气边界层资料, 对重度霾后的一次平流雾过程雾体内部的微物理特征展开分析, 讨论其生消演变特征, 并对重度霾背景下大气颗粒物浓度与雾微物理量的相互作用进行讨论。结果表明: 高空脊前的负涡度平流维持地面均压场, 低层反气旋环流外围偏南气流促使暖湿空气向天津地区输送; 66 m高度数浓度高值出现在雾过程成熟阶段初期, 而含水量、特征直径高值出现在成熟阶段后期, 对应成熟阶段后期雾滴数浓度减少、地面能见度小幅跃升; 重度污染造成高颗粒物浓度导致雾滴数浓度增多, 雾滴尺度偏小, 平流雾对颗粒物具有明显的湿清除效应, 通过不同站点污染物浓度随时间变化趋势, 可以判断雾在水平方向有西南向东北方向的发展进程。

关键词

平流雾, 微物理特征, 尺度谱分布, 颗粒物浓度

Microphysical Characteristics of Advection Fog Process after a Severe Haze Event and Its Effect on Particulate Matter Concentration

Ya Gao, Guoqiang Yu, Jian Shang

Yancheng Meteorological Bureau, Yancheng Jiangsu

Received: Jun. 14th, 2022; accepted: Jul. 12th, 2022; published: Jul. 22nd, 2022

Abstract

The microphysical characteristics observation test of advection fog was carried out in Tianjin in

the winter of 2016/2017. Combined with the droplet spectrum at a height of 66 m above the ground and the atmospheric boundary layer data of 255m meteorological tower, this paper analyzes the microphysical characteristics inside the fog in an advective fog process after a severe haze event, discusses its evolution characteristics, the interaction between atmospheric particle concentration and fog microphysical quantities under the background of severe haze event. The result shows that the negative vorticity advection in front of the high-altitude ridge maintains the ground's uniform pressure field, and the southerly airflow at the periphery of the low-level anti-cyclonic circulation promotes the transport of warm and humid air to the Tianjin area; The high value of the characteristic diameter appears in the late stage of maturity, corresponding to the decrease in the number of droplets and the slight increase in ground visibility in the latter stage of the maturity stage; the high particle concentration caused by heavy pollution leads to an increase in the number of droplets, the size of the droplets is small, and the advection fog has obvious effects on particulate matter. The high concentration of particulate matter caused by heavy pollution will lead to an increase in the fog droplets concentration, and the size of droplets will be smaller, at the same time, the advection fog has a significant wet removal effect on the particulate matter. With the change of concentration of the ground particulate matter at different sites, it can be judged that the horizontal development of the fog moves from southwest to northeast.

Keywords

Advection Fog, Microphysical Characteristics, Size Distribution, Particulate Matter Concentration

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雾是悬浮于近地面大气边界层中的大量水滴或冰晶,使水平能见度降至 1000 m 以下的天气现象,是具有垂直结构特征的大气水物质演变过程。随着城市化进程加快,大气污染日益严重,雾由于其伴随的能见度低、污染物扩散难、空气质量差等现象,作为一种灾害性天气受到了越来越多的关注[1]。但是由于观测条件的限制,对于雾微物理特征的研究大多集中在雾层的底部,对雾层垂直结构上微物理特征的研究相对较少。

目前,虽然已有诸多学者在外场观测中对雾微物理量特征以及雾滴谱展开研究并取得大量研究成果[2][3][4],但仅初步揭示了雾宏观边界层及雾滴谱、含水量等微物理量特征,少量对垂直结构研究所得信息也十分有限,无法满足当前相关科学问题和业务应用的需要。Gultepe 等[5]指出由于对不同时空尺度雾的理化过程,特别是微物理垂直结构没能完全认识清楚,准确预报雾的能力还十分有限。牛生杰等[6]也曾强调针对雾时、空不均匀性进一步开展综合探测的迫切性,建议将传统的地面观测系统设置于气象塔的不同高度,探索雾层垂直结构,以期在雾的完整认识上取得突破。

2016 年 12 月 29 日至 2017 年 1 月 1 日华北、黄淮出现大范围雾和霾过程,29 日至 30 日以霾为主,31 日至 1 日浓雾大范围发展,局地甚至出现能见度低于 50 m 的特强浓雾。本文选取 2016 年 12 月 31 日到 2017 年 1 月 1 日重度霾天气过后天津地区的一次平流雾过程,利用 NCEP/NCAR 全球再分析资料、气象塔梯度观测资料、雾微物理量观测资料、能见度仪观测资料对本次平流雾的演变过程、微物理特征及其与重度霾后不同高度颗粒物浓度的相互作用展开分析,从不同高度、不同微物理量演变特征了解雾体在垂直结构的生消概况,加强对平流雾微观垂直结构的认识,以期提高天津地区平流雾的预报预警能力。

2. 观测地点及数据来源

本次观测时间为 2016/2017 年冬季, 雾滴谱仪放置于天津市气象局楼顶观测雾微物理量, 距地高度 66 m, 常规气象要素和大气颗粒物浓度的观测地点为天津 255 m 大气边界层气象塔(39°04'N, 117°12'E), 该气象塔设置 15 层风温湿传感器, 分别安装在 5、10、20、30、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、250 m 高度处, 大气颗粒物监测仪放置在 120、200 m 高度处, 测站海拔高度为 3.3m, 观测仪器详情见表 1。

Table 1. Overview of observation instruments

表 1. 观测仪器概况

仪器名称	型号	精度	观测频率	观测要素
雾滴谱仪	FM-120	2~50 μm	1 s	数密度 尺度谱
前向散射能见度仪	MODEL-6000	$\pm 10\%$ 或 3 m	1 min	能见度
风温湿传感器	DZZ6	-50°C~50°C; $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 0%~100%; $\pm 3\%$ 0°~360°; $\pm 5^\circ$ 0~60 m/s; ($\pm 0.5 + 0.03 v$) m/s	1 min	温度 湿度 风向 风速
大气颗粒物监测仪	蓝盾光电子		PM _{2.5} PM ₁₀	大气颗粒物浓度

观测区域周边为城市建成区下垫面, 东边海岸线约 58 km。楼顶平台与气象塔相距 2.9 km (图 1), 结合 micaps 填图数据, 不同站点能见度观测数值相差较小, 因此认为本文研究时段背景大气条件和平流雾具有水平均匀性, 下文分析中地面能见度与空中雾微物理参数的时间演变规律也表明了该一致性。



Figure 1. Observation location and surrounding environment

图 1. 观测点及周边环境

3. 结果与分析

3.1. 雾过程概况

2016年12月29日至30日天津地区始终处于霾天气背景之下，本次观测的天津平流雾过程形成于31日午后，从图2能见度演变可知31日15时23分能见度降至1000 m以下，17时后发展为能见度低于500 m的浓雾，经过1小时左右再次发展为强浓雾，并在该阶段维持3个多小时。31日23时到1日02时期间，能见度起伏较大，但始终维持在1000 m以下。02时后能见度陡降至200 m以下，约经过15 min左右即由浓雾发展为强浓雾，这与严文莲等[7]研究指出的雾爆发性增强特征一致，在该阶段维持近6小时后，于1日12时41分能见度超过1000 m，雾完全消散。由此可见，本次雾过程持续时间相对较长，近22个小时，发展强度高，约9个小时能见度稳定在200 m以下，同时雾区影响范围广，是一次典型的强浓雾过程。

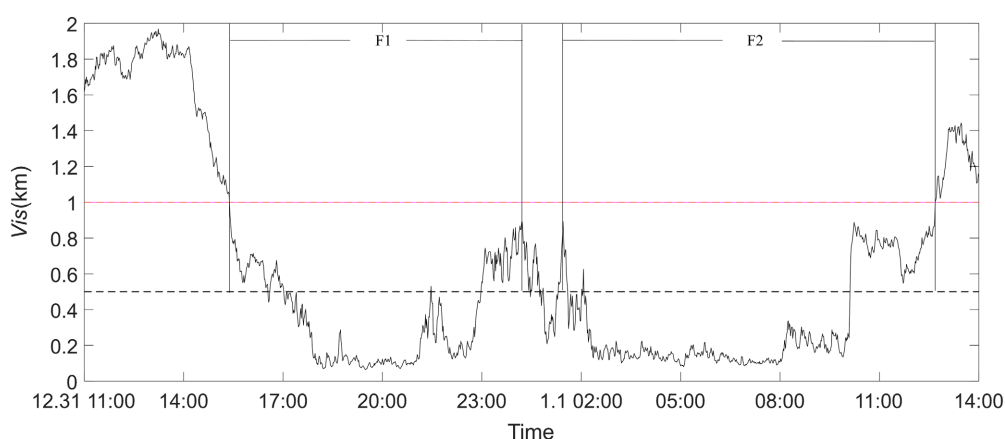


Figure 2. The variation of visibility from 11:00 31th Dec 2016 to 14:00 1th Jan 2017

图 2. 2016年12月31日11时至2017年1月1日14时能见度随时间演变

本文以能见度低于1 km时段作为雾过程研究的时间范围，考虑1日01时前后能见度两次升高到893 m(分别在1日00时13分和01时27分)，该时间前后雾过程均经历了形成、成熟、减弱的过程，因此将研究时间范围进一步划分为两次雾过程：F1和F2，时间范围分别为31日15时23分至1日00时13分、1日01时27分至12时41分。

2016年12月31日14时中纬度环流较平直，500 hPa高度场(图3(a))多以短波槽活动为主，华北地区受槽后西北气流影响，有弱冷平流向天津输送，对应850 hPa高度场(图3(b))上华东及华南地区等压线稀疏，天津处于高压脊控制之下，中低层的暖湿气流与高层的弱冷平流形成上干冷下暖湿的层结结构，有利于午后雾的形成。到了20时天津500 hPa上空已转为槽前西南气流控制，温度槽稍落后于高度槽，850 hPa依旧受高压脊影响。结合925 hPa低空水汽通量(图4(a))可知31日12时至1日06时，受位于黄海至浙江、江苏一带的反气旋环流外围偏南或西南气流影响，低层的暖湿空气持续向天津地区输送，为后期雾的再次加强与维持提供了充足水汽条件，这与郭丽君等[8]研究京津冀地区平流雾特征时指出西南暖湿气流和较低的地面温度的特征一致。

从地面气压场上来看(图4(b))，蒙新高地沿东南方向至我国东部沿海地区，均受地面大陆性高压控制，天津位于将入海高压的偏后方，有利于来自海面的暖湿空气输送至陆地，且由于中低空脊前负涡度区对地面的加压作用，利于天津地区地面均压场的维持。焦圣明等[9]研究江苏一带连续性雾过程时曾指出，大陆低压且长时间处于均压区是连续性雾过程的重要天气条件。

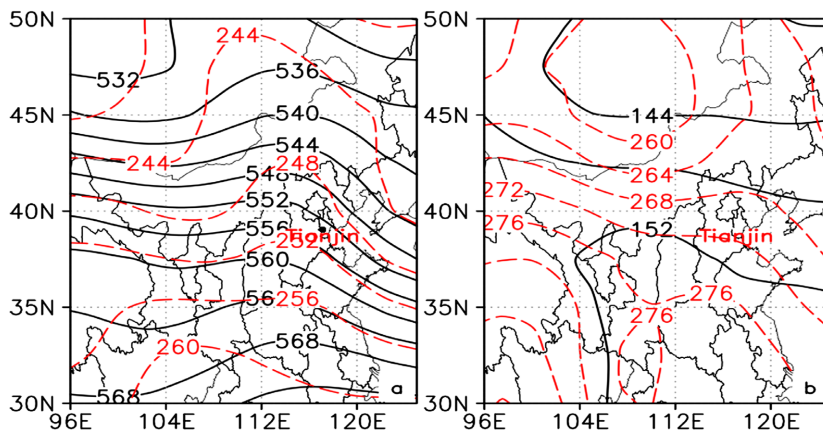


Figure 3. (a) 500 hPa and (b) 850 hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm) and temperature field (dotted line, unit: K) at 14:00 on 31th Dec 2016

图 3. 2016 年 12 月 31 日 14 时(a) 500 hPa 和(b) 850 hPa 位势高度(实线, 单位: dagpm)和温度场(虚线, 单位: K)

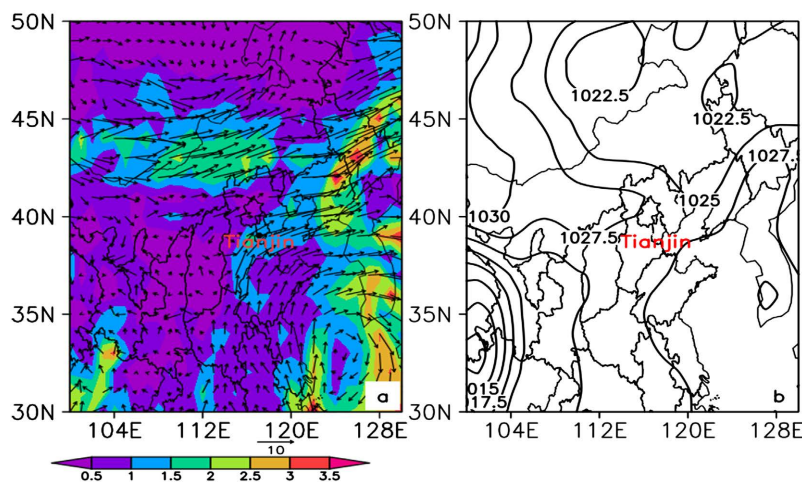


Figure 4. (a) 925 hPa wind field (vector, unit: m/s) and water vapor flux (contour, unit: g/hPa·s·cm) and (b) Sea level pressure field distribution at 02:00 on 1th Jan 2017

图 4. 2017 年 1 月 1 日 02 时(a) 925 hPa 风场(单位: m/s)、水汽通量(单位: g/hPa·s·cm)和(b) 海平面气压场(单位: hPa)

3.2. 雾微物理特征

在本次观测将雾滴谱仪放置在距地面 66 m 高度处, 获得并分析雾体空中微物理量的演变特征, 依据能见度和数浓度、液态含水量及表面积平均直径的演变趋势, 将 F1、F2 两次雾过程均划分为形成、成熟、消散三个阶段, 具体分析如下。

对于 F1 过程而言(图 5), 形成阶段时间范围为 31 日 15 时 23 分至 17 时 45 分, 能见度首次降至 1000 m 以下经 2 个多小时降至最低值 303 m, 实况风速小于 3 m/s, 低层湍流较弱, 雾首先形成于近地面, 由于雾滴谱仪放置在空中, 因此该阶段内虽然地面能见度迅速下降, 但从对应的微物理量来看, 空中雾滴数浓度和液态含水量仅小幅增加, 最大值分别为 14.292 cm^{-3} 和 $7.767\text{E}^{-4} \text{ g/m}^3$, 同时数浓度与含水量的演变具有一定的正相关性, 正如 Niu 等[10]研究微物理特性之间的相互关系时指出, 雾滴核化凝结增长或完全蒸发失活是数浓度与含水量呈正相关的主要原因, 且该阶段的平均直径为 $6.48 \mu\text{m}$, 表明形成阶段雾中以小雾滴的凝结核化过程为主。

31 日 17 时 45 分至 22 时 56 分为成熟阶段, 能见度进一步下降, 18 时 01 分后在 100 m 的低值区维

持近 3 小时的小幅波动状态, 雾发展加强, 数浓度急剧增长至 181.078 cm^{-3} 后又呈波动下降趋势, 这是由于雾滴之间的凝结核化和碰并增长的相互作用, 雾滴之间发生碰并增长会使数浓度下降, 雾滴直径增大, 而凝结核化产生的新雾滴又使数浓度增加, 因此该阶段数浓度值变化较大。雾滴表面积平均直径总体呈增大趋势, 该阶段雾滴最大尺度为 $17.423 \mu\text{m}$, 含水量最大值为 0.055 g/m^3 , 与形成阶段相比, 平均数浓度为 22.29 cm^{-3} , 比前一阶段增加约 2.5 倍, 平均含水量为 0.013 g/m^3 , 增加约 1 倍, 平均直径则增长至 $9.819 \mu\text{m}$ 。

消散阶段从 31 日 22 时 56 分到 1 日 00 时 13 分, 22 时 49 分地面能见度开始缓慢上升, 雾从地面开始消散, 22 时 56 分位于 66 m 高度雾层也开始消散, 雾滴数浓度和含水量持续下将, 平均数浓度减小至 6.432 cm^{-3} , 平均含水量变为前一阶段的 0.5 倍。

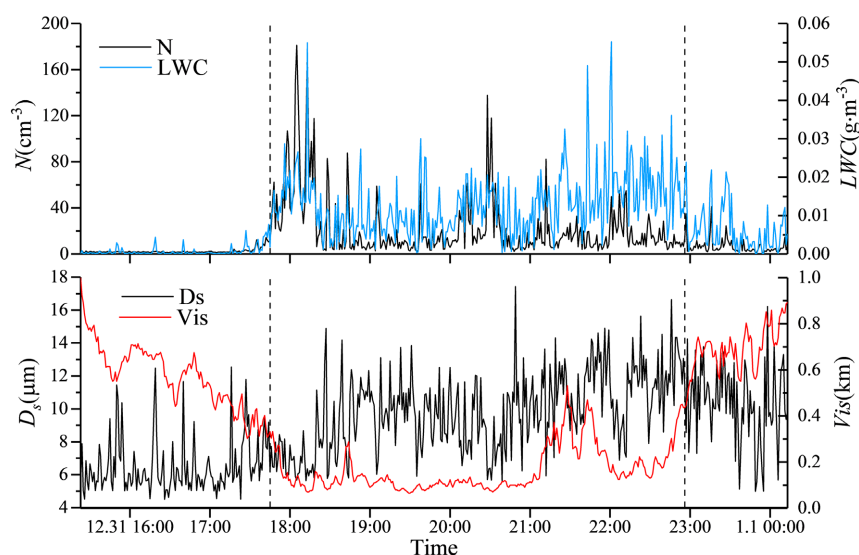


Figure 5. The variation of visibility, droplet concentration, liquid water content, and average diameter over time for the first fog event

图 5. F1 雾过程能见度、数浓度、含水量、平均直径随时间的变化图

F2 雾过程也从以下三个阶段讨论其微物理特征(图 6):

形成阶段(1 日 01 时 27 分至 02 时 36 分): 01 时 27 分能见度从 893 m 再次下降, 数浓度和含水量波动上升, 最大值分别为 59.435 cm^{-3} 、 0.015 g/m^3 , 该阶段平均直径为 $8.44 \mu\text{m}$, 与 F1 形成阶段的平均直径相比略大, 且数浓度与含水量的演变仍呈明显的正相关关系, 表明 F2 形成阶段雾体发展更加迅速, 雾中凝结增长起主要作用, 02 时 18 分随着能见度降至 200 m 以下, 雾也将进入下一阶段。

成熟阶段(1 日 02 时 36 分至 10 时 09 分): 雾发展为强浓雾, 能见度在 200 m 以下区间持续近 6 小时。数浓度增长一段时间后, 在低值区振荡起伏, 含水量则呈持续波动上升趋势, 09 时 36 分数浓度和含水量均达该阶段最大值 159.126 cm^{-3} 和 0.15 g/m^3 , 随后急剧下降, 表面积平均直径在进入消散阶段前总体上呈缓慢增长趋势。该阶段内, 数浓度平均值为 16.517 cm^{-3} , 与前一阶段相比增加 1 倍多, 含水量平均值为 0.027 g/m^3 , 与前一阶段相比增加约 6 倍, 但与 F1 雾过程成熟阶段相比平均数浓度有所下降, 平均含水量则显著增加约 1 倍。

消散阶段(1 日 10 时 09 分至 12 时 41 分): 雾从地面开始消散, 10 时 09 分能见度上升至 752 m , 受日出后太阳辐射影响, 雾滴开始蒸发, 数浓度、含水量与成熟阶段相比明显减小, 最小值为 0.65 cm^{-3} 和 $2.280 \text{ E}^{-5} \text{ g/m}^3$, 分别为两次雾过程中的最低值, 12 时 41 分地面能见度超过 1000 m , F2 雾过程结束。

值得关注的是，两次雾过程消散阶段，平均数浓度和平均含水量值与成熟阶段相比，均显著减小，但平均直径变化较小，F1 消散阶段的平均直径甚至超过成熟阶段，这可能是由于雾体内小滴蒸发的比大滴快，同时两次过程在短时间内接连发生，F1 期间未完全消散的大滴又参与到 F2 过程中，导致 F2 各阶段的平均直径普遍大于 F1 对应阶段的平均直径。

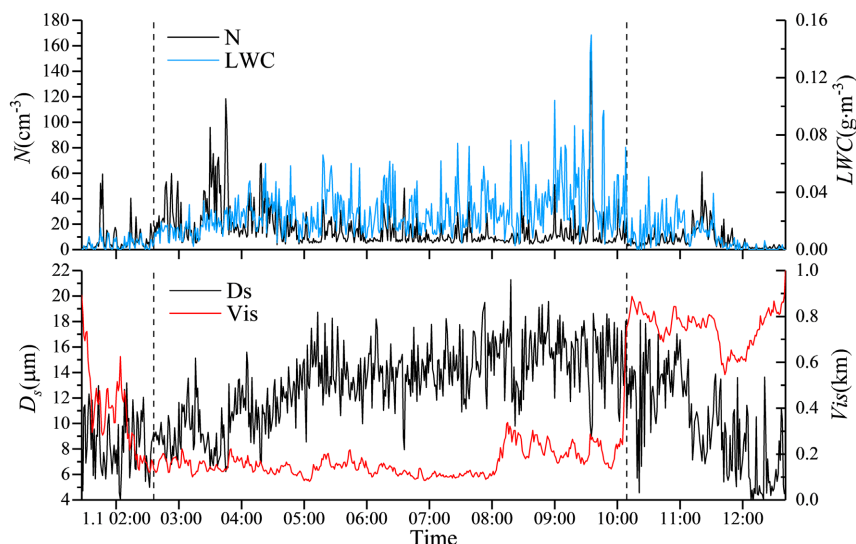


Figure 6. The change of visibility, droplet concentration, liquid water content, and average diameter over time for the second fog event

图 6. 第二次雾过程能见度、数浓度、含水量、平均直径随时间的变化图

3.3. 雾与颗粒物浓度的相互作用

气溶胶是指液体或固体微粒(粒子动力学直径在 0.003~100 μm 范围的液滴或固态粒子)均匀地分散在气体中形成的相对稳定的悬浮体系。其中 $\text{PM}_{2.5}$ 也称细粒子，包括粒径小于 2.5 μm 颗粒物的质量浓度； PM_{10} 也称可吸入颗粒物，指粒径小于 10 μm 颗粒物的质量浓度。

从图 5 和图 6 可看到，两次雾过程含水量与表面积平均直径的高值均出现在成熟阶段的后期，与之相反数浓度高值出现在成熟阶段初始时段，这是重污染大气背景下大量颗粒物竞争水份与雾过程湿清除的共同结果。Goodman [3] 在大陆西海岸夏季平流雾研究中也同样观测到雾滴平均直径随时间持续增长至雾消散的前一阶段。由图 7 可知，雾生成前，120 m、200 m $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 质量浓度整体呈上升趋势，浓度最大值超过 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，200 m $\text{PM}_{2.5}$ 浓度甚至达 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，这主要是由于天津地区在雾前一直处于重度霾天气，160 m 至塔顶为逆温或中性层结且垂直风速小，污染物不易扩散并积聚。

15 时后随着雾的形成，地面与空中 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 浓度急剧下降，一方面在雾发展过程中，气溶胶粒子作为凝结核参与到雾滴的凝结增长过程中，导致浓度降低；另一方面平流雾过程的雾滴偏大会导致雾水沉降过程的发生，也会使得气溶胶粒子被雾滴吸收或拖带至地面，表明重度霾背景条件下平流雾的有效清除作用，这种清除效应在 F2 过程消散前亦表现明显，F2 过程结束后颗粒物浓度又有所上升。而时宗波等[11]在研究北京雾过程对大气颗粒物浓度影响时发现大雾天气反而会加剧大气污染程度，这主要是由于雾中吸湿性颗粒物的大幅增加使水汽竞争加剧，导致大气水分不足，雾滴增长达不到沉降临界直径，大气颗粒物浓度升高。由于第一次雾过程的发展处于夜间，降至地面的雾滴不易蒸发，因此地面污染物浓度未明显上升。日出后可以看到，由于太阳辐射的作用，近地面处的雾滴蒸发，气溶胶粒子释放，地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与空中相比，上升趋势更加显著。

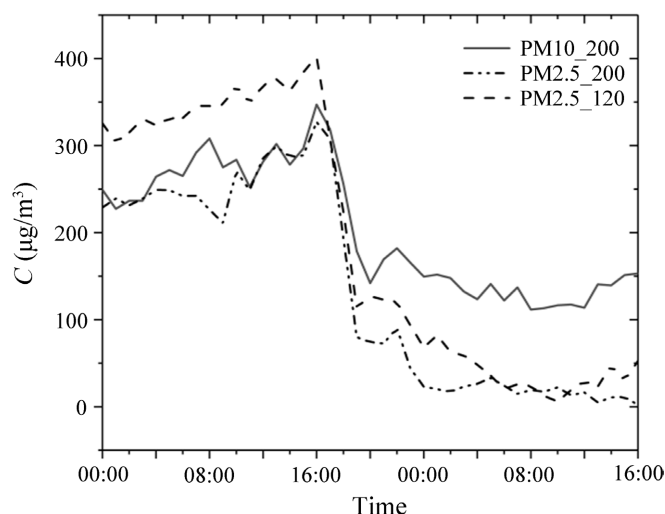


Figure 7. The variation of concentration of $PM_{2.5}$ (120 m and 200 m)/ PM_{10} (200 m) at the meteorological tower from 31 Dec 2016 to 1 Jan 2017

图 7. 2016 年 12 月 31 日至 2017 年 1 月 1 日气象塔 120 m、200 m 高度 $PM_{2.5}$ 及 200 m 高度 PM_{10} 浓度随时间演变

由实况可知，大范围雾区由西南向东北方向推进并完全覆盖了天津地区，结合天津地区地面不同站点的 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化趋势(图 8(a))，从 $PM_{2.5}$ 浓度急剧下降的时间点也可以初步判断天津地区雾区在水平方向的发展情况。从广海道、经跃进路、河西一经路、宝白公路、最后至东环路(图 8(b))，这 5 个站点的 $PM_{2.5}$ 浓度分别在 14:00、17:00、17:00、18:00、21:00 急剧下降，气象塔处于前两个站点之间，由前文分析可知，15:23 地面能见度降至 1000 m 雾发展起来，依据 $PM_{2.5}$ 浓度变化的大致时间点可知本次雾过程雾区由西南逐步向东北向延伸。

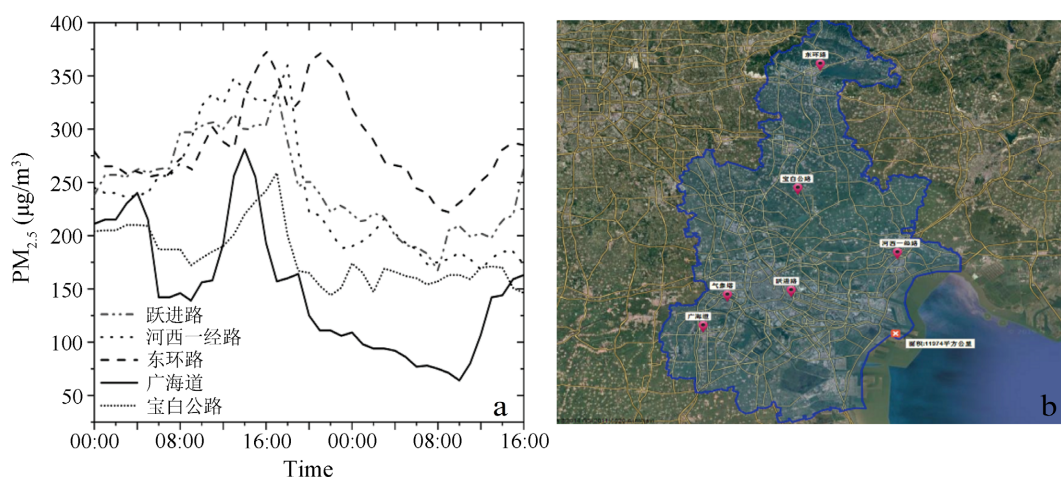


Figure 8. The distribution of $PM_{2.5}$ in the different station of Tianjin from 31 Dec 2016 to 1 Jan 2017 ((a): The change of $PM_{2.5}$ concentration, unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$; (b): The location of the stations)

图 8. 2016 年 12 月 31 日至 2017 年 1 月 1 日天津市地面不同站点 $PM_{2.5}$ 分布情况((a): $PM_{2.5}$ 质量浓度变化, 单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$; (b): 站点地理位置)

4. 结论

通过对 2016 年 12 月 31 日至 2017 年 1 月 1 日重度霾后天津地区一次持续性强浓雾过程的分析，可以得出以下结论：

1) 平流雾是在近地层西南暖湿气流的持续输送至降温所提供冷下垫面条件下形成的。高空脊前的负涡度平流维持地面均压场, 低层反气旋环流外围偏南气流促使暖湿空气向天津地区输送。

2) 66 m 高度数浓度高值出现在雾过程成熟阶段初期, 而含水量、特征直径高值出现在成熟阶段后期, 对应成熟阶段后期雾滴数浓度减少、地面能见度小幅跃升。

3) 重度污染造成较高的颗粒物浓度会导致雾滴数浓度增多, 竞争水汽的雾滴数增多则导致雾滴尺度偏小, 在重度霾天气背景下平流雾对颗粒物具有明显的湿清除效应。

4) 通过不同站点污染物浓度随时间变化趋势, 可以判断雾在水平方向的发展进程。

参考文献

- [1] 徐怀刚, 邓北胜. 雾对城市边界层和城市环境的影响[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 170-176.
- [2] Okita, T. (1962) Observations of the Vertical Structure of a Stratus Cloud and Radiation Fogs in relation to the Mechanism of Drizzle Formation. *Tellus*, **14**, 310-322. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v14i3.9556>
- [3] Goodman, J. (1977) The Microstructure of California Coastal Fog and Stratus. *Journal of Applied Meteorology*, **16**, 1056-1067. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016%3C1056:TMOCCF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016%3C1056:TMOCCF%3E2.0.CO;2)
- [4] Pinnick, R.G., Hoihjelle, D.L., Fernandez, G., et al. (1978) Vertical Structure in Atmospheric Fog and Haze and Its Effects on Visible and Infrared Extinction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **35**, 2020-2032. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035%3C2020:VSIAFA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035%3C2020:VSIAFA%3E2.0.CO;2)
- [5] Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S.C., et al. (2007) Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 1121-1159. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>
- [6] 牛生杰, 陆春松, 于华英, 等. Fog Research in China: An Overview [J]. 大气科学进展, 2010, 27(3): 639-662.
- [7] 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖, 等. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 2018, 44(7): 892-901.
- [8] 郭丽君, 郭学良. 北京 2009~2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 296-310.
- [9] 焦圣明, 朱承瑛, 朱毓颖, 等. 江苏地区一次罕见持续性强浓雾过程的成因分析[J]. 气象学报, 2016, 74(2): 200-212.
- [10] Niu, S., Lu, C., Liu, Y., et al. (2010) Analysis of the Microphysical Structure of Heavy Fog Using a Droplet Spectrometer: A Case Study. *Advances in Atmospheric Sciences*, **27**, 1259-1275. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-8192-6>
- [11] 时宗波, 贺克斌, 陈雁菊, 等. 雾过程对北京市大气颗粒物理化特征的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 551-556.