

天津大气扩散条件对污染物垂直分布的影响研究

刘敬乐^{1,2,4}, 史静¹, 姚青^{3,4}, 蔡子颖^{3,4*}, 韩素芹³, 姜明¹, 崔晔¹ (1.天津市气象探测中心, 天津 300074; 2.天津市海洋气象重点实验室, 天津 300074; 3.天津市环境气象中心, 天津 300074; 4.天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘要: 利用 2017~2019 年夏、冬季天津市大气污染物监测和气象观测数据, 基于天津气象铁塔垂直观测, 针对大气垂直扩散条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的影响进行研究。结果显示: 近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度的升高而下降, O_3 浓度则随高度的升高而上升, 受大气垂直扩散条件的季节和日变化影响, 冬季, 地面与 120m $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关明显, 与 200m $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度无明显相关。夏季, 120m 和 200m $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高于地面的情况。夏季, 不同高度 O_3 浓度差异小于冬季, 地面与 120m 高度 O_3 浓度接近。以大气稳定度、逆温强度和气温递减率作为大气垂直扩散指标, 对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 垂直分布具有指示作用。冬季, TKE 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关系数为 -0.65, 夏季, TKE 与 $\Delta \text{PM}_{2.5}$ 相关系数为 -0.39。夏、冬季 TKE 与地面 O_3 浓度的相关系数分别为 0.46 和 0.53, 与 ΔO_3 的相关系数分别为 0.73 和 0.70。弱下沉运动对地面 O_3 浓度影响较强, 40m 高度垂直运动速度与地面 O_3 浓度的相关系数在冬、夏季分别为 -0.54 和 -0.61。对冬季典型 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程的分析发现, 雾霾的消减维持和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化与大气稳定度、气温垂直递减率和 TKE 的变化有直接关系。对夏季典型 O_3 污染过程的分析发现, 近地面的 O_3 污染的形成与有利光化学反应的气象条件密切相关, 同时, 垂直向下输送和有利垂直扩散条件对 O_3 污染的形成和爆发影响明显。

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; O_3 ; 气象塔; 大气垂直扩散条件; 天津

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)04-1575-10

Effects of atmospheric diffusion conditions on vertical distribution of pollutants in Tianjin. LIU Jing-le^{1,2,4}, SHI Jing¹, YAO Qing^{3,4}, CAI Zi-ying^{3,4*}, HAN Su-qin³, JIANG Ming¹, CUI Ye¹ (1.Tianjin Meteorological Observation Center, Tianjin 300061; 2.Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074; 3.Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074; 4.Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074). *China Environmental Science*, 2022,42(4): 1575~1584

Abstract: Using the air pollutant monitoring data and meteorological observation data in summer and winter during 2017~2019 in Tianjin, the effects of atmospheric vertical diffusion conditions on $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 were studied based on the vertical observation of Tianjin Meteorological Tower. The results showed that the mass concentration of near-surface $\text{PM}_{2.5}$ decreased with height, while the concentration of O_3 increased with height. Influenced by the seasonal and diurnal variation of atmospheric turbulence intensity, there was a significant correlation between the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration on the ground and at 120m height, but insignificant correlation between the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration on the ground and at 200m height in winter. In summer, the correlation coefficient of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration at 120m and 200m height was 0.72 and the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration at 120m and 200m height were even higher than the ground in the afternoon. In summer, the difference of O_3 mass concentration at different heights is lower than that in winter, and the O_3 mass concentration were close to the ground at 120m height. Atmospheric stability, temperature inversion intensity, and temperature decline rate were taken as atmospheric vertical diffusion indexes, which had certain indicator effects on the vertical gradient of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 . The correlation coefficient between TKE and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration was -0.65 in winter, and that between TKE and $\Delta \text{PM}_{2.5}$ in summer was -0.39. The correlation coefficients between TKE and O_3 concentration were 0.46 and 0.53, in summer and winter respectively. The correlation coefficients between TKE and ΔO_3 concentration were 0.73 and 0.70, in summer and winter respectively. The weak downdraft has an obvious influence on the increase of O_3 concentration. The correlation coefficients between the vertical velocity at 40m height and O_3 concentration were -0.54 and -0.61 in winter and summer, respectively. Through the analysis of a typical $\text{PM}_{2.5}$ heavy pollution process and typical O_3 pollution processes, it is found that the changes of atmospheric stability, temperature decline rate and TKE were closely related to the generation, extinction, maintenance and variation of $\text{PM}_{2.5}$ pollutants. The formation of O_3 pollution near the surface was closely related to favorable photochemical reactions. In addition, the transport influence of downdraft should also be paid attention to during O_3 pollution processes.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; O_3 ; meteorological tower; atmospheric vertical diffusion conditions; Tianjin

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染是我国主要的大气环境问题, 近年来在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度总体下降的趋势背景下, 对流层的 O_3 浓度明显上升, 受到广泛的关注^[1-2]。污染发生的内因是排放量大, 外因是气象条件, 气象条件

收稿日期: 2021-09-02

基金项目: 天津市自然科学基金(19JCQNJC08000); 国家自然科学基金项目(41771242); 天津市重大专项(18ZXJQSF00130, 18ZXSZSF00160)

* 责任作者, 高级工程师, 120078030@163.com

可通过影响通风率、降水沉降、干沉积、化学转化损失率、自然排放量和背景浓度等影响大气气溶胶浓度和臭氧浓度.与人类活动关系最为密切的大气边界层结构不仅直接影响一次污染物的输送、积累和扩散,温湿条件以及大气氧化性等边界层内理化特性也会对二次气溶胶的生成和转化产生重要影响^[3],城市边界层特别是城市近地层的风、温、湿和湍流结构存在明显的时空变化^[4],对城市大量污染物的输送、扩散、化学转化和干湿清除起着重要作用^[5-6].

天津位于华北平原北部,东临渤海,地形和超大城市下垫面造成了其边界层结构具有独特的特点.随着天津城市化进程的加快以及滨海新区石化、化工、冶金等产业规模的扩大,不可避免地带来高排放的人为污染物,并在适宜的气象条件下形成重污染天气^[7].以往针对天津地区重污染天气中边界层的污染物浓度和化学组分^[8]污染形成机制^[9]以及利用地基遥感观测、气象塔和无人机等方式开展的地面污染物和气象要素垂直分布特征^[10-11]的研究已有诸多研究成果.其中,利用气象塔进行气象要素观测和大气污染物的监测具有较高的观测分辨率和时间连续性,是最为可靠的一种方式,以往利用气象塔开展针对典型雾霾天气过程中温湿和湍流特征等精细结构的变化规律研究^[12],大气稳定度、逆温等变化特征对PM_{2.5}污染的影响分析^[13],O₃、NO_x、CO、气溶胶等污染物的梯度观测及变化规律研究^[14-15],湍流强度等微气象要素对气溶胶和气态污染物的影响研究^[16-17],发现边界层高度^[18]、大气稳定度^[19]、理查森数^[20]、温度层结^[21]和湍流动能^[22]等表征大气垂直扩散能力的指标对重污染天气的形成发展具有指示作用.例如,当天津地区日均气温递减率小于0.4℃/100m时,垂直扩散条件不利于大气污染物扩散,中度以上污染出现概率明显增加^[23].天津地区的湍流扩散系数与PM_{2.5}质量浓度相关系数可以达到-0.56^[24].为更进一步深入了解天津大气垂直扩散条件对重污染发生、维持和消散过程的作用机理,本研究依托天津气象铁塔(以下简称气象塔),通过对2017~2019年天津主要污染物PM_{2.5}和O₃的立体监测数据以及同期气象观测资料的分析,旨在揭示湍流强度、大气稳定度、温度层结等近地面大气垂直扩散条件对污染物的影响规律,从微观角度进一步

增进对天津地区边界层结构和污染物垂直分布特征的深入了解,为建立重污染预报预警中大气边界层的识别条件因子提供支撑.

1 数据和方法

气象和空气质量监测数据来自2017~2019年冬(11月~次年2月)、夏季(6~8月)开展的综合立体观测,获得的包括天津13个国家级自动气象站和26个环保局监测站的观测数据以及气象塔的相关观测数据,站点位置如图1所示.天津气象塔塔高255m,位于中国气象局天津大气边界层观测站内(39°04'N, 117°12'E, 海拔2.2m),属于商业、居民混合点位,其周围环境基本代表了大城市复杂下垫面,气象塔5~250m安装15层风、温、湿度传感器,可实现风速、风向、温度和相对湿度的实时在线观测,气象塔40m高度平台安装有超声风速仪和H₂O/CO₂观测仪组成的涡动协方差观测系统,用以测量大气下垫面界面上的物质和能量交换,并能够从宏观和微观气象场上对污染过程进行解析.气象塔地面、120m和200m安装有3套空气质量监测站,包括PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂和O₃浓度监测仪器,可实现塔层内大气污染物的立体观测.本文应用的主要观测仪器参数如表1所示.

研究中的湍流动能(TKE)基于气象塔超声风速仪,在获取湍流数据基础上,基于德国拜耳罗大学研发的TK3软件计算获得,该软件包含了侧向风效应校正、野点值去除、坐标旋转处理、WPL修正等步骤,以及湍流平稳性检验、近地层湍流谱特征分析、湍流发展充分性检验和通量观测的空间代表性分析等数据质量评价方法,湍流计算时间长度选择30min.平均湍流动能的计算公式如下:

$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

式中 u' 、 v' 和 w' 分别为三维超声风速脉动量,TKE的单位为m²/s².

研究中的大气稳定度的计算采用了温差—风速法^[24],此方法能较好的反映大气热力湍流和机械湍流的影响.对大气稳定度分类标准如表2所示,大气稳定度A表示强不稳定,B表示不稳定,C表示弱不稳定,D表示中性,E表示较稳定,F表示稳定.以往研究结果证明^[11],对于天津地区,此种大气稳定度分类标准较为合理.

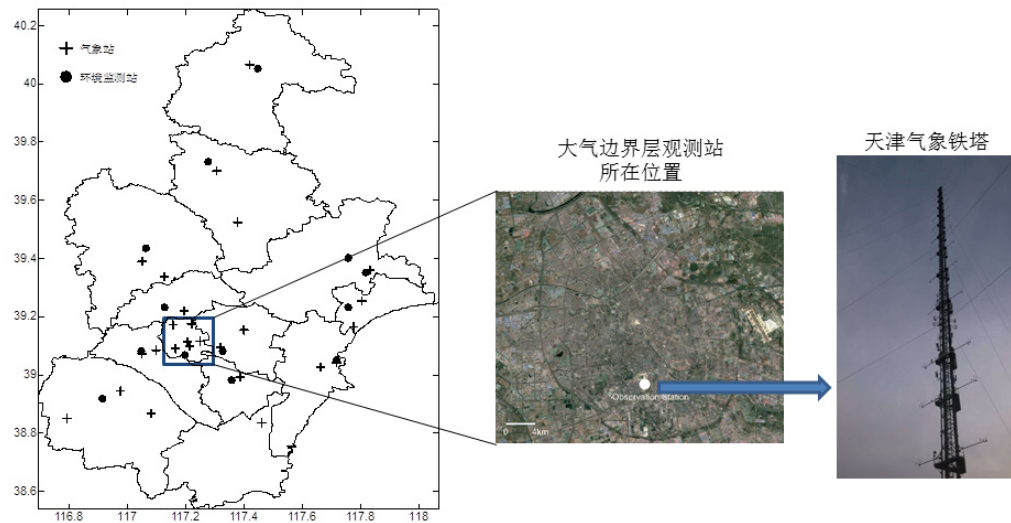


图 1 观测站点位置示意
Fig.1 Observation sites location

表 1 观测仪器参数
Table 1 Parameters of observation instrument

设备名称	观测要素	设备型号	范围	分辨率	采样频率
气象铁塔气象梯度观测	温度	WZP2	-40~60℃	0.05℃	1min
	湿度	DHC1	5~100%	1%	
	风向	EL15-2D	0~360°	3°	
	风速	EL15-1A	0~60m/s	0.1m/s	
三维超声风速	U_x	Campbell CSAT3	±30m/s	0.01m/s	10Hz
	U_y		±30m/s	0.01m/s	
	U_z		±8m/s	0.005m/s	
空气质量检测	PM _{2.5} 质量浓度	TEOM RP1405	0~1000μg/m ³	±0.1μg/m ³	5min
	O ₃ 质量浓度	Thermo 49i	0~1000μg/m ³	1.0ppb	5min

表 2 ΔT 和 u 组合法确定稳定度的分类标准
Table 2 Calculating stability classification by ΔT and u

$U(\text{m/s})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
0.0~0.9	$A \leq -1.13 < B \leq -1.03 < C \leq -0.91 < D \leq -0.37 < E \leq +0.78 < F$
1.0~1.9	$A \leq -1.18 < B \leq -1.05 < C \leq -0.91 < D \leq -0.22 < E \leq +1.12 < F$
2.0~2.9	$A \leq -1.39 < B \leq -1.18 < C \leq -0.97 < D \leq -0.16 < E \leq +1.25 < F$
3.0~3.9	$A \leq -1.61 < B \leq -1.33 < C \leq -1.00 < D \leq -0.10 < E \leq +1.32 < F$
4.0~4.9	$A \leq -1.82 < B \leq -1.48 < C \leq -1.04 < D \leq -0.04 < E \leq +1.39 < F$
5.0~5.9	$B \leq -1.62 < C \leq -1.08 < D \leq +0.02 < E \leq +1.46 < F$
6.0~6.9	$B \leq -1.77 < C \leq -1.16 < D \leq +0.08 < E$
7.0~7.9	$< C \leq -1.25 < D$
8.0~8.9	$< C \leq -1.40 < D$
≥ 10	D

注:表中 U 代表40m高度风速, ΔT 代表100m和30m高度温差.

2 结果与讨论

2.1 观测期间天津市空气质量特征

根据观测期间的天津生态环境局监测空气质量数据显示(图 2),天津地区冬季多以 PM_{2.5} 为首要

污染物.2017~2019 年冬季 PM_{2.5} 质量浓度分别为 60,75 和 70μg/m³,其中出现中度以上污染天气日数分别为 15,25 和 24d.2017~2019 年冬季 PM₁₀ 质量浓度分别为 92,110 和 89μg/m³,其中污染物超标日数分别为 14,24 和 22d,均为轻度或中度污染水平.近 3 年冬季 NO₂ 质量浓度分别为 51,54 和 52μg/m³,污染物超标日数分别为 10,19 和 11d,超标日均为轻度污染水平.近 3 年冬季中 O₃ 和 SO₂ 污染相对较低,其空气质量等级均达到优良水平.

天津地区夏季多以 O₃ 为首要污染物.2018 年和 2019 年夏季中 O₃ 日最大 8h 质量浓度滑动平均值(MDA8)分别为 165 和 155μg/m³,污染物超标日数分别为 45 和 41d,其中达到中度以上污染分别为 13 和 12d.夏季的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度明显低于冬季,近 2 年夏季 PM_{2.5} 质量浓度分别为 42 和 38μg/m³,超标日数分别为 2 和 4d;PM₁₀ 质量浓度分别为 68 和

$60\mu\text{g}/\text{m}^3$. 夏季 NO_2 和 SO_2 污染相对较低,其空气质量等级均达到优良水平.

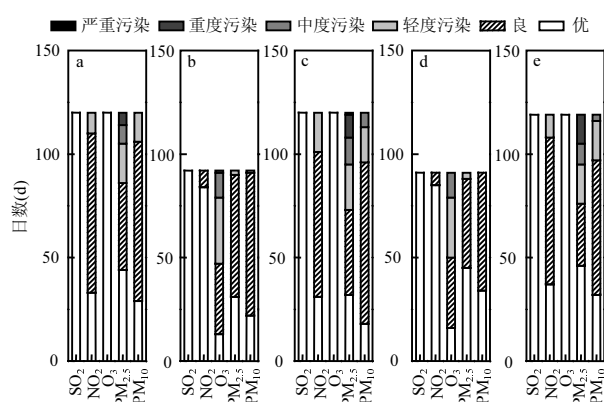


图2 观测期间空气质量等级日数

Fig.2 Air quality rating days during observation

a: 2017 年冬季;b: 2018 年夏季;c: 2018 年冬季;d: 2019 年夏季;e: 2019 年冬季

2.2 观测期间气象塔 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 质量浓度垂直分布特征

冬季观测期间,地面、120m 和 200m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别为 $74, 63$ 和 $42\mu\text{g}/\text{m}^3$. 受边界层结构以及污染来源差异的影响,在不同空气质量条件下,近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的垂直分布存在差异(图 3),当空气质量为优良时,较好的垂直扩散条件使各高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度接近. 当出现污染天气时,通常伴随大气垂直扩散条件减弱,因此各层 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度差异增大,轻、中度污染时,地面较 120m 和 200m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高约为 17%~35%和 40%~64%,当出现重度污染时,地面较 120m 和 200m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高约为 25%~42%和 40%~62%. 可见,120m 高度与地面的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度差异与地面污染程度明显相关,但 200m 高度由于超过常通量层,湍流输送下降,且受逆温、雾顶等边界层垂直结构的影响^[10], $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与地面污染程度无明显相关,这意味着冬季中 120m 到 200m 之间污染物无法充分的混合,导致大气污染物更多的被滞留在近地层内无法向上扩散. 夏季观测期间,地面、120m 和 200m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别为 $41, 34$ 和 $33\mu\text{g}/\text{m}^3$,由于大气垂直扩散条件普遍优于冬季,因此 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直混合均匀,120m 和 200m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化较为一致,两者相关系数达到 0.72^{**} (**表示通过 99% 置信度检验).

受大气垂直扩散条件变化的影响,不同高度

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日变化也具有明显差异. 冬季(图 4),受城市早晚交通高峰排放源影响,地面和 120m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均呈现明显的早晚高峰,午后波谷的特征,200m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日变化则较为平缓,主要是由于这一高度湍流输送作用明显减弱,因此局地污染对其影响较低. 同时,由于热力湍流作用对 120m 高度的影响较地面滞后,因此 120m 高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度峰值出现较地面滞后约 2h. 夏季,由于午后大气湍流运动较强,各高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度差异明显小于冬季,甚至可出现 120m 和 200m 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于地面的情况,在交通晚高峰阶段,热力湍流作用将更多的 $\text{PM}_{2.5}$ 从地面带向城市上空使地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度仍维持较低,但并不意味大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 含量减少^[3].

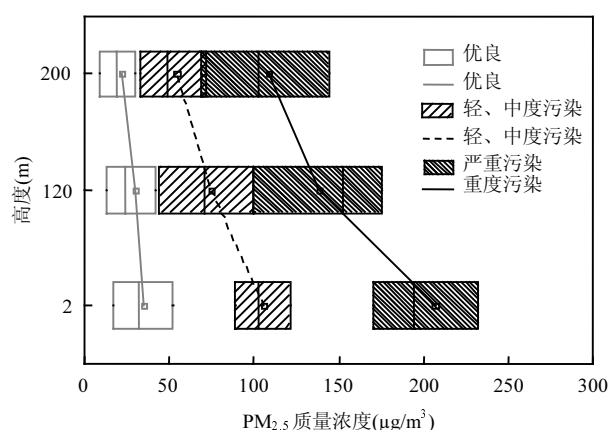


图3 冬季不同空气质量条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in different air quality conditions

箱型图表示 10 至 90 分位范围和中位值,廓线表示平均值

由于对流层内的 O_3 主要来自对流层的光化学反应生成和平流层内 O_3 的向下输送,因此, O_3 质量浓度的垂直分布特征与 $\text{PM}_{2.5}$ 差异明显,在大气边界层内通常呈现浓度随高度上升的特征^[20]. 冬季,地面、120m 和 200m 高度的 O_3 (MDA8) 值分别为 10, 19 和 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$. 天津地区 O_3 污染日主要出现在 5~9 月^[25], 夏季,地面、120m 和 200m 高度的 O_3 (MDA8) 值分别为 153、151 和 $178\mu\text{g}/\text{m}^3$. 各高度 O_3 质量浓度日变化(图 4)显示,由于近地面 O_3 浓度主要受光化学反应和 NO_x 、VOCs 等前体物质浓度影响^[26],因此 O_3 质量浓度日变化有明显的单峰型特征,日出后随着光化学反应强度增长和夜间残留层内 O_3 向下垂直混合作用的

影响,近地面 O_3 质量浓度迅速上升,并在中午到达一天中的峰值,午后随着光化学反应的减弱及地面排放的 NO 对 O_3 的滴定作用增强, O_3 质量浓度逐步下降,夜间由于区域输送作用很弱同时没有光化学反应生成,因此各高度 O_3 浓度通常较低且保持相对稳定.受地面排放源影响,地面的 O_3 质量浓度日变化最为显著,随着高度的升高,地面排放源影响逐渐减小,日变化趋于平缓.冬季,湍流运动相对较强的午间时段,不同高度 O_3 质量浓度相对接近,地面与 120m 和 200m 高度 O_3 浓度比分别为 0.76 和 0.71.午后,高层 O_3 质量

浓度下降速度明显慢于低层,夜间也维持相对较高的浓度,造成了夜间 O_3 浓度垂直差异增大,这是由于夜间湍流运动减弱,地面排放的 NO 等还原物质较难向上输送,对高层的 O_3 消耗量远小于低层^[20].夏季,各高度 O_3 质量浓度差异低于冬季,与夏季大气垂直扩散条件普遍优于冬季有关,日间,地面与 120m 高度的 O_3 质量浓度接近,在 9:00~14:00,地面 O_3 质量浓度甚至高于 120m,夜间浓度差异虽增加,但仍明显低于冬季同时段中的差异.由此可见,大气垂直扩散条件对 O_3 质量浓度的垂直差异具有显著的影响.

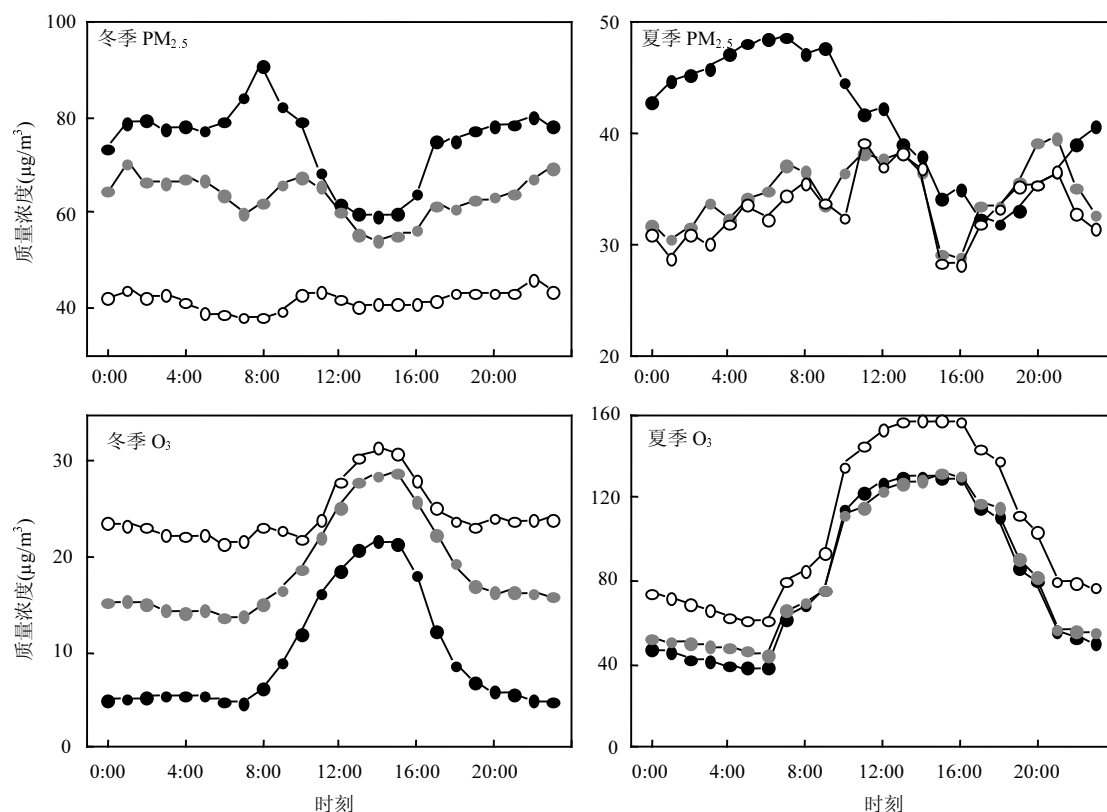


图4 天津冬夏季 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度垂直分布日变化

Fig.4 Diurnal variation of concentration vertical distribution of $PM_{2.5}$ and O_3 during observation

—●— 0m —●— 120m —○— 200m

2.3 边界层垂直扩散条件对大气污染物浓度的影响

大气污染物的垂直扩散能力可由湍流强度表征,湍流动能(TKE)是湍流强度的量度^[27]分析观测期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 TKE 的相关性发现(为降低风速和风向对 $PM_{2.5}$ 水平扩散的影响,仅分析水平风速小于 1m/s 的条件),冬季,两者相关系数达到 -0.65^{**} (图 5),夏季,由于 $PM_{2.5}$ 质量浓度普遍较低,因此两者相关系数仅为 -0.17 ,但 TKE 与 $\Delta PM_{2.5}$ (地面与 200m 高度浓度差值)的相关系数仍可达到 -0.39^{**} .

以往针对天津地区 TKE 对 $PM_{2.5}$ 影响的研究中指出^[14],当 TKE 为 $0\sim 0.3m^2/s^2$ 时,湍流受到抑制不利于污染物扩散;当 TKE 为 $0.3\sim 0.5m^2/s^2$ 时,湍流较弱,大气污染物日变化不显著;当 TKE 为 $0.5\sim 0.8m^2/s^2$ 时,湍流偏强,污染物浓度有明显的日变化,不易持续累积;当 TKE 为 $0.8\sim 2.0m^2/s^2$ 时,湍流较强,垂直扩散条件非常利于污染物扩散;当 TKE 大于 $2.0m^2/s^2$ 时,通常有大风或强对流天气过程,空气质量为优良等级.2018 年冬季观测期间出现的污染过程中,当 TKE 在上述 5 个区间时 $PM_{2.5}$ 质量浓度分别为 (172 ± 50)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, $(169\pm58)\mu\text{g}/\text{m}^3$, $(122\pm41)\mu\text{g}/\text{m}^3$, $(70\pm31)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(26\pm18)\mu\text{g}/\text{m}^3$.可见在水平风场影响较小的情况下,TKE 对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及其垂直分布影响显著.

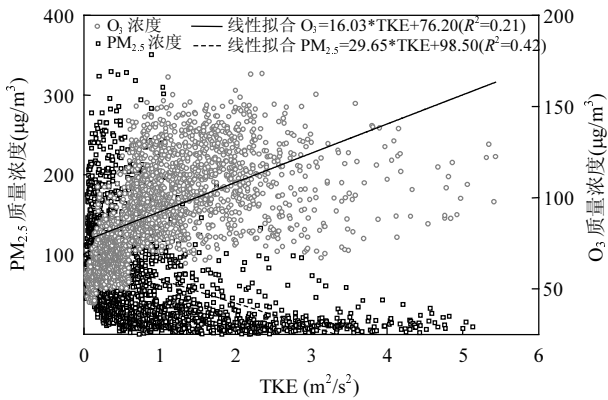


图 5 天津冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 和夏季 O_3 质量浓度与 TKE 分布关系
Fig.5 Distribution relationship between TKE and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in winter and O_3 mass concentration in summer in Tianjin

表 3 冬季不同大气稳定度等级下气温递减率、TKE 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

Table 3 Rate of temperature decrease, TKE and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in different atmospheric stability level							
大气稳定度等级	逆温出现概率(%)	逆温强度(℃/100m)	气温递减率(℃/100m)	TKE (m^2/s^2)	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\Delta\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
A	—	—	1.44 ± 0.31	2.02 ± 0.64	47 ± 47	11 ± 23	
B	—	—	1.43 ± 0.29	2.05 ± 1.42	48 ± 56	14 ± 24	
C	—	—	1.26 ± 0.34	1.31 ± 0.86	58 ± 55	21 ± 32	
D	52	0.18 ± 0.77	0.67 ± 0.52	0.68 ± 0.66	74 ± 64	32 ± 41	
E	67	0.91 ± 0.95	-0.27 ± 0.50	0.22 ± 0.20	101 ± 59	48 ± 39	
F	91	2.71 ± 1.47	-0.97 ± 0.55	0.14 ± 0.10	117 ± 52	70 ± 49	

表 4 夏季不同大气稳定度等级下气温递减率、TKE 和 O_3 浓度

Table 4 Rate of temperature decrease, TKE and O_3 mass concentration in different atmospheric stability level						
大气稳定度等级	逆温强度(℃/100m)	气温递减率(℃/100m)	TKE (m^2/s^2)	O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ΔO_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
A	—	1.48 ± 0.39	1.75 ± 0.76	102 ± 51	23 ± 11	
B	—	1.24 ± 0.29	1.74 ± 1.03	122 ± 60	23 ± 18	
C	—	1.18 ± 0.22	1.21 ± 0.78	89 ± 40	32 ± 28	
D	—	0.78 ± 0.37	0.79 ± 0.64	77 ± 41	30 ± 28	
E	0.60 ± 0.53	0.35 ± 0.69	0.76 ± 0.85	65 ± 30	46 ± 19	
F	1.86 ± 1.02	0.35 ± 0.24	0.76 ± 0.36	57 ± 28	46 ± 18	

近地面大气热力层结对污染的影响作用同样明显^[13],以往研究显示,大气层结稳定条件下多出现贴地逆温层,且逆温强度和逆温层厚度较高^[28],当夜间

大气稳定度为 E 以上以及白天大气稳定度为 D 及以上时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度会显著高于平均值^[24].冬季观测期间,逆温出现概率为 40%,平均逆温强度为 $0.95^\circ\text{C}/100\text{m}$.当大气稳定度为 A~C 时未出现逆温,随着大气稳定度增长,逆温出现概率和强度明显增加(表 3).同时,根据湍流促发条件,当出现位温逆温时湍流的发生也将受到抑制^[14],如表 3 所示,随着大气稳定度的增加,气温递减率和 TKE 均有明显下降,同时地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 有明显升高,当大气稳定度为 D 时,出现轻度和中度污染的概率接近 50%;当大气稳定度为 E 时,出现中度以上污染的概率为 67%;当大气稳定度为 F 时,出现中度以上污染的概率为 85%. TKE 对 O_3 质量浓度同样具有指示作用,在 O_3 主要生成的白天时段内(8:00~20:00)两者相关系数在夏季和冬季分别为 0.46^{**} (图 5)和 0.53^{**} . TKE 对 ΔO_3 (200m 与地面浓度差值)的影响更为明显,其相关系数在夏季和冬季分别达到了 0.73^{**} 和 0.70^{**} .通过对夏季 TKE 和 O_3 质量浓度的聚类分析发现,当 TKE 为 $0\sim0.5\text{m}^2/\text{s}^2$ 时,湍流受到抑制,残留层内 O_3 的向下传输和地面 O_3 前体物的向上输送能力弱;当 TKE 为 $0.5\sim1.0\text{m}^2/\text{s}^2$ 时,湍流较弱, O_3 质量浓度的垂直差异较大;当 TKE 为 $1.0\sim3.0\text{m}^2/\text{s}^2$ 时,湍流较强,利于残留层内 O_3 的向下传输和地面 O_3 前体物的向上输送能力, O_3 质量浓度垂直差异相对较小;当 TKE 大于 $3.0\text{m}^2/\text{s}^2$ 时,湍流强盛,通常伴有对流天气过程出现且近地面风速大, O_3 的水平和垂直扩散较快.2018 年夏季观测期间,当 TKE 在以上 4 个区间时,地面 O_3 质量浓度分别为 $(57\pm42)\mu\text{g}/\text{m}^3$, $(72\pm70)\mu\text{g}/\text{m}^3$, $(115\pm80)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(88\pm50)\mu\text{g}/\text{m}^3$.夏季观测期间,大气层结稳定度对地面 O_3 浓度和 ΔO_3 具有一定的影响,如表 4 所示,随着大气稳定度的增加,地面 O_3 浓度和 ΔO_3 明显降低,当大气稳定度等级为 A 和 B 时,出现 O_3 污染天气概率为 37%;当大气稳定度等级为 C 和 D 时,出现 O_3 污染天气概率为 12%;当大气稳定度等级为 E 和 F 时,未出现 O_3 污染.可见,湍流混合作用对近地面 O_3 浓度有着重要的影响,同时,这也是近年来大气垂直扩散能力改善后,华北平原 O_3 浓度持续升高的原因之一.^[25]地面 O_3 浓度的增加与近地面 O_3 的垂直向下输送运动直接相关^[9],通过分析 40m 高度的垂直运动速度与地面 O_3 质量浓度的具有明显相关性,冬、夏季的相关系数分别为 -0.54^{**} 和 -0.61^{**} .夏季,当垂直风

速大于 0 m/s , 即为上升运动时, O_3 平均浓度为 $(60\pm 29)\mu\text{g}/\text{m}^3$; 当垂直速度为 $0\sim -0.1\text{ m/s}$ 时, O_3 平均浓度为 $(87\pm 36)\mu\text{g}/\text{m}^3$; 当垂直速度为 $-0.1\sim -0.3\text{ m/s}$ 时, O_3 平均浓度为 $(121\pm 45)\mu\text{g}/\text{m}^3$; 当垂直速度小于 -0.3 m/s 时, O_3 平均浓度为 $(101\pm 30)\mu\text{g}/\text{m}^3$. 2018 年夏季, 40 m 高度的平均垂直速度为 -0.06 m/s , 但是在 O_3 中度污染日的平均垂直速度为 -0.15 m/s . 可见, 弱下沉运动对近地面 O_3 浓度增加的影响作用明显.

2.4 观测期间典型 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染过程分析

2.4.1 典型 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程分析 2019 年 1 月 10~14 日, 天津地区出现一次连续四日 AQI 超过 200 的重污染天气过程. 污染过程期间(10 日 7:00~14 日 23:00), 首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均值达到 $213\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中重污染时间占污染总时长的 84%. 从天气形势场分析, 1 月 10 日, 我国中东部地区高空受弱高压控制, 850 hPa 以偏西气流为主, 京津冀中南部处于低压槽区, 天气形势稳定, 伴随西南风的输送和本地不利的气象条件, 污染物快速积累, 10 日 20:00 空气质量达到重污染水平. 11 日夜间, 我国中东部地区出现大范围雾区, 12 日 03:00 天津开始出现雾天气, 并维持至 13 日 09:00, 其间由于雾顶的逆温以及小风、高湿度环境, 使细颗粒物快速累积和吸湿增长, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度从 $242\mu\text{g}/\text{m}^3$ 升至 $310\mu\text{g}/\text{m}^3$, 空气质量达到严重污染水平. 13 日午间, 天津受弱冷空气影响, 空气质量有所好转, 但 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度仍维持在 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上. 12 日下半夜至 13 日上午, 一股弱冷空气开始影响京津冀北部地区, 受锋前输送影响, 空气质量再度达到严重污染水平, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度升至 $330\mu\text{g}/\text{m}^3$. 13 日午间, 受冷空气影响, 大雾瓦解, 相对湿度迅速降低, 能见度有所回升, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有下降. 13 日夜间, 天津地区转为弱高压场控制, 随着风力减弱, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度持续升高, 天津再次出现严重污染天气. 14 日夜间随着冷空气侵入天津, 空气质量迅速好转, 污染过程随之结束.

从此次污染过程的气象条件和垂直扩散条件可以看到(图 6), 10 日白天, 大气由中性层结转向稳定, 大气稳定度以 C 和 D 为主, TKE 为 $0.5\sim 1.0\text{ m}^2/\text{s}^2$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始逐步升高, 10 日夜间, 由于贴地逆温层的形成, 大气垂直扩散条件下降明显, TKE 大部分时间在 $0\sim 0.3\text{ m}^2/\text{s}^2$, 大气稳定度达到 E, 至 11 日 03:00, 近地面气温垂直递减率已下降至 $-0.94\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$, 大

气垂直交换能力下降到一个极弱的水平, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到 $214\mu\text{g}/\text{m}^3$. 11 日白天, 大气垂直扩散条件仍维持较低水平, TKE 仅在 12:00 前后达到约 $0.3\text{ m}^2/\text{s}^2$, 由于大气垂直交换能力下降, 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 持续升高至 $250\mu\text{g}/\text{m}^3$, 120 m 和 200 m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到了 150 和 $130\mu\text{g}/\text{m}^3$. 11 日夜间至 13 日上午, 随着雾天气形成和维持, 近地面气温垂直递减率明显下降, 由于雾顶高度维持在 120 m 左右, 且雾顶存在 $4\sim 6\text{ }^\circ\text{C}$ 的强逆温, 因此, 雾过程中 120 m 和 200 m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度明显低于地面, 但由于污染物的持续积累, 仍分别达到 150 和 $128\mu\text{g}/\text{m}^3$. 13 日午间, 弱冷空气的侵入使雾天气过程结束, 但由于近地面仍维持着强度约为 $1\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 的逆温层结, TKE 没有明显跃升, 因此空气质量虽有所好转但仍维持在重度污染水平. 13 日夜间, 随着逆温强度增至 $3\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$, TKE 降至 $0.2\text{ m}^2/\text{s}^2$ 以下, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度再次超过 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$. 14 日午后, TKE 升至 $0.5\text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上, 由于大气垂直扩散条件转好, 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度有所下降, 但 120 m 和 200 m 高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所升高. 14 日 21:00 前后, 受冷空气影响, 逆温层结快速瓦解, TKE 升至 $3\text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上, 由于大气水平和垂直扩散能力的提升, 空气质量迅速恢复至优良水平.

综合而言, 此次重污染过程中大气稳定度、气温垂直递减率和 TKE 的变化与雾霾的生成维持和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化有较好的对应, 大气垂直扩散条件的变化对此次雾霾生成维持中的影响作用明显.

2.4.2 典型 O_3 污染过程分析 2018 年 6 月 6 日和 8 月 10 日, 天津出现了两次 O_3 重污染过程, 以下通过对两次过程中影响 O_3 的主要气象因素和大气垂直扩散条件的分析, 可以清晰其在 O_3 污染过程中的影响作用.

6 月 6 日当日最高气温达到 $38.5\text{ }^\circ\text{C}$, 10:00~14:00 平均紫外辐射强度为 $43.7\text{ W}/\text{m}^2$, 白天平均相对湿度为 35%(图 7), 气象条件利于光化学反应生成 O_3 . 同时, 当日天津地面受低压场控制, 天津地区有明显辐合风场, 水平风场的辐合对 O_3 的累积有重要的影响. 此次 O_3 污染过程前期(5 月 31 日~6 月 5 日), 天津一直处于 O_3 中度污染, 6 月 5 日 $\text{O}_3(\text{MDA8})$ 浓度已达到 $202\mu\text{g}/\text{m}^3$. 5 日午间平均垂直速度为 -0.49 m/s , TKE 为 $3.8\text{ m}^2/\text{s}^2$, 大气垂直扩散条件对高层 O_3 向下输送非常有利, 6 日午间, 垂直速度和 TKE 虽有所减弱, 但近地面较强的水

平辐合使 O_3 浓度剧增,上述条件对 O_3 的积累极其有利,最终导致 6 日 O_3 (MDA8)浓度达到 $337\mu g/m^3$.7 日的气温和湿度条件相对 6 日较不利于 O_3 生成,同时,7

日白天的平均垂直速度接近 $0m/s$,TKE 约为 $1.5m^2/s^2$,大气垂直扩散条件不利于 O_3 的向下输送,同时随着地面风场辐合减弱, O_3 浓度较前日明显下降.

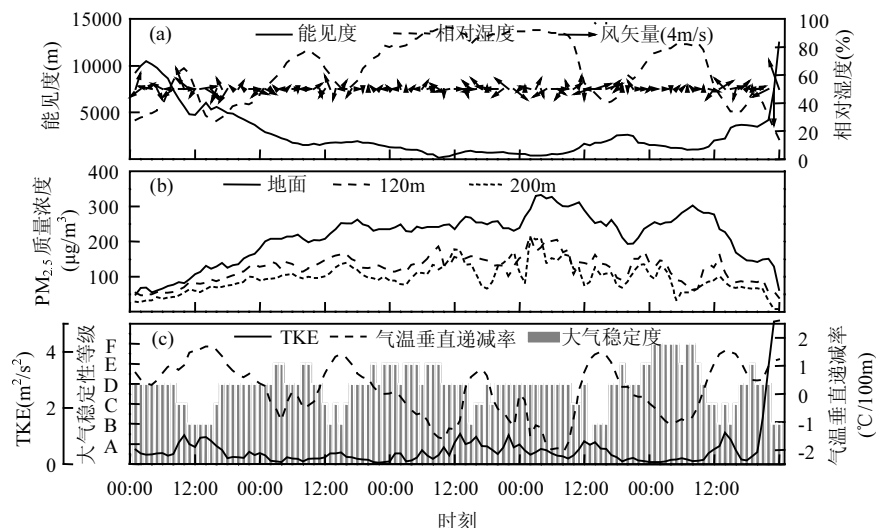


图 6 2019 年 1 月 10~14 日天津市地面能见度、相对湿度、风向风速, $PM_{2.5}$ 质量浓度和 TKE、大气稳定度、气温垂直递减率变化情况

Fig.6 Visibility, relative humidity, wind speed and direction, $PM_{2.5}$ mass concentration, TKE, atmospheric stability and vertical decline rate of air temperature in Tianjin during January 10th to 14th, 2019

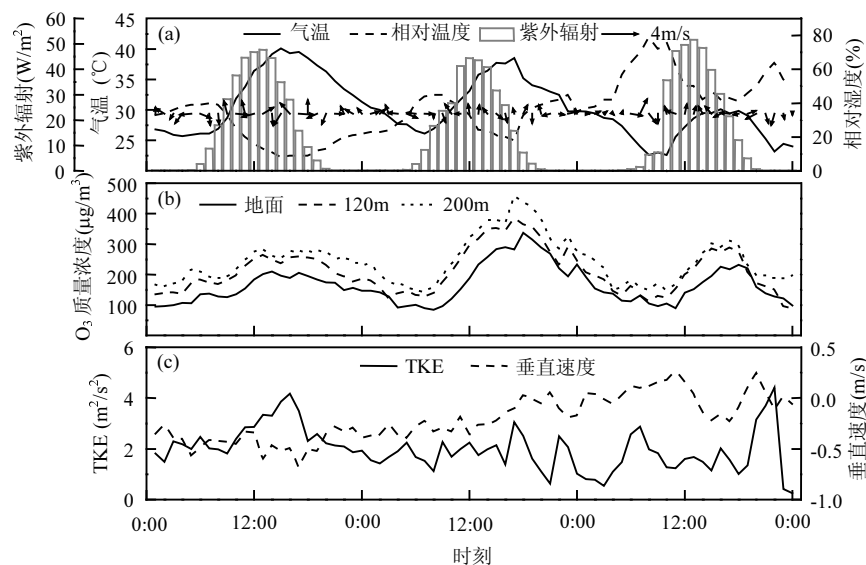


图 7 2018 年 6 月 5~7 日天津市气温、相对湿度、风向风速、紫外辐射强度, O_3 质量浓度和 TKE、垂直速度变化情况

Fig.7 Air temperature, relative humidity, ultraviolet radiation intensity, wind speed and direction, O_3 mass concentration, TKE, and vertical velocity in Tianjin during June 5th to 7th, 2018

8 月 10 日的 O_3 污染过程呈现明显的爆发特征,此次污染过程中地面 O_3 (MDA8)浓度达到了 $299\mu g/m^3$,为观测期间的最高值.8 月 10 日最高气温达到 $33.5^\circ C$,10:00~14:00 平均紫外辐射强度为 $33.0W/m^2$,日

间平均相对湿度为 57%(图 8),相较于 6 月 6 日,当日的光化学反应气象条件相对较差.同时,此次污染过程的 O_3 前期积累同样弱于 6 月 6 日,8 月 9 日 O_3 (MDA8)浓度为 $151\mu g/m^3$,10 日 8 时 O_3 浓度仅为 $63\mu g/m^3$.8

月 10 日的 O_3 浓度陡增与 O_3 向下输送密切相关,由于 8 月 10 日天津受高压脊控制,地面呈现北部弱高压,存在明显的下沉气流,10 日 9 时,随着向下气流的垂直速度由 0.23m/s 迅速升降至 0.56m/s 及 TKE 的快速增长,午后地面 O_3 浓度出现了爆发性增长,17:00 地面 O_3 浓度达到 $374\mu\text{g}/\text{m}^3$,从天津风廓线雷达和臭氧激光雷达

上同样可以清晰地看到此次 O_3 重污染过程中存在明显的下沉气流及高空高浓度 O_3 的向下输送。

综合以上两次 O_3 污染过程的分析可以发现, O_3 污染的形成与有利的光化学反应气象条件密切相关, O_3 的向下输送和利于地面 O_3 增长的大气垂直扩散条件对 O_3 污染的形成和爆发影响明显。

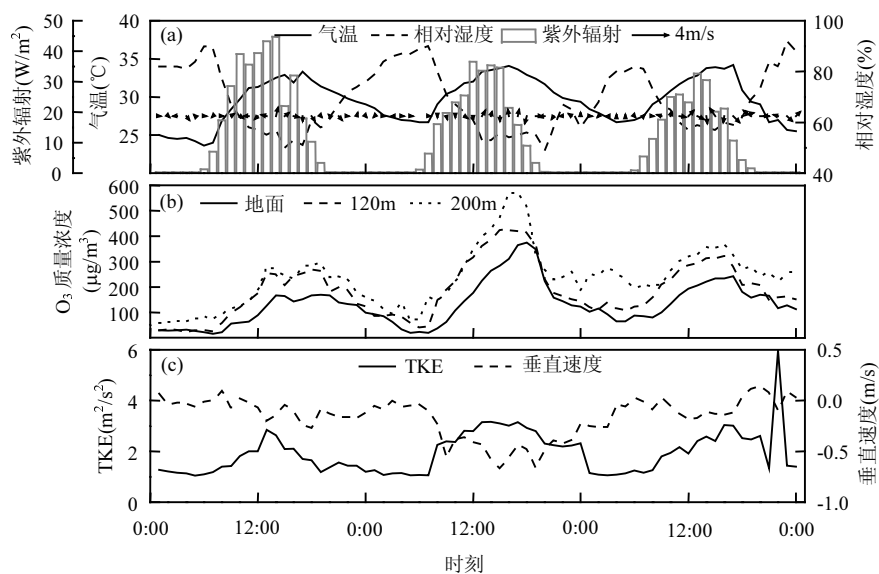


图 8 2018 年 8 月 9~11 日天津市气温、相对湿度、风向风速、紫外辐射强度、 O_3 质量浓度和 TKE、垂直速度变化

Fig.8 Air temperature, relative humidity, ultraviolet radiation intensity, wind speed and direction, O_3 mass concentration, TKE, and vertical velocity in Tianjin during August 9th to 11th, 2018

3 结论

3.1 对 2017~2019 年冬夏季天津地区首要污染物 $PM_{2.5}$ 和 O_3 质量浓度和气象要素的综合分析发现, $PM_{2.5}$ 质量浓度通常随高度上升而下降,冬季,受大气垂直扩散条件影响,120m 与地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关明显,而 200m 则与地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关不明显.夏季,在大气湍流发展最为强盛的午后时段,通常出现 120m 和 200m 高于地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度的情况,120m 和 200m 的 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化较为一致,两者相关系数达到 0.72^{**} .受地面排放源和大气垂直扩散条件影响, O_3 质量浓度呈现随高度上升的特征,地面 O_3 质量浓度日变化最为显著.夏季,各高度 O_3 质量浓度差异低于冬季,地面与 120m 高度 O_3 质量浓度接近。

3.2 对观测期间气象塔的 TKE、垂直速度、大气稳定性和温度层结的分析发现,在水平风场影响较

小情况下,TKE 与 $PM_{2.5}$ 和 O_3 质量浓度垂直分布有明显影响.冬季,TKE 与 $PM_{2.5}$ 质量浓度的相关系数为 -0.65^{**} ,夏季,TKE 与 $\Delta PM_{2.5}$ 的相关系数为 -0.39^{**} .夏季和冬季,TKE 与地面 O_3 浓度的相关系数分别为 0.46^{**} 和 0.53^{**} ,与 ΔO_3 的相关系数分别为 0.73^{**} 和 0.70^{**} .弱下沉运动对地面 O_3 浓度影响较强,40m 高度垂直运动速度与地面 O_3 浓度的相关系数在冬、夏季分别为 -0.54^{**} 和 -0.61^{**} .以大气稳定度、TKE、逆温强度及气温递减率作为大气垂直扩散的指标,对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度垂直分布具有一定指示作用。

3.3 对冬季典型 $PM_{2.5}$ 重污染过程的分析发现,雾霾的生消维持和 $PM_{2.5}$ 浓度的变化与大气稳定度、气温垂直递减率和 TKE 的变化有直接关系.对夏季典型 O_3 污染过程的分析发现, O_3 污染形成与有利的光化学反应气象条件密切相关,同时,垂直向下输送和有利垂直扩散条件对 O_3 污染的形成和爆发影响明显。

参考文献:

- [1] Wang T, Wei X, Ding A J, et al. Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China, 1994–2007 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009,(9):6216–6226.
- [2] 程麟钧,王 帅,宫正宇,等.中国臭氧浓度的时空变化特征及分区 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(11):5–14.
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, et al. Spatial and seasonal variation and regionalization of ozone concentrations in China [J]. *China Environ. Sci.*, 2017,37(11):5–14.
- [3] 蒋维楣.空气污染气象学 [M]. 北京:气象出版社, 2003:1–50.
Jiang W M. *Air pollution meteorology* [M]. China Meteorological Press, 2003:1–50.
- [4] 李旭晖.边界层气象学基本原理 [M]. 北京:气象出版社, 2018:1–100.
Li X H. *Basic principles of boundary layer meteorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018:1–100.
- [5] 张人禾,李 强,张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. *中国科学:地球科学*, 2014,44(1):27–36.
Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over Eastern China in January 2013 [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2014,44(1):27–36.
- [6] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考 [J]. *科学通报*, 2013,58(13):1178–1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chin. Sci. Bull. (Chin. Ver.)*, 2013,58(13):1178–1187.
- [7] 韩素芹.大气边界层对天津重污染天气影响研究及应用 [M]. 北京:气象出版社, 2020:1–168.
Han S Q. Influence of atmospheric boundary layer on heavy pollution weather in Tianjin and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020:1–168.
- [8] Wang J, Zhou M, Liu B S, et al. Characterization and source apportionment of size-segregated atmospheric particulate matter collected at ground level and from the urban canopy in Tianjin [J]. *Environ. Pollut.*, 2016,219:982–992.
- [9] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011,(11):8205–8214.
- [10] Han S Q, Liu J L, Hao T Y, et al. Boundary layer structure and scavenging effect during a typical winter haze–fog episode in a core city of BTH region, China [J]. *Atmos. Environ.*, 2018,179:187–200.
- [11] Han S Q, Zhang Y F, Wu J H, et al. Evaluation of regional background particulate matter concentration based on vertical distribution characteristics [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015,(15):11165–11177.
- [12] 姚 青,刘敬乐,蔡子颖,等.天津一次雾-霾天气过程的近地层温湿结构和湍流特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2018,38(10):3856–3867.
Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, et al. Analysis of temperature and moisture structure and turbulence characteristics of a smog and haze weather process in Tianjin [J]. *Acta Sci. Circumst.*, 2018,38(10):3856–3867.
- [13] 姚 青,刘敬乐,蔡子颖,等.天津大气稳定性和逆温特征对 $PM_{2.5}$ 污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2865–2872.
Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, et al. Atmospheric stability and inverse temperature characteristics of Tianjin and its effect on $PM_{2.5}$ pollution [J]. *China Environ. Sci.*, 2018,38(8):2865–2872.
- [14] 丁国安,陈尊裕,高志球,等.北京城区低层大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 垂直结构及其动力特征 [J]. *中国科学(D 辑:地球科学)*, 2005,35:31–44.
Ding G A, Chen Z Y, Gao Z Q, et al. Vertical structure of PM_{10} and $PM_{2.5}$ and their dynamical character in low atmosphere in Beijing urban areas [J]. *Sci. China (Ser. D)*, 2005,35:31–44.
- [15] 李 昕,安俊琳,王跃思,等.北京气象塔夏季大气臭氧观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2003,23(4):353–357.
Li X, An J L, Wang Y S, et al. Studies on the measurement of atmospheric ozone in summer with Beijing meteorological tower [J]. *China Environ. Sci.*, 2003,23(4):353–357.
- [16] Zhao H J, Wu B G, Liu J L, et al. Two air pollution events in the coastal city of Tianjin, north China plain [J]. *Atmos. Pollut. Res.*, 2019,(10):1780–1794.
- [17] Li Q H, Wu B G, Liu J L, et al. Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with $PM_{2.5}$ during haze episodes in winter in the North China Plain [J]. *Atmos. Environ.*, 2020,223:117265.
- [18] Liu Y S, Tang G Q, Zhou L B, et al. Mixing layer transport flux of particulate matter in Beijing, China [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019,19:9531–9540.
- [19] 孙兆彬,李梓铭,廖晓农,等.北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(5):1693–1705.
Sun Z B, Li Z M, Liao X N, et al. Influence of Beijing atmospheric thermal and dynamics structure on pollutants transport and diffusion conditions [J]. *China Environ. Sci.*, 2017,37(5):1693–1705.
- [20] Ren Y, Zhang H S, Wei W, et al. Comparison of the turbulence structure during light and heavy haze pollution episodes [J]. *Atmos. Res.*, 2019,230:104645.
- [21] 李东宸,林慈哲,银 燕.强对流天气对 O_3 和 CO 的垂直输送作用 [J]. *应用气象学报*, 2019,30(1):82–92.
Li D C, Lin C Z, Yin Y. The vertical transport of the ozone and carbon monoxide by severe convective weather [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.*, 2019,30(1):82–92.
- [22] 蔡子颖,张 敏,韩素芹,等.天津重污染天气混合层厚度阈值及应用研究 [J]. *气象*, 2018,44(7):911–920.
Cai Z Y, Zhang M, Han S Q, et al. Research on threshold and regularity of mixed layer thickness in heavy pollution weather in Tianjin [J]. *Meteor. Mon.*, 2018,44(7):911–920.
- [23] Jiang Y Y, Xin J Y, Wang Y, et al. The thermodynamic structures of the planetary boundary layer dominated by synoptic circulations and the regular effect on air pollution in Beijing [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2021,(21):6111–6128.
- [24] 蔡子颖,韩素芹,张 敏,等.天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 [J]. *环境科学*, 2018,39(6):2548–2556.
Cai Z Y, Han S Q, Zhang M, et al. Construction and application of vertical diffusion index for analyzing weather during pollution events in Tianjin [J]. *Chin. J. Envir. Sci.*, 2018,39(6):2548–2556.
- [25] 王 枚,郑有飞,柳艳菊,等.京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. *中国环境科学*, 2019,37(7):2689–2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, et al. Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. *China Environ. Sci.*, 2019,37(7):2689–2698.
- [26] 刘 健,吴 兑,范绍佳,等.前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(3):813–820.
Liu J, Wu D, Fan S J, et al. Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta [J]. *China Environ. Sci.*, 2017,37(3):813–820.
- [27] 邓雪娇,李 菲,吴 兑,等.广州地区典型清洁与污染过程的大气湍流与物质交换特征 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(9):1424–1430.
Deng X J, Li F, Wu D, et al. Turbulence and mass exchange characteristics of typical clean and pollution process over Guangzhou region [J]. *China Environ. Sci.*, 2011,31(9):1424–1430.
- [28] 刘敬乐,姚 青,蔡子颖,等.基于天津 255m 气象塔对近年天津近地面风和气温变化特征的研究 [J]. *气象*, 2020,46(9):1235–1244.
Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, et al. Analysis of temperature and wind variation characteristics based on the 255m meteorological tower in Tianjin [J]. *Meteor. Mon.*, 2020,46(9):1235–1244.

作者简介: 刘敬乐(1986–),男,天津人,工程师,硕士,主要从事大气边界层和环境气象研究.发表论文 30 篇.