

刘敬乐,姚青,蔡子颖,等,2020.基于天津 255 m 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,46(9):1235-1244. Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, et al, 2020. Analysis of temperature and wind variation characteristics based on the 255 m meteorological tower in Tianjin[J]. Meteor Mon, 46(9):1235-1244(in Chinese).

基于天津 255 m 气象塔对近年天津近地面风和气温变化特征的研究*

刘敬乐^{1,2,4} 姚青^{3,4} 蔡子颖^{3,4} 韩素芹^{3,4}
李英华^{1,2} 杨健博^{1,2,4} 郝 团^{1,2,4}

1 天津市海洋气象重点实验室,天津 300074

2 天津市气象科学研究所,天津 300074

3 天津市环境气象中心,天津 300074

4 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室,天津 300074

提 要:通过分析 2010—2018 年天津气象塔风、温度资料,对近年来天津城市边界层粗糙度、大气稳定性和逆温特征进行研究。结果表明:随着城市发展,气象塔周边各方向粗糙度和零平面位移明显增高,气象塔周边建筑物对 80 m 高度以下风场的影响较为明显。受湍流强度日变化影响,各季节中气象塔高层和低层风速日变化特征差异明显。通过温差-风速法计算大气稳定度发现稳定类层结多出现在秋冬季的夜间,稳定层结条件下逆温情况多发,其逆温强度、逆温层厚度和贴地逆温比例也明显高于不稳定和中性层结。天津城市热岛强度的时间分布表现出夜间强于白天,秋冬季强于春夏季的特征。城市热岛强度与大气稳定度时间分布具有一定相关性。

关键词:粗糙度,大气稳定性,逆温,气象塔,天津

中图分类号: P404

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.010

Analysis of Temperature and Wind Variation Characteristics Based on the 255 m Meteorological Tower in Tianjin

LIU Jingle^{1,2,4} YAO Qing^{3,4} CAI Ziyang^{3,4} HAN Suqin^{3,4}
LI Yinghua^{1,2} YANG Jianbo^{1,2,4} HAO Jian^{1,2,4}

1 Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074

2 Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074

3 Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074

4 CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074

Abstract: This paper investigated the roughness, stability and temperature inversion (TI) properties of urban boundary layer based on the analysis of wind and temperature observations from Tianjin meteorological tower. The results indicated that there is significant roughness length and zero-plane displacement in all directions of the meteorological tower under the influence of surrounding buildings. The impact of urbanization on wind field is more evident below 80 m. Affected by the diurnal variation of turbulence intensity, the diurnal variation characteristics of wind speed in the upper and lower levels of meteorological towers

* 天津自然科学基金项目(17JCQNJC08200)、国家自然科学基金项目(41771242)、天津市生态环境治理科技重大专项(18ZXSZSF00160)、天津市科技支撑项目(09ZCGYSF0210)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-007)共同资助

2019 年 8 月 28 日收稿; 2020 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者:刘敬乐,主要从事大气物理与大气环境研究. E-mail:liujinglxxx@163.com

are obviously different in each season. Based on the temperature difference-wind speed method, atmospheric stratification is found more stable in autumn and winter. The occurrence of TI is more frequent under stable conditions and both the intensity and height of TI are much larger than those under unstable and neutral conditions. Furthermore, the occurrence of TI near ground is more frequent under stable conditions, which is very favorable to severe air pollution episode. The intensity of urban heat island is correlated with the temporal distribution of atmospheric stability.

Key words: aerodynamic roughness, atmospheric stability, temperature inversion, meteorological tower, Tianjin

引 言

随着我国城市的迅速发展,城市环境问题已成为当前科学研究的重要内容。城市建筑群的兴起和人类活动对城市大气边界层的动力和热力过程具有显著的影响(Landsberg, 1981)。其中,城市建筑高度增高、密度增大,带来的城市下垫面粗糙度加大、城市风速减小的现象(周淑贞和余碧霞, 1988; 徐阳阳等, 2009),以及城市化造成的热岛效应和大气边界层垂直结构变化带来的污染问题被广泛关注和研究(Dupont et al, 1999; 卞林根等, 2002; 王郁和胡非, 2006)。Dupont et al(1999)利用冬季边界层探测试验资料研究了有利于城市热岛加强和污染增加的大气边界层垂直结构。卞林根等(2002)对北京冬季大气廓线的研究表明城市和郊区风廓线均受到城市覆盖层的影响。张宏昇和陈家宜(1997)利用单一高度湍流资料确定了空气动力学参数,指出下垫面零平面位移和地表粗糙度与风向以及北京气象塔周边城市建筑情况的联系。徐阳阳等(2009)对北京夏季气象塔资料的研究发现,下垫面粗糙度和零平面位移随着城市发展有明显增长,并且对近地面风速的影响逐渐增强。

天津作为我国直辖市之一,近年来城市发展迅速,范围扩大,建筑物高度增长、密度增大,这些变化都会对天津城市大气边界层特征产生影响。近几年对天津近地面气象场的研究表明,随着城市下垫面的改变,空气动力学粗糙度有所增长,并且对边界层风场产生明显影响(解以扬和刘学军, 2003; 韩素芹等, 2008),同时天津城市热岛强度也呈现出逐年增高的趋势(刘伟东等, 2016)。针对天津地区大气污染中近地面大气层结的研究指出,逆温层厚度和大气层结稳定性是影响污染的主要气象因素(Han et al, 2015; Hao et al, 2015; 蔡子颖等, 2018)。本文通

过对天津气象塔 2010—2018 年风和温度数据进行分析,对近年来天津城市边界层粗糙度、大气稳定度、逆温和城市热岛的变化特征进行研究,揭示天津城市大气边界层热力和动力结构特征,从而为了解城市边界层变化规律对大气污染的影响提供可靠的依据。

1 资料与方法

本文利用天津气象局 2010 年 1 月至 2018 年 12 月的气象数据。天津气象塔位于中国气象局天津大气边界层观测站内(以下简称观测站),塔高 255 m,与天津城市气候监测站处于同一位置,该站位于天津城区南部,周边分布高层建筑物,为典型城市下垫面。在对城市热岛分析中考虑到局地地形和海岸环境带来的影响,参考以往研究结果(黄利萍等, 2012),以天津城市气候监测站作为城区代表,以武清、静海(远郊)和西青、北辰、津南、东丽(近郊)6 个国家一般(基本)气象站作为郊区站代表。观测站点位置如图 1 所示。

气象塔观测数据来自距地面 5、10、20、30、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220 和 250 m 共 15 层观测平台的自动气象站,自动气象站设备型号为天津中环天仪 DDZ6 型,仪器采样频率为 60 s,风速分辨率为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气温分辨率为 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,风速精度为 $\pm 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气温精度为 $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。数据经过严格质量控制(金莉莉等, 2016)后取小时平均值。

本文采用温差-风速法计算大气稳定度,此方法能较好地反映大气热力湍流和机械湍流的影响(王式功等, 2002)。对大气稳定度分类标准如表 1 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,对于天津地区,此种大气稳定度分类标准较为合理(蔡子颖等, 2018; 姚青等, 2018)。

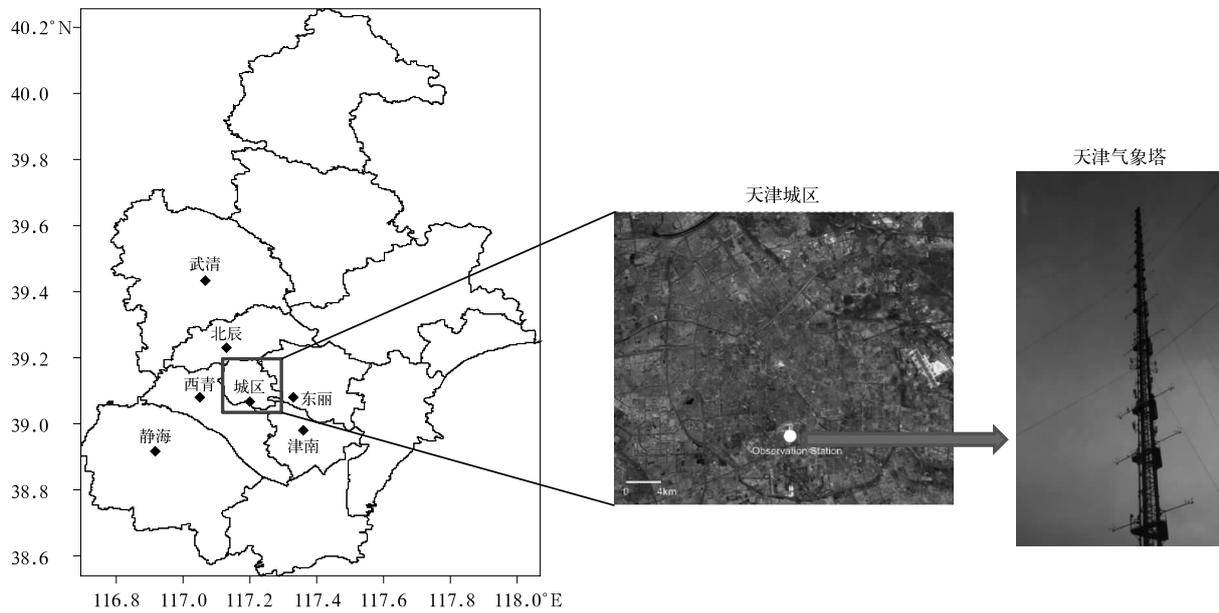


图 1 观测站点位置分布
Fig.1 Observation station location

表 1 ΔT 和 U 组合法确定稳定度的分类标准
Table 1 Calculating stability classification by ΔT and U

$U/(m \cdot s^{-1})$	$\Delta T/^\circ C$
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 40 m 高度风速, ΔT 代表 100 m 和 30 m 高度的温差。
Note: U indicates the wind speed at 40 m height, ΔT indicates the temperature difference between 100 and 30 m heights.

考虑到气象塔 5 m 处气温受地面辐射影响较大(气象塔基为水泥地面),造成 5 m 与 10 m 处气温差距相对较大,因此在对逆温的分析中以气象塔 10~250 m 共 14 层温度数据进行逆温的计算,当出现高层温度高于低层温度,记作一次逆温出现,当有逆温层底高度为 10 m 的情况出现时记为贴地逆温,同时考虑到温度传感器精度影响,对于高、低层温差 $\leq 0.2^\circ C$ 的情况不记作逆温。

本文中粗糙度的计算方法是根据温差-风速法计算大气稳定度基础上,选择中性大气稳定度层结条件下的风廓线,依据莫宁-奥布霍夫相似理论,利

用中性层结下近地面水平风速满足对数律方法将近地面风速廓线迭代求最佳拟合解方法(Monin and Obukhov, 1954)。按照下式计算不同方位的平均粗糙度 z_0 :

$$z_0 = \exp\left(\frac{u_1 \ln z_i - u_i \ln z_1}{u_1 - u_i}\right)$$

式中: u 为风速, z 为离地面的实际高度, z_0 为地面粗糙度,下标 1, i 为选择计算的高度层, 本文选择 40、60、80、100 m 高度风速进行计算。根据莫宁-奥布霍夫相似理论,当大气处于中性层结时,近地面水平风速 U 满足对数律,如下式:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

式中： u_* 为近地面摩擦速度， κ 为 von Karman 常数，一般取值为 0.4， z 为离地面的实际高度， z_0 为地面粗糙度， d 为零平面位移。根据经验关系通常有 $d=cz_0$ ，其中 c 为常数，一般取值为 5~8 (Stull, 1988)，通过选取不同的 c 值，对 u 和 $\ln(z-d)$ 进行线性回归计算，当 u 和 $\ln(z-d)$ 相关系数达到最大时认为 d 值最接近真实情况。

2 结果与讨论

2.1 天津近地面风速风向变化特征

2010—2018 年气象塔 10 m 高度平均风速为 $1.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，仅为同时期西青站平均风速 ($2.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的 50% 左右。对近 10 年气象塔不同高度风速年均值变化的分析发现 (图 2)，气象塔 80 m 高度以下风速呈下降趋势，80 m 及以上高度风速没有表现出明显变化趋势。受大气环流和地形分布影响，天津地区冬季偏北风向出现频率较高，从冬季气象塔不同高度风玫瑰图 (图 3) 可以看出，气象塔 80 m 以上高度层的风向均以偏北风向为主，而气象塔 80 m 以下高度层的风向分布则较为紊乱。综上分析可以发现，气象塔 80 m 高度以下风速和风向的变化特征受气象塔周边下垫面影响，近年来对北京 (彭珍和胡非, 2006; 徐阳等, 2009) 和石家庄 (卞韬等, 2018) 等一些城市近地面风场特征的研究同样发现了城市快速发展导致近地面风场结构变化这一特征。

通过对气象塔不同高度的风速日变化分析发现，除下垫面和大气环流背景以外 (陆龙骅等, 2002; 吴息等, 2014) 近地面大气湍流强度的日变化也是影响近地面风速日变化的主要因素之一。日出后随着地面增温湍流逐渐增强，气象塔高层空气动量下传加强，使气象塔底层风速逐渐升高，在湍流运动强盛的午间时段，气象塔底层风速达到最高。午后，随着气温下降，湍流运动逐渐减弱，气象塔各层风速均开始下降。日落后，受地面辐射冷却影响，大气层结趋于稳定，气象塔高、低层空气动量交换减弱，气象塔高层风速逐渐上升，低层风速逐渐下降，各层风速趋

于稳定。从图 4 中可以发现，由于各季节湍流强度日变化不同，使气象塔风速日变化在不同季节中有所差异。春季，自 06 时开始，气象塔 120 m 高度以下风速逐步上升，120 m 高度以上风速逐步下降，120 m 以下风速的峰值区和 120 m 以上风速谷值区出现在 12—15 时。16 时起，120 m 以下风速逐渐下降，18 时起，120 m 以上风速开始逐步上升。秋季，由于大气环流影响，风速整体低于春季，随湍流下传的空气动量比春季低，因此日出后气象塔 120 m 高度以下风速的上升趋势及 120 m 以上高度风速下降趋势均较春季缓慢，午间气象塔 120 m 高度以下的风速开始下降时间为 13 时左右，可见秋季气象塔低层风速峰值区持续时间较春季短。夏季，自 05 时开始，气象塔 140 m 高度以下的风速开始逐步上升，同时 140 m 高度以上的风速逐渐下降，09 时前后 140 m 高度以上的风速降至谷值区。由于夏季湍流发展强盛，因此空气动量下传比其他季节快，09 时开始，气象塔 140 m 高度以上的风速也开始逐步升高。17 时起，随着湍流逐步减弱，气象塔各高度的风速均开始下降，21 时以后，140 m 高度以上的风速开始上升并逐渐趋于稳定。冬季，自 07 时起，气象塔 120 m 高度以下的风速逐渐升高，120 m 高度以上的风速逐渐下降。由于冬季湍流发展较弱，因此 13 时起，气象塔各高度层的风速均开始下降，17 时后气象塔 80 m 高度以上的空气动量下传减弱，其风速开始逐渐上升并趋于稳定。

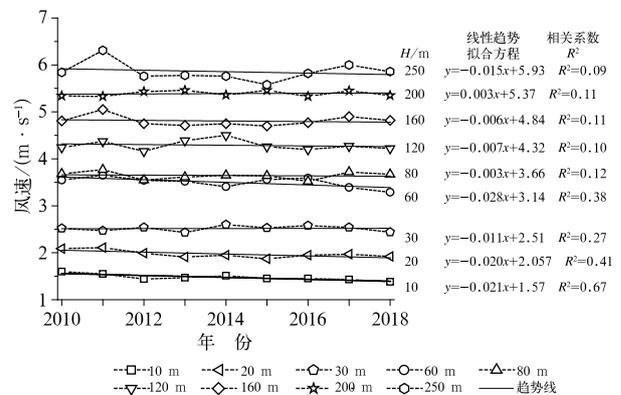


图 2 2010—2018 年气象塔不同高度风速年均值及变化趋势

Fig. 2 Annual average and linear trend of wind speed from Tianjin Meteorological Tower from 2010 to 2018

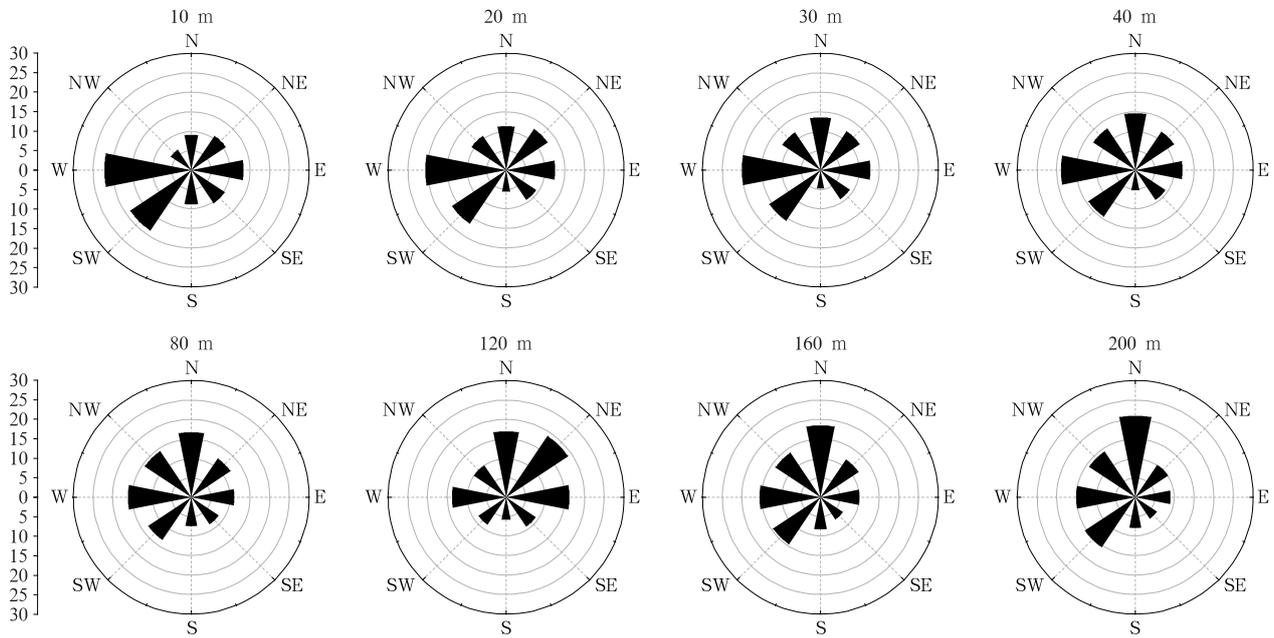


图 3 2010—2018 年冬季不同高度风向分布比例 (单位: %)

Fig. 3 Distribution ratios of wind direction at the Tianjin Meteorological Tower in winter from 2010 to 2018 (unit: %)

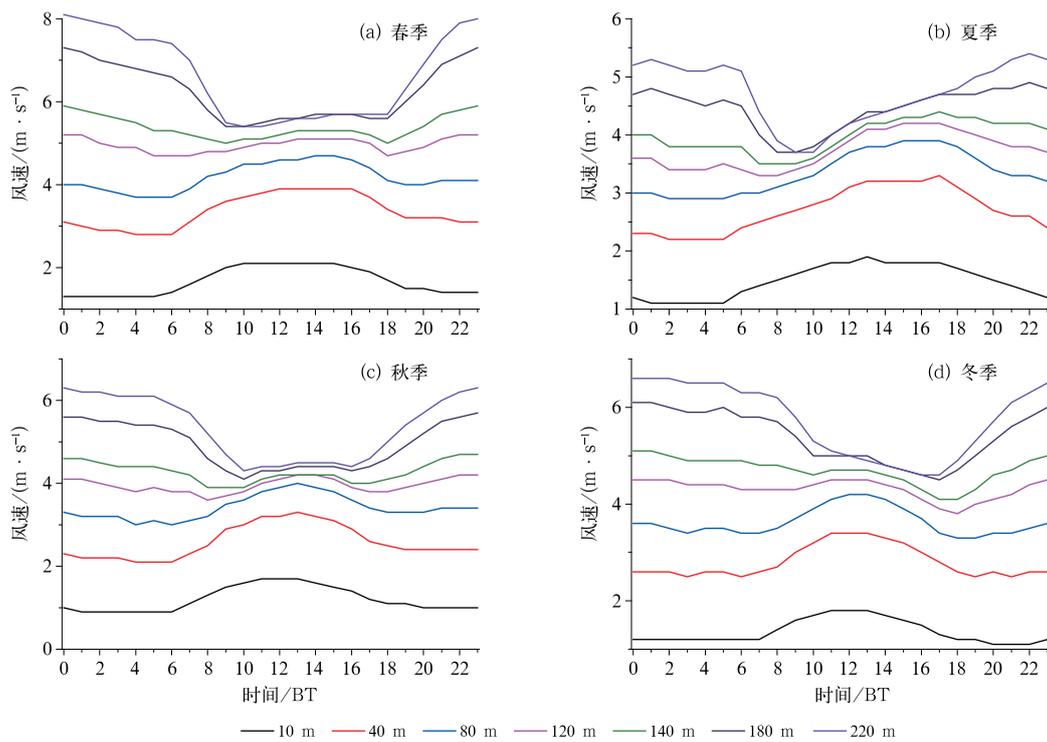


图 4 2012—2018 年各季节气象塔不同高度风速日变化

Fig. 4 Diurnal variation of wind speed at different heights of Tianjin Meteorological Tower in each season from 2010 to 2018

从以上分析可以发现,气象塔高、低风速日变化型不同,且在高、低层间存在一个过渡层,即转换高度,各季节中冬季的转换高度最低,约为 80 m,夏季

的转换高度最高,约为 140 m,春、秋季的转换高度约为 120 m。同时,各季节中气象塔不同高度层风速日变化幅度,具有越接近转换高度层,风速日变化

幅度越小的特征(表略)。

2.2 天津城市下垫面空气动力学参数的变化

通过计算 2010—2018 年天津气象塔各方位粗糙度年变化(表 2),可以发现,对 2010—2018 年气象塔各方位粗糙度的计算结果均明显高于 1996—2005 年的计算结果(韩素芹等,2008)(表 2),这与近年来气象塔周边建筑物高度和密集度增长有直接关系。天津气象塔 2010—2018 年粗糙度计算结果与北京气象塔 2000 年左右粗糙度计算结果接近,以往相关研究表明,近年来我国城市快速发展是城市的下垫面粗糙度增长较快的主要原因(张宏昇和陈家宜,1997;高志球等,2002;徐阳阳等,2009;李倩等,

2003)。天津气象塔地处天津城区南部,其偏北方向分布高层城市建筑群较多,因此计算结果中偏北方向的粗糙度大于偏南方向粗糙度,但从结果也可发现,由于近年来城市建设快速发展,气象塔偏南方向与偏北方向粗糙度的差距已经较 2005 年明显减小。通过对 u 和 $\ln(z-d)$ 的相关系数,计算得出当 $d=8.0z_0$ 时 u 和 $\ln(z-d)$ 相关系数最高,因此根据粗糙度计算结果得出气象塔周边的零平面位移高度约为 30 m 左右,此结果较 2005 年的 15 m(韩素芹等,2008)有较明显的增长。可见,随着城市发展建筑物高度和密度增加,下垫面粗糙度和零平面位移增长,对气流的拖曳作用越明显,使得城市近地面风速减小。

表 2 天津气象塔各方位粗糙度(单位:m)的年际变化

Table 2 Interannual changes of surface roughness of Tianjin Meteorological Tower (unit: m)

年份	方位							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1996	1.10	0.86	0.29	0.29	0.37	0.39	0.92	1.04
1999	1.09	0.89	0.32	0.35	0.38	0.41	0.99	1.06
2003	1.17	0.85	0.44	0.41	0.45	0.45	0.79	1.10
2005	1.16	0.86	0.43	0.41	0.46	0.46	0.91	1.10
2010	4.72	2.24	2.60	3.02	3.17	3.16	2.99	4.02
2011	4.16	2.38	2.73	2.44	4.76	3.59	3.72	3.88
2012	4.35	2.94	4.29	2.61	3.67	3.24	3.10	4.22
2013	4.25	1.87	4.17	2.77	3.42	4.88	4.03	4.57
2015	4.32	2.87	2.58	2.80	3.48	2.61	2.60	4.75
2016	4.15	3.00	3.38	2.72	3.58	2.91	3.09	4.74
2017	3.50	2.68	2.46	2.81	3.13	3.06	2.71	3.02
2018	4.28	3.38	2.17	2.82	2.53	3.06	2.94	3.66

注:1996—2005 年参考韩素芹等(2008)

Note: 1996—2005 data are quoted from Han et al (2008).

2.3 天津大气稳定度和逆温特征

考虑到 2016—2018 年气象塔观测数据连续性能较好地概括各季节的稳定度特点,因此在稳定度分析中选取 2016—2018 年观测数据进行分析。通过 2016—2018 年天津大气稳定度计算结果可以发现,受边界层内热力和动力因子影响,大气稳定度分布的季节和昼夜变化特征明显,春夏季出现不稳定类层结(A 和 B 类)概率高于秋冬季,秋冬季出现稳定类层结(E 和 F 类)概率较高。受白天热力对流发展影响,白天时段内大气层结以不稳定类层结为主,其出现概率高于 60%,由于夜间辐射冷却抑制热力对流作用,因此夜间的大气层结以中性层结(C 和 D

类)和稳定类层结为主,其中秋冬季夜间最易出现稳定类层结,出现概率约为 30%~60%。从近 3 年逆温频率的时间分布可以看到(图 5),逆温发生频率的季节和日变化特征与太阳辐射的日变化特征有较强的相关性(张敏等,2018),逆温现象主要发生在夜间,其中秋冬季夜间更易出现逆温,1—4 月夜间逆温发生概率为 30%~40%,10—12 月夜间逆温发生概率达到 50%。白天时段的大气层结以不稳定类层结为主,因此出现逆温的概率一般低于 5%,而 7—8 月中白天逆温概率为 10~20%,这是由于在较强对流天气情况下近地面可能会出现逆温情况造成的。

图 6 给出了近 3 年中逆温层底和逆温层顶高度

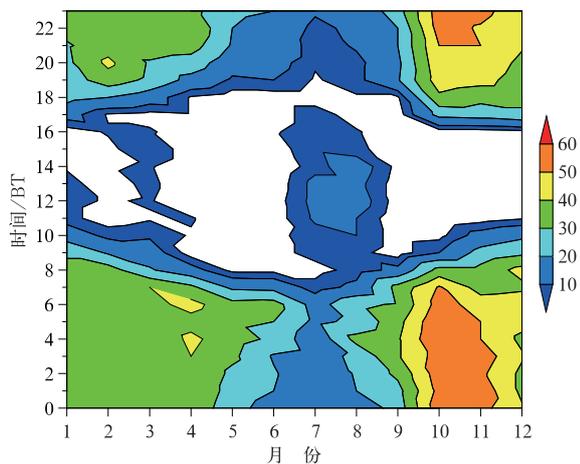


图 5 2016—2018 年各月逆温频率(单位:%)日变化
Fig. 5 Diurnal variation of temperature inversion frequency in each month from 2016 to 2018 (unit: %)

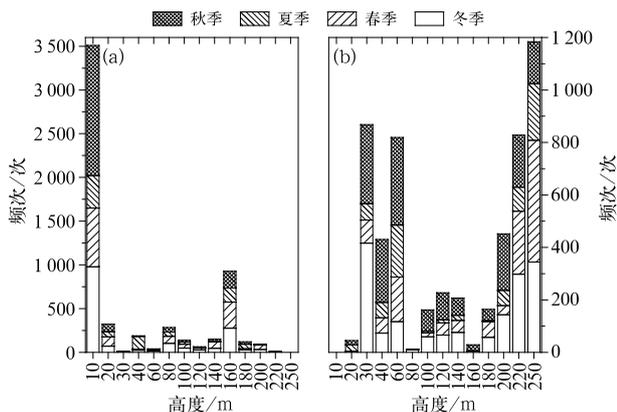


图 6 2016—2018 年各季节逆温层底(a)和逆温层顶(b)高度的出现频次
Fig. 6 Frequency of the bottom height (a) and top height (b) of temperature inversion layer in four seasons from 2016 to 2018

的出现频次,由于气象塔高为 250 m,因此对逆温层底高于 250 m 和逆温层顶高于 250 m 的情况不予统计。从图 6 可见,各季节中逆温层底出现在 10 m 高度的频次最高,说明贴地逆温是最常出现的逆温情况。从逆温层顶出现高度频次分布可以发现,各季节中 200 m 高度以上出现逆温层顶次数最高,秋冬季中 30~60 m 高度出现逆温层顶的频次也相对较高,由此可见逆温层厚度在 80 m 以下和逆温层厚度高于 200 m 以上的贴地逆温层是秋、冬季较常出现的逆温层结构。春季出现逆温层顶高于 200 m 的情况多于其他季节,但同时发现春季出现逆温时贴地逆温出现情况相对较少,因此春季中逆温对污染发生的影响作用可能低于秋、冬季。

表 3 给出了不同大气稳定度下逆温层结情况,可以看到,在强不稳定、不稳定和弱不稳定层结中逆温发生概率约为 3%~5%,中性层结下逆温发生概率为 18.88%,较稳定和稳定层结下逆温发生概率分别为 72.82%和 87.36%,稳定类层结中出现逆温的概率明显高于中性和不稳定层结中出现逆温的概率,同时在稳定层结条件下逆温强度为 $2.75 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,明显高于其他层结条件下的逆温强度。在不稳定层结和中性层结条件下逆温层平均厚度分别为 66.38、66.63、69.23 和 77.72 m,稳定层结条件下逆温层平均厚度分别为 89.30 和 133.71 m,可见,随大气稳定度的增长逆温层平均厚度有明显增加。在不稳定层结条件下,贴地逆温在逆温中所占比例低于 20%,中性层结条件比例为 35.42%,在稳定层结条件下贴地逆温占逆温比例高达 84%左右。综合以上分析可见,稳定层结条件下多出现贴地逆温,且逆温强度和逆温层厚度较高,因此大气污染物会被抑制在近地面难以扩散,极易产生重污染天气。

表 3 不同大气稳定度下的逆温发生概率、逆温强度、逆温层平均厚度和贴地逆温占逆温比
Table 3 Temperature inversion frequency and intensity, temperature inversion layer thickness and the ratio of temperature inversion close to surface

稳定度	强不稳定	不稳定	弱不稳定	中性	较稳定	稳定
逆温发生概率/%	3.42	4.07	5.58	18.88	72.82	87.36
逆温强度/ $[^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}]$	1.51	1.21	1.18	0.99	1.12	2.75
逆温层厚度/m	66.38	66.63	69.23	77.72	89.30	133.71
贴地逆温占逆温比例/%	18.97	17.71	8.06	35.42	84.32	83.25

2.4 天津站城市热岛变化特征

研究中,以天津城市气候监测站与武清等 6 个

城郊站平均气温的差值代表天津站城市热岛强度 (urban heat island intensity, I_{UHI}),从 2010—2018 年 I_{UHI} 的时间分布(图 7)中可以看到, I_{UHI} 具有夜间

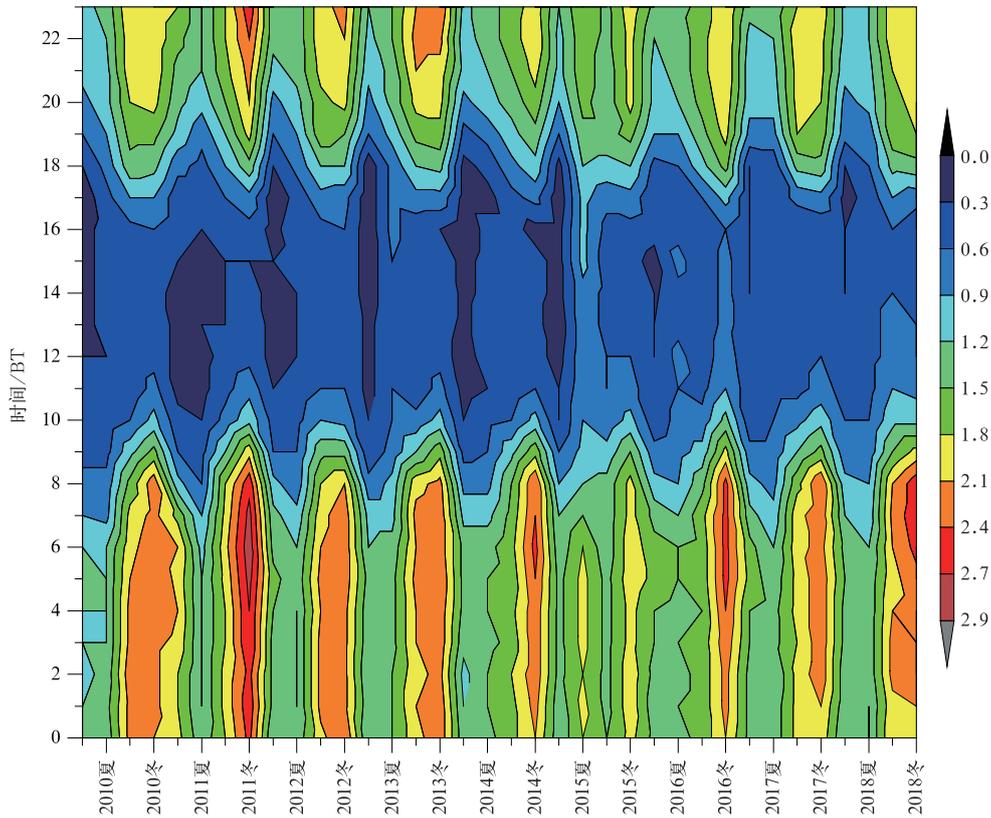


图 7 2010—2018 年各季节天津热岛强度的平均日变化特征(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 7 Average variation features of urban heat island intensity in Tianjin in four seasons from 2010 to 2018 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

强于白天、秋冬季强于春夏季的特征,其中秋冬季夜间 I_{UHI} 最高,春夏季白天 I_{UHI} 最低,近 9 年中秋冬季夜间 I_{UHI} 均值为 $1.99 \pm 0.32^{\circ}\text{C}$,春夏季白天 I_{UHI} 均值为 $0.53 \pm 0.30^{\circ}\text{C}$ 。从以往对京津冀(刘伟东等, 2016)和长三角(邓莲堂等, 2001)等大型城市 I_{UHI} 时间分布的研究结果中均可发现 I_{UHI} 具有夜间强于白天、秋冬季强于春夏季的特征。这样的 I_{UHI} 分布特征与城市下垫面反射率低、导热率大、热容量大,造成城市白天升温 and 夜间降温迟于郊区有关(Oke, 1982)。同时,大气层结稳定性也是影响 I_{UHI} 分布的重要因素,这是由于当大气层结不稳定时城市高低层空气热交换活跃,从而减缓升温速度,利于 I_{UHI} 减弱,而大气层结稳定时湍流减弱易形成逆温,热量不易扩散,利于 I_{UHI} 加强(Yang et al, 2013)。天津 I_{UHI} 夜间强于白天、秋冬季强于春夏季的分布特征与秋冬季夜间多稳定性层结,白天多不稳定层结的大气稳定性分布较为一致,分析发现 2010—2018 年 I_{UHI} 的月均值与各月逆温发生频次有较明显相关性,两者相关系数为 0.58(通过 0.01 显著性水平检

验)。以往研究结果同时表明, I_{UHI} 分布还受风向、风速(黄利萍等, 2013; 徐伟等, 2019)及平均气温(李兴荣等, 2007)等气象因素影响,因此 I_{UHI} 与大气稳定性的关系需要与其他气象因素相结合开展进一步研究。

3 结 论

(1)对 2010—2018 年天津气象塔风向风速的分析发现,受建筑物影响,气象塔 10 m 高度的平均风速仅为西青站平均风速的 50%,气象塔 80 m 高度以下风速的年均值呈现下降趋势。受城市复杂下垫面影响,冬季气象塔 80 m 高度以下的风向分布紊乱。城市发展导致的下垫面变化对气象塔 80 m 高度以下的风场结构影响非常明显。

(2)2010—2018 年天津城市下垫面粗糙度较 1996—2005 年有明显增长,原因与建筑物高度和密集度增长有直接关系。随着近年来城市快速发展,气象塔周边零平面位移高度已从 2005 年的 15 m 升

高至30 m左右。

(3)受湍流强度日变化影响,气象塔高层和低层风速日变化特征差异明显。受近地面大气湍流强度日变化影响,低层风速日变化特点主要表现为白天风速较高,夜间风速较低,高层风速日变化特点主要表现为夜间风速较高,白天风速较低。各季节中气象塔高、低层风速日变化型不同,且在高、低层间存在一个过渡层,春季和秋季过渡层高度为120 m,夏季为140 m,冬季为80 m。

(4)通过对2016—2018年天津大气稳定性和逆温特征分析发现,逆温层结多出现在秋冬季夜间,且逆温出现时多为贴地逆温层结。逆温层结出现的概率随着稳定度增加而升高,稳定层结条件下逆温发生概率在70%以上,平均逆温强度为 $2.75\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,逆温层平均厚度为133 m。

(5)天津城市热岛强度的时间分布表现出夜间强于白天,秋冬季强于春夏季的特征,城市热岛强度与大气稳定度时间分布具有一定相关性。

参考文献

卞林根,程彦杰,王欣,等,2002.北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J].应用气象学报,13(S1):13-25. Bian L G, Cheng Y J, Wang X, et al, 2002. Observational study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter[J]. J Appl Meteor Sci, 13(S1):13-25(in Chinese).

卞韬,任国玉,张立霞,2018.城市化对石家庄站近地面风速趋势的影响[J].气候变化研究进展,14(1):21-30. Bian T, Ren G Y, Zhang L X, 2018. Significant urbanization effect on decline of near-surface wind speed at Shijiazhuang Station[J]. Prog Inquisit Mutat Clim, 14(1):21-30(in Chinese).

蔡子颖,韩素芹,张敏,等,2018.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,39(6):2548-2556. Cai Z Y, Han S Q, Zhang M, et al, 2018. Construction and application of vertical diffusion index for analyzing weather during pollution events in Tianjin[J]. Environ Sci, 39(6):2548-2556(in Chinese).

邓莲堂,束炯,李朝颐,2001.上海城市热岛的变化特征分析[J].热带气象学报,17(3):273-280. Deng L T, Shu J, Li C Y, 2001. Character analysis of Shanghai urban heat island[J]. J Trop Meteor, 17(3):273-280(in Chinese).

高志球,卞林根,逯昌贵,等,2002.城市下垫面空气动力学参数的估算[J].应用气象学报,13(S1):26-33. Gao Z Q, Bian L G, Lu C G, et al, 2002. Estimation of aerodynamic parameters in urban areas[J]. J Appl Meteor Sci, 13(S1):26-33(in Chinese).

韩素芹,刘彬贤,谢以扬,等,2008.利用255 m铁塔研究城市化对地面粗糙度的影响[J].气象,34(1):54-58. Han S Q, Liu B X, Xie Y Y, et al, 2008. Research of urbanization on surface roughness with 255 m meteorological tower[J]. Meteor Mon, 34(1):54-58

(in Chinese).

黄利萍,苗峻峰,刘月琨,2012.天津城市热岛效应的时空变化特征[J].大气科学学报,35(5):620-632. Huang L P, Miao J F, Liu Y K, 2012. Spatial and temporal variation characteristics of urban heat island in Tianjin[J]. Trans Atmos Sci, 35(5):620-632(in Chinese).

黄利萍,苗峻峰,刘月琨,等,2013.天津地区夏季海陆风对城市热岛日变化特征影响的观测分析[J].大气科学学报,36(4):417-425. Huang L P, Miao J F, Liu Y K, et al, 2013. Observational analysis of influence of sea-land breeze on diurnal characteristics of urban heat island in Tianjin during summer[J]. Trans Atmos Sci, 36(4):417-425(in Chinese).

解以扬,刘学军,2003.天津气象塔风温梯度观测资料的统计特征[J].气象,29(1):12-16. Xie Y Y, Liu X J, 2003. A statistical analysis of wind and temperature gradient data from Tianjin meteorological tower[J]. Meteor Mon, 29(1):12-16(in Chinese).

金莉莉,何清,李振杰,等,2016.乌鲁木齐市气象塔梯度观测资料质量控制与处理[J].气象,42(6):732-742. Jin L L, He Q, Li Z J, et al, 2016. Quality control method and treatment for Urumqi meteorology tower gradient observation data[J]. Meteor Mon, 42(6):732-742(in Chinese).

李倩,刘辉志,胡非,等,2003.城市下垫面空气动力学参数的确定[J].气候与环境研究,8(4):443-450. Li Q, Liu Z H, Hu F, et al, 2003. The determination of the aerodynamical parameters over urban land surface[J]. Clim Environ Res, 8(4):443-450(in Chinese).

李兴荣,胡非,舒文军,2007.北京冬季城市热岛特征及强弱热岛影响因子研究[J].中国科学院研究生院学报,24(4):431-438. Li X R, Hu F, Shu W J, 2007. Research on the characteristics of Beijing winter UHI and the influencing factors of a strong UHI and a weak one[J]. J Grad Sch Chin Acad Sci, 24(4):431-438(in Chinese).

刘伟东,尤焕苓,孙丹,2016.1971—2010年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析[J].气象,42(5):598-606. Liu W D, You H L, Sun D, 2016. Multi-Time scale analysis of megacities heat island effect in Beijing—Tianjin—Hebei Region from 1971 to 2010[J]. Meteor Mon, 42(5):598-606(in Chinese).

陆龙骅,卞林根,程彦杰,等,2002.冬季北京城市近地层的气象特征[J].应用气象学报,13(S1):34-42. Lu L H, Bian L G, Cheng Y J, et al, 2002. Meteorological characteristics of the ground layer in Beijing in winter[J]. J Appl Meteor Sci, 13(S1):34-42(in Chinese).

彭珍,胡非,2006.北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究[J].地球物理学报,49(6):1608-1615. Peng Z, Hu F, 2006. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure[J]. Chin J Geophys, 49(6):1608-1615(in Chinese).

王式功,杨德保,尚可政,等,2002.城市空气污染预报研究[M].兰州:兰州大学出版社. Wang S G, Yang D B, Shang K Z, et al, 2002. Study on Air Pollution Forecast in Unban[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press(in Chinese).

- 王郁,胡非,2006.近10年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究[J].地球物理学报,49(1):61-68. Wang Y, Hu F, 2006. Variations of the urban heat island in summer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect[J]. Chin J Geophys, 49(1):61-68(in Chinese).
- 吴息,白龙,崔方,等,2014.海面与海岸陆面风速廓线特征[J].大气科学学报,37(2):138-145. Wu X, Bai L, Cui F, et al, 2014. Wind profile features of surface layer over ocean and coast[J]. Trans Atmos Sci, 37(2):138-145(in Chinese).
- 徐伟,张蕾,漆梁波,等,2019.地面风对上海城市热岛影响的观测分析[J].气象,45(9):1262-1277. Xu W, Zhang L, Qi L B, et al, 2019. Observation analysis of the influence of surface wind on urban heat island in Shanghai[J]. Meteor Mon, 45(9):1262-1277(in Chinese).
- 徐阳阳,刘树华,胡非,等,2009.北京城市化发展对大气边界层特性的影响[J].大气科学,33(4):859-867. Xu Y Y, Liu S H, Hu F, et al, 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer[J]. Chin J Atmos Sci, 33(4):859-867(in Chinese).
- 姚青,刘敬乐,蔡子颖,等,2018.天津大气稳定度和逆温特征对PM_{2.5}污染的影响[J].中国环境科学,38(8):2865-2872. Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, et al, 2018. Atmospheric stability and inverse temperature characteristics of Tianjin and its effect on PM_{2.5} pollution[J]. China Environ Sci, 38(8):2865-2872(in Chinese).
- 张宏昇,陈家宜,1997.非单一水平均匀下垫面空气动力学参数的确定[J].应用气象学报,8(3):310-315. Zhang H S, Chen J Y, 1997. Estimation of aerodynamic parameters on non-single horizontal homogeneous underlying surface[J]. Quart J Appl Meteor, 8(3):310-315(in Chinese).
- 张敏,蔡子颖,韩素芹,等,2018.天津污染天气边界层温度层结变化特征及预报阈值确定[J].环境科学学报,38(6):2270-2278. Zhang M, Cai Z Y, Han S Q, et al, 2018. The research on threshold and regularity of temperature stratification in heavy pollution weather in Tianjin[J]. Acta Sci Circumst, 38(6):2270-2278(in Chinese).
- 周淑贞,余碧霞,1988.上海城市对风速的影响[J].华东师范大学学报(自然科学版), (3):67-76. Zhou S Z, Yu B X, 1988. Shanghai urban influences on wind velocity[J]. J East China Norm Univ (Nat Sci), (3):67-76(in Chinese).
- Dupont E, Menut L, Carissimo B, et al, 1999. Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment[J]. Atmos Environ, 33(6):979-994.
- Han S Q, Cai Z Y, Zhang Y F, et al, 2015. Long-term trends in fog and boundary layer characteristics in Tianjin, China[J]. Partic-uology, 20:61-68.
- Hao T Y, Han S Q, Chen S C, et al, 2017. The role of fog in haze episode in Tianjin, China; a case study for November 2015[J]. Atmos Res, 194:235-244.
- Landsberg H E, 1981. The Urban Climate[M]. New York: Academic Press.
- Monin A S, Obukhov A M, 1954. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground[J]. Tr Akad Nauk SSSR Geofiz Inst, 24(151):163-187.
- Oke T R, 1982. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 108(455):1-24.
- Stull R B, 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Yang P, Ren G Y, Liu W D, 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity[J]. J Appl Meteor Climatol, 52(8):1803-1816.