

2019年冬季邢台近地层风场特征分析与污染系数研究

张可嘉, 郝巨飞, 贾秋兰, 张杰, 黄毅

邢台市气象局, 河北 邢台

收稿日期: 2022年7月3日; 录用日期: 2022年8月3日; 发布日期: 2022年8月10日

摘要

利用中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地100 m 通量观测塔2019年12月到2020年2月共10层风向、风速观测数据, 对邢台冬季近地层风速、风频、污染系数等进行分析。结果表明: 1~100 m 高度平均风速呈现明显日变化特征, 日间平均风速明显大于夜间平均风速, 其中1~100 m 平均风速在日间为 $3.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 夜间为 $2.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 随高度增加, 日间和夜间的平均风速均呈增加趋势, 但日间与夜间的平均风速差呈逐渐减少的分布; 风切变指数与风速呈负相关关系; 各高度盛行风向均以北风及相近风向为主; 各高度污染系数最大值为北风及相近风向, 污染系数整体呈现出低层大、高层小的趋势; $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值与污染系数相关性高层好于低层, 其中在80 m 高度呈明显负相关; 污染系数的最大值出现在北风风向, 随高度增加, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均质量浓度呈波动下降的趋势。

关键词

风特征, 风切变指数, 污染系数, 近地层

Analysis on Characteristics of Near Stratum Wind Field and Study on Pollution Coefficient in Xingtai in Winter 2019

Kejia Zhang, Jufei Hao, Qiulan Jia, Jie Zhang, Yi Huang

Xingtai Meteorological Bureau, Xingtai Hebei

Received: Jul. 3rd, 2022; accepted: Aug. 3rd, 2022; published: Aug. 10th, 2022

Abstract

Based on the observation data of wind direction and wind speed in 10 layers from December 2019

文章引用: 张可嘉, 郝巨飞, 贾秋兰, 张杰, 黄毅. 2019年冬季邢台近地层风场特征分析与污染系数研究[J]. 世界生态学, 2022, 11(3): 297-306. DOI: [10.12677/ije.2022.113033](https://doi.org/10.12677/ije.2022.113033)

to February 2020 of the 100 m flux observation tower in Xingtai atmospheric environment field scientific experiment base of China Meteorological Administration, the wind speed, wind frequency and pollution coefficient in winter near Xingtai were analyzed. The results show that: the average wind speed at 1~100 m height presents obvious diurnal variation, and the average wind speed at daytime is significantly higher than that at night, among which the average wind speed at 1~100 m height is $3.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at daytime $2.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at night; With the increase of altitude, the average wind speed in daytime and at night increased, but the difference between the average wind speed in daytime and at night decreased gradually; There is a negative correlation between wind shear index and wind speed; The prevailing wind direction of each altitude is mainly north wind and near wind direction; The maximum value of each height pollution coefficient is north wind and similar wind direction, and the pollution coefficient shows a trend of large in low level and small in high level; The correlation between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations and pollution coefficient is better in the upper layer than in the lower layer, and there is a significant negative correlation at the height of 80 m; The maximum pollution coefficient appeared in the north wind direction, and the average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} showed a downward trend.

Keywords

Wind Characteristics, Wind Shear Index, Pollution Coefficient, Near Surface Layer

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

近地层风是指距离地球表面 100 米以下的风。由于大气运动特性和下垫面的影响,不同高度风特征的变化也较大。近地层风特征对风能开发、大气污染扩散等方面有着相当重要的影响,因此对近地层风特征的研究受到了学者们的普遍关注。Brooks E. Martner 和 John D. Marwitz [1]通过设置在不同地点不同高度的 25 台风速传感器的数据,分析了怀俄明州南部的风速特征,通过研究发现地形对风速增加起到促进作用,冬季风速平均值大于夏季。Soler-Bientz R 等[2]利用 9 个气象站 2000~2007 年 10 min 平均风速资料,分析了尤卡坦半岛的风资源特征,并通过对比发现岛上风变化特征主要受加勒比海和墨西哥湾影响。Sinden G [3]根据 1970 年至 2003 年期间 66 个气象站点的小时风观测数据,对英国风力资源的特征进行了分析,并研究了风电输出与电力需求之间的关系。植石群[4]利用广东省沿海地区现场实测风资料及其临近区域气象站的风资料,分析研究了广东省沿海风随高度的变化规律和随离海岸线距离的衰减变化规律,计算了广东省沿海风能贮量和可开发量。赵小平等[5]、肖辉等[6]对台风登陆期间的近地层风特性进行分析发现,近地层各高度风速呈现“M”型双峰特征。孙川永等[7]根据不同风向下风速廓线的特性,研究减少风速预报误差及风机功率预报环节误差的方法。付德义等[8]分析得出随着风切变指数的增加,风机极限载荷与疲劳等效载荷也随之变大。周波等[9]研究发现风速分布的差异会使实际的风轮输出转矩产生脉动,桨距角产生周期性脉动,从而影响电能质量。雷杨娜等[10]对陕北黄土高原 6 座测风塔测风资料进行了分析,为该地区风能资源状况的评价提供了有价值的参考数据。

近年来,随着城市化和经济社会的不断发展,我国大气污染防治的形势依旧严峻,而近地层风对于大气污染物扩散有着重要的影响作用。徐永清等[11]利用风塔测风数据,计算各高度污染系数,得出随高

度增加有利于大气污染物扩散的结论。李晓霞等[12]对兰州新区盛行风向及污染系数进行分析计算,为新区合理进行规划布局、控制高污染企业提供科学依据。郭立平等[13]、程念亮等[14]、宋晓辉等[15]的分析表明重污染天气过程成因与近地层风之间有密切联系。王跃等[16]以北京一次重污染天气为例,通过边界层结构和气象要素的分析,得出低空顺时针垂直风切带来暖湿气流,促使低空细颗粒物汇聚成霾。马艳等[17]通过分析持续重污染期间青岛市大气边界层气象要素的时间和空间特征,表明低层暖湿的风切变是重污染天气持续的有利条件。

董晓雁等[18]利用新一代L波段高空气象探测系统雷达采集邢台地区2011年高空风观测资料,分析了距地面300 m、600 m、900 m高度风速、风向分布等特征,得出邢台地区上空处在明显的西风带环流中,风向多为偏北风,风速春季偏大,冬季1月最小的结论。与国内其他地区研究相比,对邢台近地层风特征的应用研究还比较少,尤其是利用风塔实测资料进行的相关研究尚未见文献报道。中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地100 m通量观测塔于2019年10月正式建成投入业务运行,为邢台地区近地层风的精细研究提供了可靠数据,本文利用通量观测塔2019年12月到2020年2月的观测数据,分析2019年冬季近地层风特征,并计算污染系数,希望为本地大气污染扩散、风能开发等提供科学参考。

2. 观测资料与研究方法

2.1. 资料选取

本文选取的资料为中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地(114°23'12"E, 37°17'27"N, 海拔高度163 m)100 m通量观测塔2019年冬季(2019年12月至2020年2月)的风向、风速观测资料,观测塔周围地势平坦,四周开阔,地表为矮木层和低矮建筑物。通量观测塔观测高度有10层,分别为:1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m, 48 m, 64 m, 80 m, 96 m。对观测数据进行质量控制,包括数据文件的完整性和有效性检验、数据的合理性检验、气候极值检查,进而获得有效数据,观测数据完整度高,数据可信,可以用来分析邢台近地层风特征。

2.2. 研究方法

风切变指数是表征风速垂直变化的主要特征量之一[19]。对于风切变指数的计算应用较多的是指数率和对数率[20][21][22],文中按照《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)(8.2.1条文说明)和《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710-2002)两部国家标准推荐的方法,本文使用指数率用于风切变指数的计算,其表达式为:

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: u 和 u_1 分别为 z 和 z_1 高度处的风速, α 为风切变指数。

一般采用最小二乘法拟合的方法计算 α ,其方法为:

将公式(1)两边取对数[22],得到:

$$\ln \left(\frac{u}{u_1} \right) = \alpha \ln \left(\frac{z}{z_1} \right) \quad (2)$$

令 $y = \ln \left(\frac{u}{u_1} \right)$, $x = \ln \left(\frac{z}{z_1} \right)$,得到线性方程 $y = \alpha x$ 。最小二乘法要求残差的平方 $RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha x_i)^2$ 最

小, RSS 表达式中的平方展开并经过变换[23],得到公式:

$$RSS = \sum_{i=1}^n x_i^2 \left[\alpha - \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \right]^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \left[1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2} \right] \quad (3)$$

当 $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ 时 RSS 最小，将实测数据代入公式，这就得到了风切变指数值。

污染系数是某一地区某方位风向频率与该方位平均风速的比值[24]，污染系数(污染危害的程度)与受污染的时间和污染物浓度有关，某方位下风受污染的时间与该方位风向频率成正比，而污染浓度与该方位的平均风速成反比。空气污染系数综合了风向和风速的作用，代表了该方位下风向空气污染程度。污染系数在厂址选择和企业内部布局中是一项重要的依据。其计算公式为：

$$P_i = \frac{f_i}{\bar{u}_i} \quad (4)$$

式中， P_i 为某 i 方位的污染系数， f_i 为该方向风向出现的频率， \bar{u}_i 为该方向平均风速。

按照地面气象观测规范[25]规定，将风向分为 16 个方位。四季中 12 月到次年 2 月为冬季。日变化指逐小时变化，文中时间均为北京时。

3. 风特征分析

3.1. 风速日变化

通过通量观测塔冬季各高度平均风速的日变化曲线(图 1)，可以看出，通量风塔各层均呈现出比较明显的日变化特征，日间平均风速明显大于夜间平均风速，计算得出通量观测塔各层平均风速在日间(8~20 时)为 $3.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，夜间(21 时~7 时)为 $2.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其中 1~32 m 高度，风速的日变化曲线基本一致，各层均是在 9 时以后风速迅速增大，在 15~16 时风速达到最大值，之后迅速减小，18 时到次日 9 时风速变化不大；48~96 米高度，风速在日出前后开始增大，增速较 1~32 米的小，到 16~17 时风速达到最大值，之

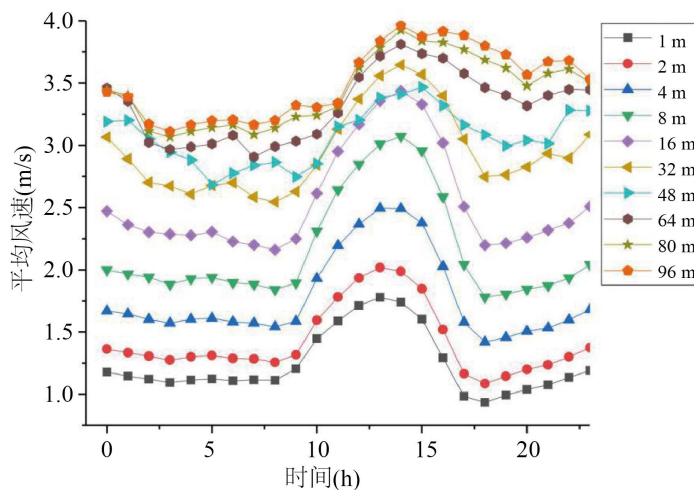


Figure 1. Daily variation curve of wind speed at each height
图 1. 各高度风速日变化曲线

后缓慢下降。根据计算得出各层平均风速和观测高度的相关系数发现:各层平均风速和观测高度呈正相关关系,徐永清等[11]、刘敏等[19]的研究表明风速随高度升高增大,本文与其研究结论较为一致。1~32 m 高度平均风速在 15~16 时达到最大,48~96 m 高度在 16~17 时达到最大,是因为低层(1~32 米)在日出后的气温上升幅度更大,大气湍流更加强烈,导致风速迅速增大,下午时,由于太阳辐射减弱,低层(1~32 米)气温会迅速降低,大气湍流相对减弱,因此平均风速在 15~16 时达到最大后也迅速减小,而 48~96 m 高度相对 1~32 米受地形下垫面影响较小,温度变化也趋于缓和,在 16~17 时平均风速达到最大后缓慢下降。

3.2. 风速随高度变化特征及风切变指数

风资源评估分析中,风切变指数是涉及风机安全的一个重要参数,风机的设计和选型都要考虑风切变指数的大小[26]。通过通量塔各高度 10 分钟平均风速的散点图(图 2(a))发现:拟合曲线对观测值的拟合优度较好,确定系数为 0.992,风切变指数为 0.225。风力发电机的启动风速一般为 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [22],小于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速对于风力发电几乎没有贡献,所以本文剔除掉 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下风速数据(以下称为“启动风速段”),更能直观准确地为邢台地区风能资源评价提供参考,通过对数据进行处理,进而得出风切变指数拟合曲线,如图 2(b)所示。图中确定系数为 0.965,风切变指数为 0.075。启动风速段拟合曲线比较平缓,

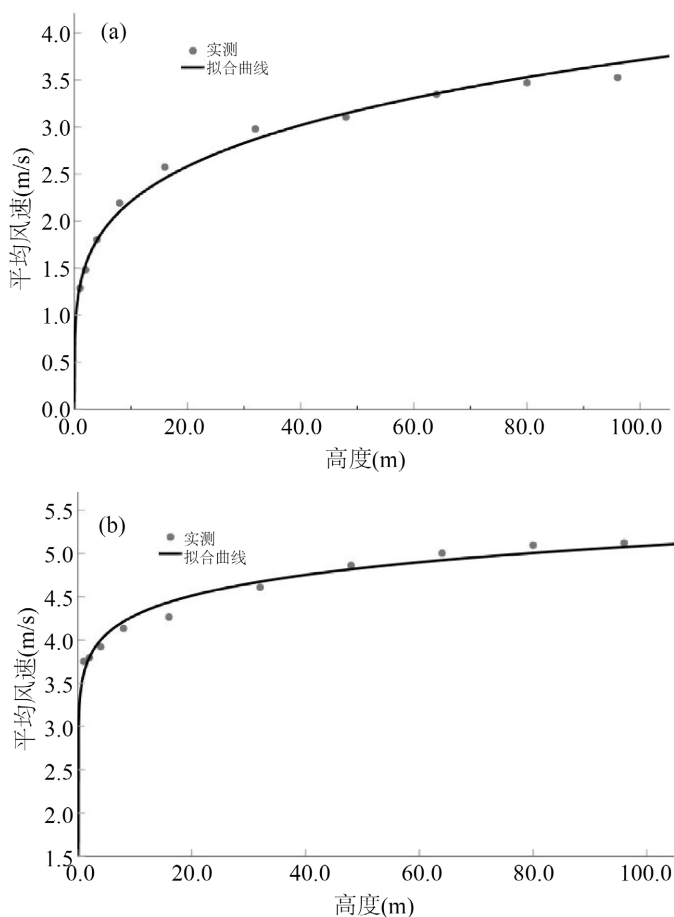


Figure 2. Fitting curve of wind shear index ((a) is the wind shear index of 10 minute average wind speed, and (b) is the wind shear index of 10 minute average wind speed $\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
图 2. 风切变指数拟合曲线图((a)为 10 分钟平均风速风切变指数, (b)为 10 分钟平均风速 $\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风切变指数)

风切变指数较小,表明各层高度之间风速变化较小,这是由于风速越大,各层高度之间空气交流混合越充分,使各层高度间风速更为趋于一致,风切变指数也就越小,实际计算与其他研究人员的分析结论一致[21][22]。

3.3. 风向变化特征

表1显示的是冬季(2019年12月至2020年2月)通量观测塔1~96 m共十层高度风向频率,由表可知,1~16 m高度盛行风向随高度有所变化,1 m~2 m高度为西北风向,4~8 m高度为西西北风向,16 m高度为北西北风向,风向频率为13.22%~23.39%;32~96 m高度盛行风向均为北风,风向频率为12.98%~17.01%,从16 m到96 m高度风向有一定顺转趋势。1 m~2 m高度SE风向频率显著低于4~96 m高度,1 m高度SSE风向频率显著低于2~96 m高度,1~8 m高度SSW风向频率显著低于16~96 m高度,1 m、2 m高度NW风向频率显著高于4~96 m高度。分析原因,可能是由于地面建构筑物和植被的影响,对风产生一定的阻挡作用,致使不同高度的风向频率具有一定的差异。

Table 1. Wind direction frequency at each height (unit: %)

表 1. 各高度风向频率(单位: %)

高度 风向	1 m	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	48 m	64 m	80 m	96 m
N	12.18	10.98	10.28	9.58	9.68	12.98	15.13	15.34	14.98	17.01
NNE	11.68	6.71	5.39	6.01	6.88	8.66	9.25	7.36	9.89	11.73
NE	3.73	3.19	3.75	6.09	6.34	5.73	6.38	4.52	5.27	6.07
ENE	2.62	2.01	2.6	2.13	2.71	4.48	5.18	3.64	3.55	3.54
E	3.77	3.2	3.49	1.94	1.92	3.53	3.88	4.27	3.86	3.68
ESE	10.77	11.07	8.87	6.94	6.6	6.56	7.39	9.8	7.03	5.36
SE	2.42	4.07	6.98	9.49	9.68	9.38	7.95	8.73	9.21	9.25
SSE	2.4	5.63	5.23	6.03	6.38	7.7	8.11	8.65	10.16	9.65
S	6.33	2.95	2.66	3.38	3.69	5.33	6.69	7.27	8.78	10.11
SSW	1.56	1.2	1.66	2.14	3.85	4.59	5.76	4.82	5.55	6.77
SW	1.09	1.26	1.21	1.43	2.29	4.42	4.03	2.54	2.92	3.64
WSW	1.33	1.12	1.36	1.53	2.51	3.52	2.21	1.21	1.19	1.46
W	1.12	1.96	3.13	4.22	7.47	3.52	1.98	1.43	1.06	0.98
WNW	4.55	15.12	21.8	19.1	9.34	2.98	2.04	2.2	1.69	1.44
NW	23.39	18.1	10.19	8.42	7.45	4.17	3.01	4.69	3.02	2.38
NNW	11.06	11.42	11.4	11.55	13.22	12.48	11	13.54	11.84	6.92

3.4. 重污染天气分析及污染系数

对冬季(2019年12月至2020年2月)通量观测塔数据进行筛选,筛选出时段内AQI(空气质量指数)≥200的通量观测塔风向、风速数据,对不同高度风向频率进行统计分析可知,在重污染天气时段,风向多以北风、西北风及相邻风向(WNW, NNW)为主。计算AQI(空气质量指数)≥200时段平均风速和AQI(空气质量指数)<200时段平均风速(表2)发现:重污染天气时段平均风速明显低于其他时段,表明低风速有

利于大气污染物的聚集和重污染天气的持续。

Table 2. Average wind speed during AQI ≥ 200 and AQI < 200 at different heights (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

表 2. 不同高度空气质量指数 AQI ≥ 200 时段平均风速和 AQI < 200 时段平均风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

	1 m	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	48 m	64 m	80 m	96 m
AQI ≥ 200	1.00	1.15	1.44	1.76	2.07	2.40	2.48	2.64	2.72	2.77
AQI < 200	1.19	1.36	1.70	2.07	2.44	2.83	2.94	3.15	3.26	3.32

根据不同高度各风向污染系数计算结果(表 3)可知, 1~16 m 高度污染系数最大的风向为西北及西西北风向, 32~96 m 高度污染系数最大的风向为北风及北西北风向。污染系数整体呈现出低层大、高层小的趋势, 其中污染系数最小值为 0.004 (80 m 高度北西北风向), 最大值为 0.212 (1 m 高度西北风向), 1~8 m 高度污染系数在 0.04 以上的风向分别有 9 个、6 个、4 个和 3 个, 而 16~96 m 高度各风向污染系数仅有一个在 0.04 以上(16 m 高度西北西风向), 随高度增加, 各风向平均风速增大, 导致污染系数减小, 有利于污染物的扩散。

Table 3. Pollution coefficient of each height

表 3. 各高度污染系数

风向 \ 高度	1 m	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	48 m	64 m	80 m	96 m
N	0.063	0.051	0.045	0.036	0.030	0.034	0.036	0.031	0.033	0.037
NNE	0.091	0.047	0.034	0.027	0.027	0.026	0.027	0.026	0.025	0.027
NE	0.041	0.033	0.030	0.035	0.030	0.022	0.028	0.019	0.022	0.020
ENE	0.035	0.025	0.027	0.018	0.020	0.022	0.037	0.020	0.019	0.015
E	0.040	0.030	0.027	0.013	0.012	0.024	0.022	0.020	0.020	0.021
ESE	0.076	0.063	0.038	0.027	0.023	0.024	0.025	0.031	0.024	0.020
SE	0.025	0.034	0.035	0.034	0.032	0.031	0.026	0.028	0.029	0.029
SSE	0.027	0.037	0.026	0.024	0.022	0.025	0.026	0.029	0.031	0.030
S	0.051	0.029	0.019	0.019	0.017	0.022	0.026	0.026	0.029	0.032
SSW	0.025	0.018	0.017	0.015	0.019	0.018	0.022	0.017	0.018	0.022
SW	0.017	0.017	0.014	0.012	0.014	0.020	0.017	0.013	0.013	0.015
WSW	0.019	0.016	0.016	0.014	0.016	0.018	0.012	0.008	0.008	0.008
W	0.018	0.027	0.029	0.028	0.034	0.018	0.012	0.006	0.005	0.007
WNW	0.051	0.121	0.135	0.097	0.042	0.012	0.007	0.006	0.004	0.004
NW	0.212	0.135	0.061	0.044	0.031	0.014	0.009	0.011	0.008	0.006
NNW	0.080	0.054	0.046	0.041	0.040	0.030	0.024	0.032	0.023	0.014

利用相同高度各风向 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均值与污染系数数据进行相关性分析(表 4), 低层(1~16 m)高度 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均值与污染系数呈负相关关系, 32~96 m 高度呈正相关关系, 且高度在 80 m 时, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均值与污染系数的相关性最好, 相关系数达到 0.717 (通过 $\alpha = 0.001$ 检验)。究其原因可能是由

于地表建构物物和地形原因,对风起到一定的阻挡作用,导致 1~16 m 高度 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均值与污染系数相关性比较差,而 32~96 m 高度受到地面影响比较小,二者相关性比较好。

Table 4. Correlation between average $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations and pollution coefficient
表 4. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值与污染系数相关性

	高 度									
	1 m	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	48 m	64 m	80 m	96 m
$PM_{2.5}$	-0.299	-0.167	-0.083	-0.186	-0.100	0.505	0.265	0.576	0.714	0.634
PM_{10}	-0.339	-0.263	-0.193	-0.225	-0.200	0.397	0.221	0.529	0.719	0.660

80 m 高度时,大部分风向上 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值与风速呈负相关关系,即风速变大, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值降低(图略)。此高度上污染系数最大风向为 N (北风),图 3 表示北风风向不同风速区间内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值的变化柱形图,由图可知,随着风速的变化, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均值呈现出先下降、再升高、再下降的趋势,从静风到风速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间,风速的增加有助于污染物的扩散,因此 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值与风速呈负相关关系,由于污染物监测设备北部有多家水泥生产企业,随着风速的继续增加,外来输送影响对环境大气污染物浓度影响逐渐增大,导致 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 值增加,风速增大到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上时,虽然局地会产生扬沙或浮尘,但干净空气的置换作用效果显著加强,导致 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值迅速减小。

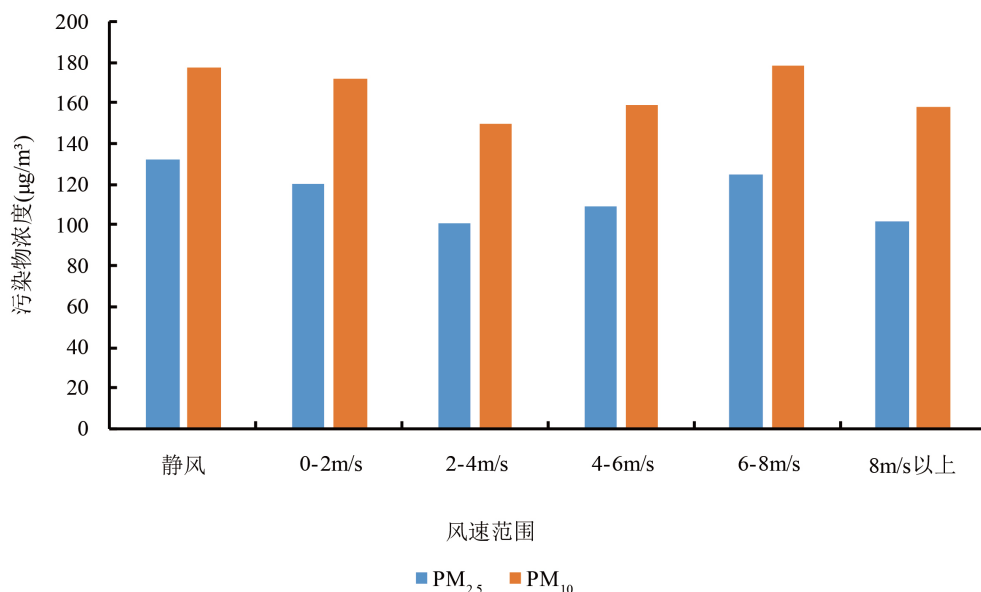


Figure 3. Variation diagram of pollutant concentration in different wind speed ranges of north wind direction at 80 m height

图 3. 80 m 高度北风风向不同风速区间污染物浓度变化图

4. 结论

通过对河北邢台通量观测塔 2019 年 12 月~2020 年 2 月风向风速数据进行分析,得出以下结论:

1) 通量观测塔各层平均风速均呈现出明显的日变化特征,夜间风速小,白天风速大,不同高度风速日变化呈现出一定差异。

2) 全风速段风切变指数 α 为 0.225, 风机启动风速段风切变指数 α 为 0.075, 风切变指数与风速呈反比关系, 风速越大, 风切变指数越小, 由于风速越大, 各层高度之间空气交流混合越充分, 使各层高度间风速更为趋于一致, 风切变指数也就越小。

3) 各高度盛行风向均以北风、西北风及相邻风向为主, 南风相邻风向(SE、SSE 和 SSW)频率低层显著低于高层, 西北方向低层风向频率显著高于高层。可见, 风塔所在地附近地面突出物对风向起到一定程度的影响, 导致不同高度的风向会有一定的差异。

4) 各高度污染系数最大值均在北风及相近风向, 污染系数与高度成负相关关系, 说明随着高度升高, 更有利于污染物的扩散。

5) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值与污染系数相关性高层好于低层, 相关性最好的为 80 m 高度。80 m 高度上风速与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值大体上呈负相关关系, 由于北部有多家水泥生产企业原因, 导致北风风向 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度平均值呈现出先下降、再升高、再下降的趋势。

5. 讨论

由于观测资料的时长序列比较短, 所以对该地区的风特征变化不能完全描述。本文只是对该地区风特征变化现象进行统计分析, 对其产生的原因和物理机制未能给出详细解释, 对于不同天气特征情况下风特征对比分析有待资料积累后开展进一步的研究。

参考文献

- [1] Martner, B.E. and Marwitz, J.D. (1980) Wind Characteristics in Southern Wyoming. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **21**, 1815-1827. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)021%3C1815:WCISW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)021%3C1815:WCISW%3E2.0.CO;2)
- [2] Soler-Bientz, R., Watson, S. and Infield, D. (2010) Wind Characteristics on the Yucatán Peninsula Based on Short Term Data from Meteorological Stations. *Energy Conversion and Management*, **51**, 754-764. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.032>
- [3] Sinden, G. (2005) Characteristics of the UK Wind Resource: Long-Term Patterns and Relationship to Electricity Demand. *Energy Policy*, **35**, 112-127. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.10.003>
- [4] 植石群, 钱光明. 广东省沿海风能的分析及计算[J]. 气象, 2001, 27(5): 43-46.
- [5] 赵小平, 朱晶晶, 樊晶, 贵志成. 强台风海鸥登陆期间近地层风特性分析[J]. 气象, 2016, 42(4): 415-423.
- [6] 肖辉, 万齐林, 刘显通, 郑腾飞, 冯璐. 台风“妮妲”(1604)登陆期间近地层风特性分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(2): 42-50.
- [7] 孙川永, 陶树旺, 罗勇, 王式功, 宋丽莉. 海陆风及沿海风速廓线在风电场风速预报中的应用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3): 630-636.
- [8] 付德义, 薛扬, 边伟, 周士栋, 龚利策. 风切变指数对于风电机组载荷特性影响研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1380-1387.
- [9] 周波, 龚华军, 甄子洋. 风切变和塔影效应对风力机变桨距控制的影响分析[J]. 可再生能源, 2012, 30(1): 27-32.
- [10] 雷杨娜, 孙娴, 张侠, 孙彬彬. 陕北黄土高原复杂地形风速廓线特性[J]. 可再生能源, 2015, 33(9): 1345-1350.
- [11] 徐永清, 张弛, 王庆祥, 齐东方. 城市近地层风特征与污染系数分析[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(3): 55-59.
- [12] 李晓霞, 黄涛, 王兴, 梁东升. 兰州新区近地层风场时空特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 1001-1009.
- [13] 郭立平, 乔林, 石茗化, 王旭光. 河北廊坊市连续重污染天气的气象条件分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 497-504.
- [14] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 聂滕, 邱启鸿, 徐文帅. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1154-1163.
- [15] 宋晓辉, 田秀霞, 张珺, 张艳丽, 薛敏. 邯郸一次重污染天气过程分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 19-22.
- [16] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 王跃思, 安俊琳, 刘子锐, 唐贵谦. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 173-184.

-
- [17] 马艳, 黄容, 时晓曦, 王建林, 孙萌. 青岛冬季 PM_{2.5} 持续重污染天气的大气边界层特征[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 42-52.
- [18] 董晓雁, 刘立辉, 孟丽芬. 邢台地区近地层风特征分析及应用[J]. 农业与技术, 2012, 32(7): 129.
- [19] 刘敏, 孙杰, 杨宏青, 袁业畅. 湖北省不同地形条件下风随高度变化研究[J]. 气象, 2010, 36(4): 63-67.
- [20] 陈燕, 张宁, 许遐祯, 陈兵, 买苗, 孙佳丽. 江苏沿海近地层强风风切变指数特征研究[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1069-1081.
- [21] 金莉莉, 李振杰, 缪启龙, 何清. 乌鲁木齐市近地层风切变指数特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 81-86.
- [22] 孙淑芳, 张广兴. 新疆百里风区近地层垂直风切变指数特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 99-104.
- [23] 徐宝清, 吴婷婷, 李文慧. 风能风切变指数计算方法的比选研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 188-194.
- [24] 施介宽, 黄建国, 洪国平, 董安祥. 大气污染系数概念的辩正及其在甘肃部分地区的初步应用[J]. 高原气象, 1988(4): 367-373.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T35227-2017 地面气象观测规范 风向和风速[S].
- [26] 王焯芳, 李成才, 石光明, 李建, 李五生, 李树勇, 王威. 江苏环港风电场风能资源特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 955-963.