

Analysis of the Relationship between Air Quality Characteristics and Meteorological Conditions in Yanqing Urban Area

Jingyi Sui, Meng Gao, Hongliang Yan, Jingchao Yang, Yanna Wang

Yanqing District Meteorological Service, Beijing
Email: 825643659@qq.com

Received: Apr. 4th, 2020; accepted: Apr. 19th, 2020; published: Apr. 26th, 2020

Abstract

Taking the mass concentrations of ambient air particles (PM_{10} , $PM_{2.5}$) in Yanqing urban area in 2018 and 2019 (Xiadu park station), combining with the meteorological observation data of the same period (Yanqing station). The air quality characteristics and meteorological conditions in Yanqing urban area were analyzed. The purpose is to explore the air pollution situation and transmission characteristics in Yanqing, as well as the relationship between air quality and meteorological elements. We need to gain experience for the establishment of quantitatively meteorological prediction model of air pollution, and provide scientific basis for the prevention and control of local air pollution. The results showed that: from the point of the past two years, leading the direction of the wind for Yanqing urban area is east northeast wind. It accounts for 14.5% of the total wind direction frequency. The highest quality of PM_{10} concentration appeared when the north wind blowing in close to the ground. $PM_{2.5}$ mass concentration can be dramatically increased when easterly winds appear. When the daily average wind speed was 1.1 - 2.0 m/s, maximum of particulate matter pollution days accounted. When daily average relative humidity is within the range of 40% - 60%, pollution days' proportion is relatively concentrated. Visibility decreases exponentially with the increase of $PM_{2.5}$. Under the condition of $80 \leq RH < 90$ humidity, atmospheric visibility has the strongest correlation with particulate matter. When the $PM_{2.5}$ mass concentration in Yanqing urban area is lower than $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$, visibility can be significantly improved.

Keywords

Air Quality, Particulate Matter, Meteorological Conditions, Humidity

延庆城区空气质量特征与气象条件关系分析

隋婧怡, 高 猛, 阎宏亮, 杨静超, 王燕娜

北京市延庆区气象局, 北京
Email: 825643659@qq.com

摘要

选取2018和2019年延庆城区环境空气颗粒物(PM_{10} , $PM_{2.5}$)质量浓度(夏都公园站),并结合同期气象观测数据(延庆站),对延庆城区的空气质量特征与气象条件相关性进行分析。进一步了解延庆空气污染状况、传输特征以及空气质量与气象要素的关系,为建立定量化空气污染气象条件预报模型积累经验,为本地大气污染防治提供科学依据。结果表明:从近两年来看,延庆城区主导风向为东北偏东风,占总风向频率的14.5%,在近地面吹北风时, PM_{10} 质量浓度最高,偏东风能够明显增加 $PM_{2.5}$ 质量浓度,日平均风速处于1.1~2.0米/秒时,颗粒物污染日数占比达到最大值,日平均相对湿度在40%~60%区间时,污染日数占比相对比较集中。能见度随 $PM_{2.5}$ 增加呈幂指数降低,在 $80 \leq RH < 90$ 湿度条件下,大气能见度与颗粒物相关性最强,当延庆城区 $PM_{2.5}$ 质量浓度低于 $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,能够大幅提高能见度。

关键词

空气质量, 颗粒物, 气象条件, 湿度

Copyright © 2020 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

近年来城市的大气污染问题逐渐成为制约可持续发展和生态文明建设的重要因素[1],环境空气质量已经引起政府和公众的广泛关注。很多人对空气质量特征及其与气象因素间的相关性进行分析研究[2] [3] [4] [5],目前针对大气颗粒物与气象因子之间的相关性研究集中在温度、相对湿度、风、能见度、降水等因素。研究表明:城市间的颗粒物浓度差异受大气环流形式、地形、污染物等众多因素的影响。当污染源排放相对稳定时,气象条件是颗粒物的稀释、扩散、输送过程产生的重要因素。另外,由于颗粒物散射和吸收的消光作用能够显著影响能见度[6],因此大气能见度能够反映大气环境质量,国内外也进行了大量能见度与颗粒物质量浓度之间的研究[7] [8] [9]。

目前缺少对延庆城区大气颗粒物与气象因素之间相关性的研究。本文通过2018~2019年环境监测站空气质量监测数据,研究大气颗粒物的污染特征,并结合对应的气象资料分析大气颗粒物污染受风向、风速、相对湿度、能见度等气象因素的影响情况,进一步了解延庆大气污染状况以及大气污染传输特征,找出空气质量与气象要素的关系。为气象预报服务积累经验,为本地大气污染防治提供科学依据。

2. 研究区域概况、数据来源及处理

2.1. 研究区域概况

延庆地处北京西北部,平均海拔500米以上,是首都西北部重要生态保育及区域生态治理协作区、生态文明示范区,拥有丰富的旅游资源,是2022年北京冬奥会三大赛区之一。近年来,延庆坚持把握生态涵养区的功能定位,着力开展森林城市建设,推动环境空气污染防治,全面改善环境空气质量,不断践行“生态文明,绿色发展”。

2.2. 数据来源

本文选用 2018~2019 年延庆区的颗粒物逐日和逐时平均浓度以及日平均风速、风向、相对湿度, 定时能见度、相对湿度等气象资料进行数据分析, 气象资料来源于延庆区气象局, 颗粒物浓度数据来源于延庆区环保局。

2.3. 数据处理

空气质量标准统一采用国家环境空气质量标准(GB 3095-2012), PM_{10} 一级和二级标准质量浓度限值分别为 50 和 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 一级和二级标准质量浓度限值分别 35 和 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

运用 Microsoft Excel 2010 对气象数据和 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度关系进行分析。

3. 空气质量特征

3.1. 空气质量年变化

图 1、图 2 为延庆城区 2018 年和 2019 年的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 不同日均质量浓度所占百分比。可以看出 2018 和 2019 年 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度分别有 18.4%、9.1% 日数超过国家环境空气质量二级标准限值, PM_{10} 日均质量浓度分别有 10.8%、6.1% 日数超过国家环境空气质量二级标准限值。

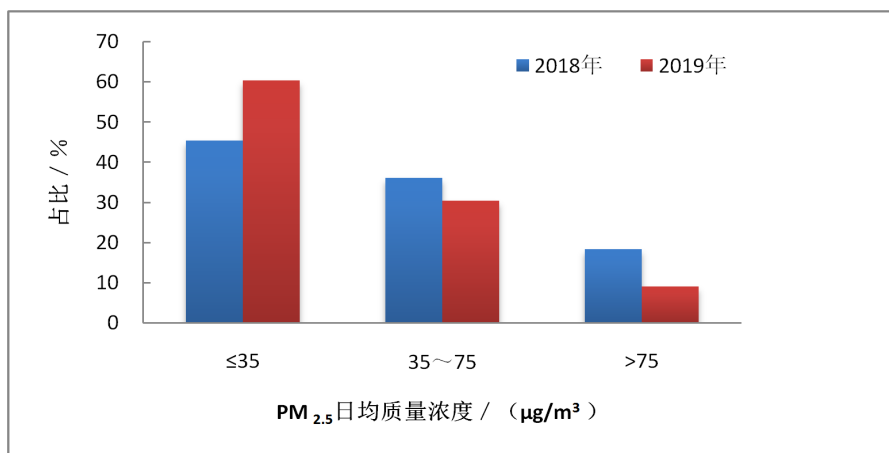


Figure 1. Percentage of the average daily $PM_{2.5}$ concentration in Yanching city from 2018 to 2019
图 1. 2018~2019 年延庆城区 $PM_{2.5}$ 不同日均质量浓度所占百分比

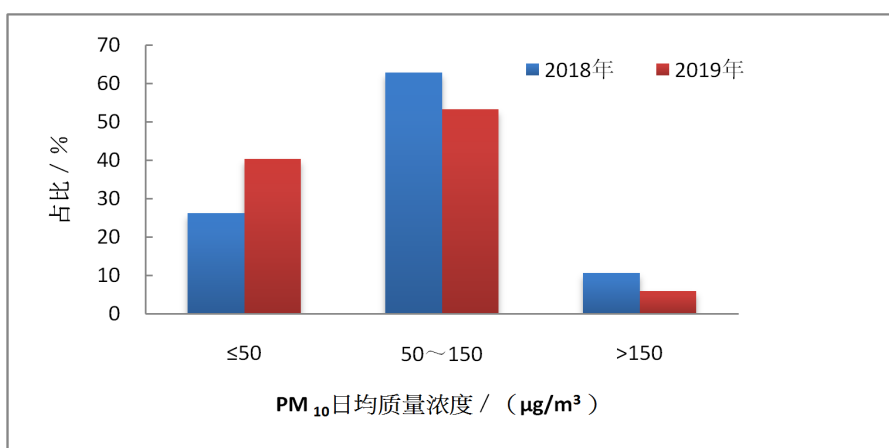


Figure 2. Percentage of the average daily PM_{10} concentration in Yanching city from 2018 to 2019
图 2. 2018~2019 年延庆城区 PM_{10} 不同日均质量浓度所占百分比

3.2. 空气质量月分布

分析 2018~2019 年延庆城区颗粒物的月均质量浓度, 整体上 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度月变化趋势相似, 且都呈现逐步下降趋势(图 3)。可以看出 PM_{10} 质量浓度的月变化大致为双峰单谷型, 峰值一般出现在 3~4 月和 11 月, 峰谷大致出现在 6~8 月份。 $PM_{2.5}$ 质量浓度 2018 年和 2019 年的月变化趋势有差异, 2018 年 3 月达到峰值, 4 月快速下降, 5 月小幅回升后再次下降并持续至 9 月达到谷底, 之后持续上升至 11 月份达到次峰值。2019 年则表现为 1 月 $PM_{2.5}$ 质量浓度达到峰值, 之后持续下降至 8 月达到最低值, 9 月之后逐渐反弹回升至 12 月再次达到次峰值。

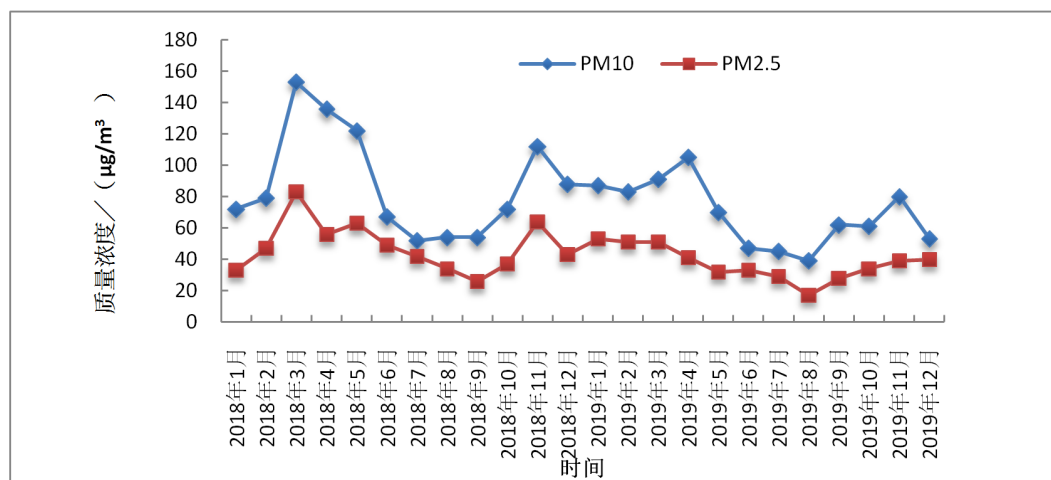


Figure 3. Monthly variation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Yanqing city from 2018 to 2019

图 3. 2018~2019 年延庆城区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 月均质量浓度

3.3. 空气质量及其影响因子日变化

为确定地面气象要素对颗粒物的影响, 对 2019 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度和气象要素的逐时数据进行分析。由 $PM_{2.5}$ 质量浓度及其影响因子的日变化特征(见图 4)可知, $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现双峰单谷型, 分别于 06 时和 17 时起由低值两次升至波峰和次波峰, 最低值出现在 17 时左右, 最高值出现在 09 时左右, 且夜间一直保持高浓度。对比细颗粒物与影响因子的日变化发现, 能见度、相对湿度和风速的波峰和波谷与 $PM_{2.5}$ 质量浓度有一定的对应关系。由于太阳辐射和大气边界层的日变化[10], 能见度呈现单峰型分布, 从 09 点开始逐渐提升, 15 时左右达到峰值; 相对湿度呈现单峰单谷型分布, 峰值出现在 06 时, 谷值出现在 15 时; 风速呈现单峰型分布, 峰值出现在 15 时。

夜间颗粒物吸湿增长, 且风速较低, 空气污染物扩散条件差, 颗粒物不断累积, 能见度也缓慢降低。当 06 时起, 热力扩散条件转好, 人类开始活动, 风速逐渐增加, 相对湿度开始降低, $PM_{2.5}$ 的积累和扩散同时存在, $PM_{2.5}$ 在 09 时累积达到最大。之后随着风速增大, 湿度继续降低, 颗粒物开始减少, 能见度转好。在 15 时左右, 相对湿度达到最低, 风速达到最大, 能见度达到峰值, $PM_{2.5}$ 浓度值也处于峰谷。17 时左右, 混合层高度降低, 逆温层逐渐形成, 不利于污染物扩散, $PM_{2.5}$ 开始逐渐累积。

4. 气象条件对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的影响

选取 2018~2019 年 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度超过环境空气质量二级标准限值的 100 个污染日和 PM_{10} 日均质量浓度超过环境空气质量二级标准限值的 61 个污染日观测数据, 并结合污染日对应的风速、风向和相对湿度进行统计分析, 探究延庆城区颗粒物质量浓度与气象要素的相关性。

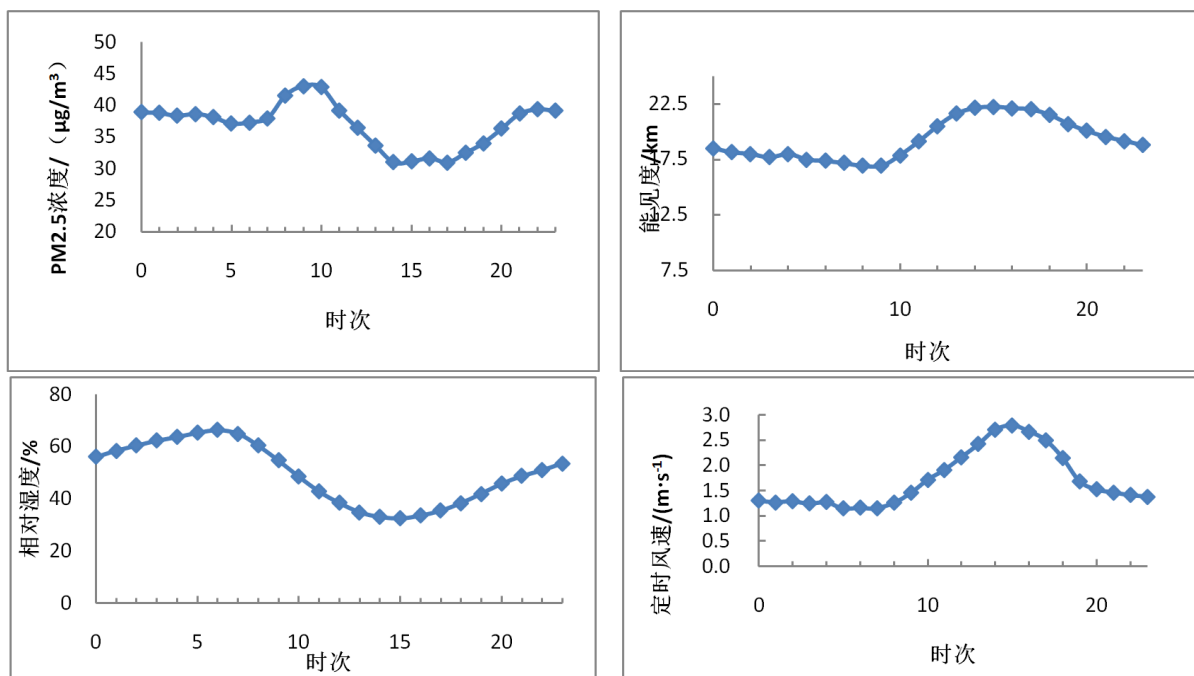


Figure 4. Diurnal variation characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in Yanqing city in 2019
图 4. 2019 年延庆城区 PM_{2.5} 及其影响因子的日变化特征

4.1. 风向

将风向按 16 方位划分(图 5), 按照风向出现频数前 5 位由多到少依次排序为东北偏东风(ENE)、东风(E)、东北风(NE)、西南偏西(WSW)、东南偏东(ESE)。其中东北偏东、东风、东北风向出现频数分别占总风向的 14.5%、10.2%、10.1%, 是延庆城区的主导风向, 其他风向出现的频数差别较小。

将 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度与各风向结合进行分析(图 6), 结果表明, 出现北风时 PM₁₀ 质量浓度最高, 平均为 99 µg/m³; 出现东风时 PM_{2.5} 质量浓度最高, 平均为 62 µg/m³, 且大值区主要对应偏东风、偏南风, 表明上述风向有利于空气污染物的堆积。

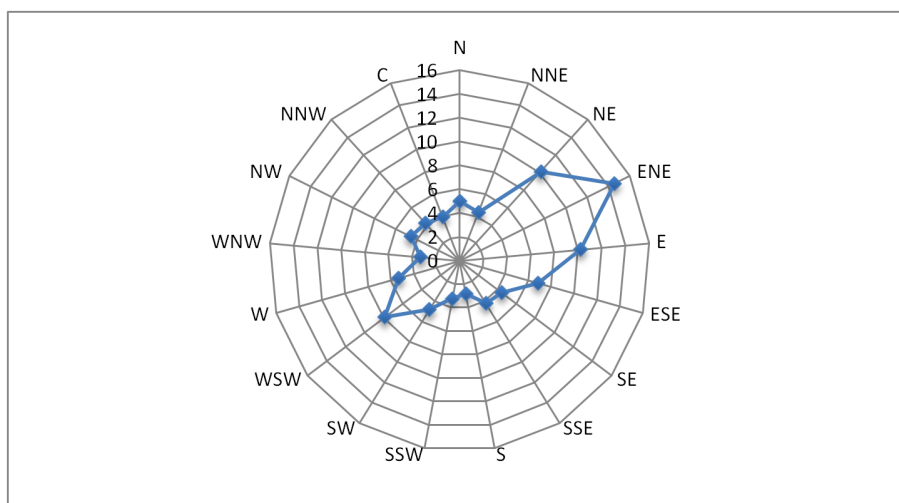


Figure 5. Wind direction rose map of Yanqing city
图 5. 延庆城区风向玫瑰图

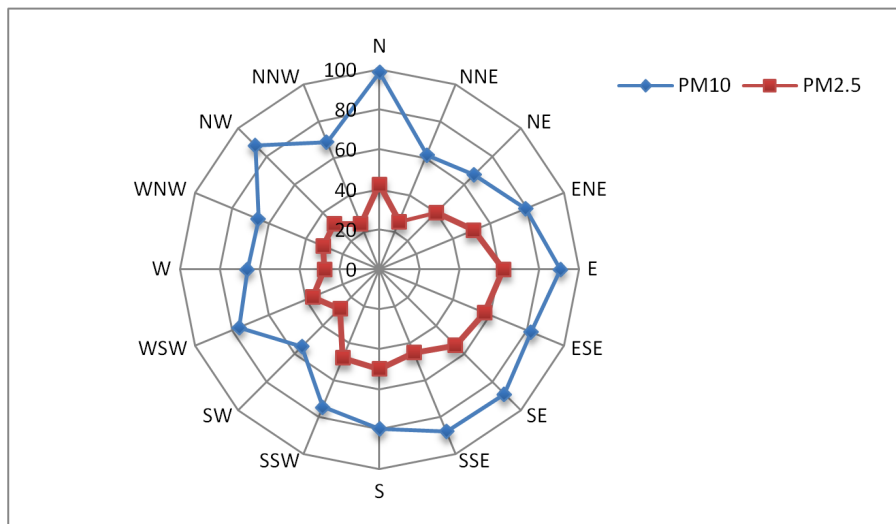


Figure 6. The average concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in each wind direction in Yanqing city
图 6. 延庆城区各风向 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 平均浓度

4.2. 风速

以日平均风速 5 米/秒为阈值，按 1 米/秒间隔进行分析(表 1)，结果显示，日平均风速在 2 米/秒以下时 $PM_{2.5}$ 污染日数占比达到总污染日数的 85%， PM_{10} 污染日数占比也达到总污染日数的 72%，日平均风速大于 3 米/秒时未出现 $PM_{2.5}$ 污染日，但 PM_{10} 污染日仍有 8.2%，表明静稳天气不利于空气污染物的扩散，风力较大时一方面形成对流利于空气污染物扩散，但另一方面易使地面沙尘吹起形成扬尘，造成 PM_{10} 污染。此外， PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染日数最大值并未出现在风力趋于静止(日平均风速 ≤ 1 米/秒)阶段，其最大值对应在日平均风速 1.1~2.0 米/秒， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染日数占比分别达到 61.0%和 63.9%，表明完全的空气静稳不利于空气污染物扩散但也不利于堆积，有一定的风力扰动但未形成较强的对流时，利于空气污染物的堆积。

Table 1. The influence of wind speed on air quality
表 1. 风速对空气质量的影响

日平均风速/(m/s)	$PM_{2.5}$ 污染日数/d	PM_{10} 污染日数/d	$PM_{2.5}$ 污染日数占比%	PM_{10} 污染日数占比%
≤ 1	24	5	24.0	8.2
1.1~2.0	61	39	61.0	63.9
2.1~3.0	15	12	15.0	19.7
3.1~4.0	0	4	0.0	6.6
4.0~5.0	0	1	0.0	1.6

4.3. 相对湿度

将日平均相对湿度(以下用 RH 表示)结合 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染日数日均质量浓度进行分析(表 2)，可以看出， $PM_{2.5}$ 污染日数占比在 $RH < 30$ 时最小，仅为 2%；在 30~50 区间时，占比随 RH 的增加而增加，且在 40~50 区间占比最高达 24%；在 $RH \geq 50$ 时，占比随 RH 的升高而降低。 PM_{10} 污染日数占比在 $RH < 30$ 以及 30~40 区间相同，均为 16.4%，在 40~50 区间占比最高达 26.2%，在 60 以上时占比明显降低。总

体看, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染日数易发生在 RH 位于 40~60 区间, 占比分别达到 44% 和 49.2%。

Table 2. The influence of relative humidity on air quality

表 2. 相对湿度对空气质量的影响

相对湿度/%	$PM_{2.5}$ 污染日数/d	PM_{10} 污染日数/d	$PM_{2.5}$ 污染日数占比%	PM_{10} 污染日数占比%
<30	2	10	2.0	16.4
$30 \leq RH < 40$	14	10	14.0	16.4
$40 \leq RH < 50$	24	16	24.0	26.2
$50 \leq RH < 60$	20	14	20.0	23.0
$60 \leq RH < 70$	17	3	17.0	4.9
$70 \leq RH < 80$	14	5	14.0	8.2
$80 \leq RH < 90$	9	3	9.0	4.9

4.4. 大气能见度与颗粒物污染物的关系

选取 2019 年 1~12 月 $PM_{2.5}$ 和大气能见度的小时数据, 分析 $PM_{2.5}$ 质量浓度和大气能见度的相关性。考虑到降水能有效减小 $PM_{2.5}$ 质量浓度, 因此剔除了降水时次, 同时为了避免相对湿度对能见度的影响, 将相对湿度划分为不同区域, 绘制各区间内能见度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的散点分布趋势图, 用幂函数拟合 $PM_{2.5}$ 质量浓度和能见度的散点分布, 并得到能见度与 $PM_{2.5}$ 质量浓度的定量关系式。

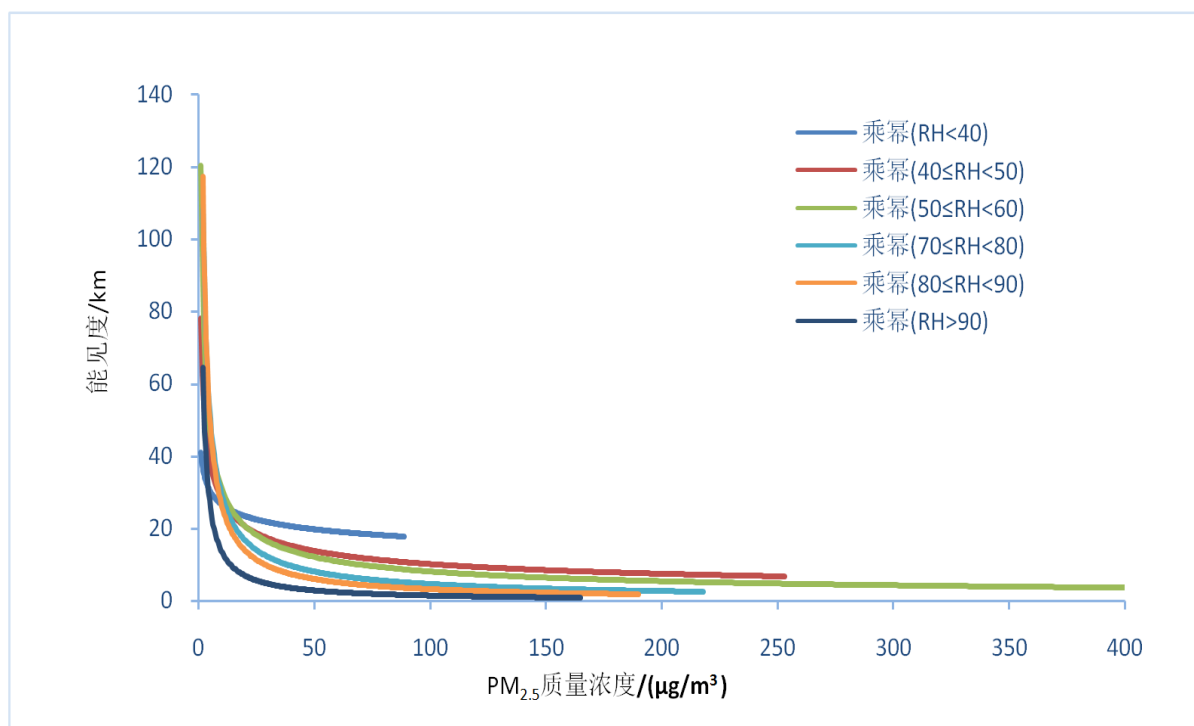


Figure 7. Relationship between atmospheric visibility and $PM_{2.5}$ concentration in Yanqing city under different relative humidity

图 7. 延庆城区不同相对湿度下大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度关系

Table 3. The quantitative relationship between visibility and PM_{2.5} mass concentration under different relative humidity conditions and the sensitive threshold of PM_{2.5} influence on visibility

表 3. 不同相对湿度条件下能见度与 PM_{2.5} 质量浓度的定量关系式及 PM_{2.5} 对能见度的影响敏感阈值

相对湿度%	拟合方程	相关系数	PM _{2.5} 阈值
RH < 40	$y = 41.068x^{-0.186}$	0.4258	—
40 ≤ RH < 50	$y = 78.008x^{-0.442}$	0.6267	104 μg/m ³
50 ≤ RH < 60	$y = 120.43x^{-0.588}$	0.691	69 μg/m ³
60 ≤ RH < 70	$y = 172.57x^{-0.726}$	0.7208	50 μg/m ³
70 ≤ RH < 80	$y = 189.45x^{-0.808}$	0.7374	38 μg/m ³
80 ≤ RH < 90	$y = 222.92x^{-0.925}$	0.7958	29 μg/m ³
RH > 90	$y = 125.61x^{-0.961}$	0.5186	14 μg/m ³

由图 7 和表 3 可以看出，大气能见度与 PM_{2.5} 质量浓度散点趋势分布成幂函数关系。结果表明，当 RH < 40%，散点分布较为混乱，能见度与 PM_{2.5} 的相关性较差。随着湿度增加，PM_{2.5} 质量浓度与大气能见度的非线性关系逐渐转好，当 80% ≤ RH < 90%，两者相关性最强，相关系数为 0.7958，当 RH > 90% 相关性开始减弱，这与白永清等人[11]的研究结果一致。

由于能见度与 PM_{2.5} 浓度成幂函数关系，一定湿度条件下，当 PM_{2.5} 低于某浓度阈值时，能见度随颗粒物浓度降低迅速升高，当高于该阈值时，能见度随颗粒物的变化不明显。本研究以能见度 10 km 确定为 PM_{2.5} 的阈值，求得各湿度区间的 PM_{2.5} 阈值，随着湿度的增加 PM_{2.5} 的阈值逐渐减小。这表明由于颗粒物吸湿增长，空气中容纳污染物质量浓度减小，较小的颗粒物浓度就会大幅降低能见度。对于延庆而言，年相对湿度的均值为 50% 左右，当 PM_{2.5} 高于 69 μg/m³ 很容易出现低能见度天气。因此在大气污染治理时，初期 PM_{2.5} 下降对能提高能见度的效果并不明显，一旦浓度超过阈值，能够大幅提升能见度，这对提高延庆城区大气能见度有重要指示意义。

5. 典型污染过程分析

选取 11 月 22 日~23 日延庆城区经历的一次霾天气过程。图 8~9 可以看出，21 日 14 时左右，风向转为偏东风，相对湿度增高，PM_{2.5} 质量浓度升高，能见度持续走至 10 km 以下。夜间风速较小且稳定，PM_{2.5} 开始累积并始终保持在 100 μg/m³ 左右。22 日 06 时，伴随着日变化，PM_{2.5} 质量浓度开始攀升，湿度降低，中午风速略有增大，在 13 时左右，相对湿度降低到 69%，颗粒物浓度达到 170 μg/m³，能见度维持在 2~3 km。23 日 06 时左右，PM_{2.5} 浓度再次攀升，并在 12 时达到 200 μg/m³，直到 23 日 21 时左右，相对湿度开始迅速降低，随后 PM_{2.5} 质量浓度降低，能见度有所好转。在 23 时，PM_{2.5} 浓度降至阈值以下，能见度随之迅速升至 30 km，并在 02 时左右，风速开始增强，风向转为偏北风，相对湿度降低到 20% 左右，此次过程结束。

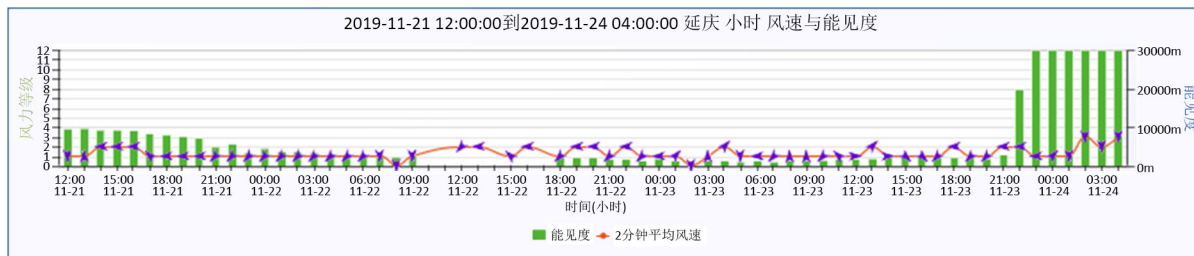


Figure 8. Hourly wind speed and visibility in Yanqing city from 12 o'clock on November 21, 2019 to 24 o'clock on November 24, 2019

图 8. 2019 年 11 月 21 日 12 时~24 日 04 时延庆城区小时风速与能见度

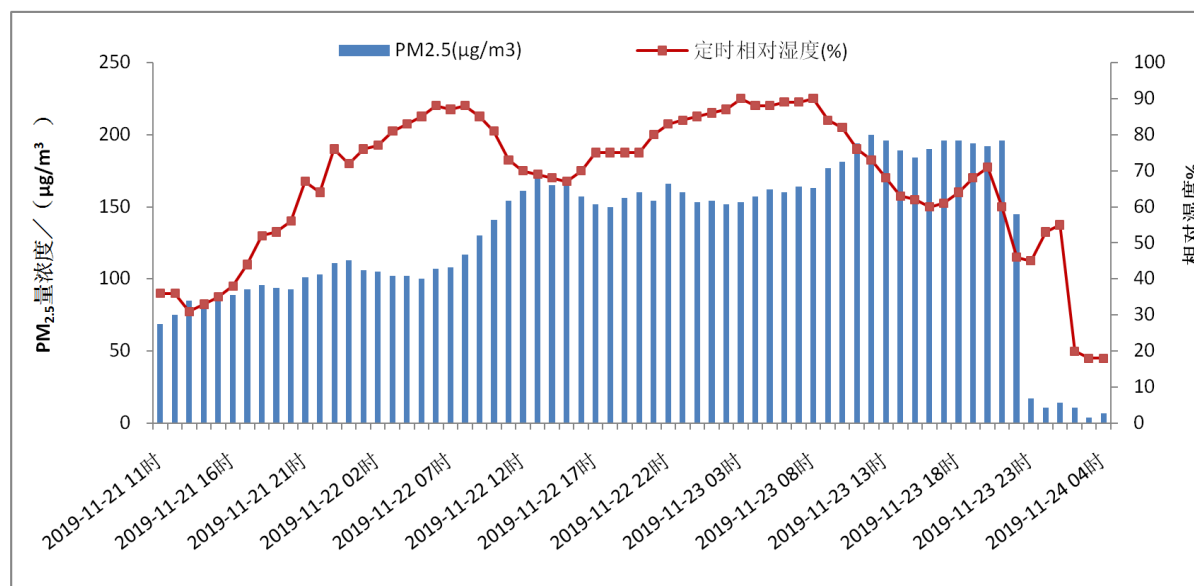


Figure 9. The $PM_{2.5}$ concentration and relative humidity in Yanqing from 12 o'clock on November 21 to 24 o'clock on November 24 in 2019

图 9. 2019 年 11 月 21 日 12 时~24 日 04 时延庆城区 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度

在整个过程中, $PM_{2.5}$ 随着湿度、风速风向的日变化有所起伏, 但可能由于偏东风导致污染物传输, 同时有水汽输送, 相对湿度始终处于较高水平, 致使低能见度和 $PM_{2.5}$ 浓度始终保持较高水平。此次过程并不能代表普遍的研究结论, 还需要结合高空资料进一步分析研究。

6. 结论

1) 2018 和 2019 年延庆城区整体上 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度月变化趋势相似, 且都呈现逐步下降趋势。从时间上看, PM_{10} 质量浓度年度的月变化大致为双峰单谷型, 峰值一般出现在 3~4 月和 11 月, 峰谷大致出现在 6~8 月份, $PM_{2.5}$ 的月变化没有明显的周期特征。2019 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度日变化呈现双峰单谷型, 分别于 06 时和 17 时起由低值两次升至波峰和次波峰, 最低值出现在 17 时左右, 最高值出现在 09 时左右。

2) 延庆城区主导风向为东北偏东风, 占总风向频率的 14.5%, 在近地面吹北风时, PM_{10} 质量浓度最高, 偏东风能够明显增加 $PM_{2.5}$ 质量浓度, 导致空气质量下降。日平均风速处于 1.1~2.0 米/秒时, 颗粒物污染日数占比达到最大值。

3) 当日平均相对湿度在 40%~60% 区间时, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染日数占比相对比较集中。

4) 能见度随 $PM_{2.5}$ 增加呈幂指数降低, 在 $80\% \leq RH < 90\%$ 区间, 两者相关性最强。随着湿度增大, $PM_{2.5}$ 的阈值逐渐变小, 当延庆城区 $PM_{2.5}$ 的浓度超过 69 这个阈值时, 就容易处于较低的大气能见度。

基金项目

北京市气象局科技项目——能见度仪在高山滑雪赛区的适用性研究(BMBKJ201904004)。

参考文献

- [1] 吴健, 齐晓宝, 苏敬华, 李佳凤, 沙晨燕, 熊丽君, 王敏. 2015 年上海崇明岛 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化特征及气象因素影响分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(3): 1-8.
- [2] 曾妮, 吴哲红, 方鹏, 蒙军, 胡秋红. 安顺市空气质量特征与气象条件关系分析[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(6):

38-43.

- [3] 慕彩芸, 屠月青, 冯瑶. 气象因子对哈密市大气可吸入颗粒物浓度的影响分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(S1): 75-79.
- [4] 张剑, 刘红年, 唐丽娟, 朱焱, 周志恩, 蒋维楣. 苏州城区能见度与颗粒物浓度和气象要素的相关分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(9): 982-987.
- [5] 马格, 田国行, 李永华, 段彦博, 吴宝军, 雷雅凯. 郑州市气象因子对大气颗粒物浓度的影响研究[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 29-38.
- [6] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 张远航, 胡敏, 曾立民, 李成才, 毛节泰, Michael Bergin. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. 环境科学学报, 2003(4): 468-471.
- [7] 姜江, 张国平, 高金兵. 北京大气能见度的主要影响因子[J]. 应用气象学报, 2018, 29(2): 188-199.
- [8] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 梁桂雄, 薛志钢, 王贝贝, 梁永健, 陈瑜, 张萌. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 967-971.
- [9] 陈婧, 马志强, 胡天洁, 卢俐, 林润生. 华北背景地区大气能见度变化特征及影响因素分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(2): 277-288.
- [10] 杨茜, 高阳华, 李振亮. 重庆市霾天气下大气能见度与颗粒污染物的关系[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(9): 134-140.
- [11] 白永清, 祁海霞, 刘琳, 陈城, 林春泽, 李武阶. 武汉大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报, 2016, 74(2): 189-199.