

西安市东郊6月PM₁₀颗粒物浓度时空变化规律

周岳¹, 赵景波^{1,2}

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062;

2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

摘要: 利用粉尘观测仪, 在2012年6月对西安市东郊工业区24层高楼PM₁₀颗粒物进行了昼夜观测, 研究了PM₁₀质量浓度的昼夜变化与影响因素。结果表明, PM₁₀质量浓度在高度上的变化可分为4个层段, 在1 m高度范围内为第1层段, 浓度最低, 平均为0.027 mg·m⁻³; 4~37 m高度为第2层段, 浓度最高, 平均为0.055 mg·m⁻³; 40~55 m高度为第3层段, 浓度较低, 平均为0.038 mg·m⁻³; 58~70 m为第4层段, 浓度较高, 平均为0.042 mg·m⁻³。PM₁₀质量浓度在昼夜24小时内的变化可分为3个阶段, 第1阶段在8:00—16:00, 浓度最高, 并由早到晚呈现出逐渐升高的趋势。第2阶段在18:00—20:00, 浓度最低, 从早到晚呈逐渐下降的趋势。第3阶段在22:00—6:00, 浓度居中, 从早到晚呈逐渐升高的趋势。PM₁₀质量浓度昼夜变化特点是呈现极不对称双峰型, 表现为白天高(平均浓度为0.048 mg·m⁻³), 夜间低(平均浓度为0.040 mg·m⁻³), 这一变化规律受大气稳定度、污染源和温度等变化的影响。在70 m高度范围内PM₁₀浓度与温度、高度的二元线性回归方程表明, 在影响PM₁₀浓度的高度和温度因素中, 温度对PM₁₀浓度的影响比高度大。根据环境空气质量标准进行评价, 西安东郊工业区在6月监测时段内1~70 m的可吸入颗粒物浓度总体较低, 空气质量良好, 但要进行准确、全面的评价还需要逐日监测数据和SO₂及NO_x的监测数据。

关键词: 可吸入颗粒物; 昼夜变化; 垂向变化; 大气污染; 影响因素; 西安东郊

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)04-0243-09

Vertical and temporal variation of PM₁₀ in June in the eastern suburbs, Xi'an

ZHOU Yue¹, ZHAO Jing-bo^{1,2}

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to study the diurnal variation of PM₁₀ concentration and the influence factors, day and night observation was done in June 2012 in a 24-story building located in eastern suburbs of Xi'an Industrial Zone. The results showed that the PM₁₀ mass concentration changed with height and could be divided into four zones. Height less than 1 m was the first layer with lowest PM₁₀ mass concentration, 4~37 m was the second layer with highest concentration, 40~55 m was the third layer with lower concentration, 58~70 m was the fourth layer with higher concentrations, with an average of 0.027 mg·m⁻³, 0.055 mg·m⁻³, 0.038 mg·m⁻³, 0.042 mg·m⁻³, respectively. PM₁₀ mass concentration within 24 hours in one day could be divided into three stages. The first stage was 8:00—16:00 with the highest concentration, and the concentration increased gradually from 8:00 to 16:00; the second stage was 18:00—20:00 with the lowest concentration, and there was

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAC30B01)

通讯作者: 赵景波, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

a gradual downward trend; the third stage was 22:00—6:00, and the concentration increased gradually. The diurnal variation of PM_{10} mass concentration showed a very asymmetric bimodal pattern, which was high in the daytime (the average concentration was $0.048 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and low at night (the average concentration was $0.040 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), this change was influenced by atmospheric stability, sources of pollution and temperature, etc. The binary linear regression equation between PM_{10} concentration and temperature, as well as PM_{10} concentration and height, indicated that the influence of temperature on PM_{10} concentration is larger than that of height. Overall, at 1~70 m height in June in the eastern suburbs of Xi'an, the concentration of respirable particulate matter was low, and the air quality was good according to ambient air quality standards. But accurate and comprehensive evaluation required daily monitoring data, SO_2 and NO_x monitoring data.

Key words: PM_{10} ; vertical variation; diurnal variation; atmospheric pollution; influence factors; the eastern suburbs of Xi'an

通常将能悬浮在空气中,空气动力学当量直径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的煤烟、烟气和雾等颗粒物称为 PM_{10} , 又称为可吸入颗粒物, PM_{10} 在环境空气中持续的时间很长,是大气污染的主要污染物之一(张继红等, 2008),对人体健康和大气能见度影响都很大,还会影响地球的气候(唐孝炎, 1991; 杨复沫等, 2002; 刘爱君等, 2004; 邵龙义等, 2006)。一些颗粒物来自烟囱与汽车的直接排放,另一些则是由环境空气中硫氧化物、氮氧化物及其他化合物相互作用形成的,它们的化学和物理组成依地点、气候、一年中的季节不同而变化很大。

随着城市的发展,人们的工作和生活空间逐渐向空中发展(李良玉等, 2007),大气污染物对生活在不同高度的人群的影响愈加明显。近年来,许多研究者对大气颗粒物进行了大量观测和研究。孙玫玲等(2008)研究了天津市秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的垂直分布特征,发现各层污染物的质量浓度随高度变化的总体趋势是 $120 \text{ m} > 40 \text{ m} > 220 \text{ m}$ 。杨龙等(2006)对北京秋冬两季 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直分布进行了探讨,揭示出秋冬两季 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度随高度增加而呈现对数递减规律。韩素芹等(2008)对天津市近地层 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直分布进行研究,得出 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度在冬季最高,春季最低。张月明等(1996)对淮阴市大气污染物的垂直分布研究发现,高空的大气环境质量优于近地面的大气环境质量。孔春霞等(2009)对南京市生活区夏秋季节大气颗粒物的垂直分布特征进行了研究,认为随着高度的增加,采样期间夏季和秋季的 PM_{10} 和

$\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度均呈现逐渐减小的趋势。

在国外,对 PM_{10} 浓度也进行了许多研究。van der Wal and Janssen (2000)研究发现,荷兰 PM_{10} 浓度变化是由于温度和风向的影响,二者的影响是 PM_{10} 浓度变化的主要因素。Begum et al (2006)对孟加拉国达卡市的 PM_{10} 来源开展了研究,发现化学燃料的燃烧和生物燃料的燃烧是 PM_{10} 主要来源。Yi et al (2010)对韩国首尔市 PM_{10} 浓度和发病率之间的关系分析研究发现,随季节变化 PM_{10} 浓度对发病率和死亡率的影响也发生变化,尤其是在夏季发病率比较高。Krecl et al (2008)研究瑞典北部地区在周末和周日悬浮颗粒物浓度的变化,发现周末夜间悬浮颗粒物浓度比周日高,这可能是森林燃烧和交通尾气排放造成的。Juneng et al (2009)对马来西亚西南沿海等地区夏冬两季的 PM_{10} 浓度做了研究,得出在马来西亚沿海地区冬季 PM_{10} 浓度最低,在夏季最高。

西安市为中国西北地区重要城市,属暖温带半湿润大陆性季风气候,颗粒物污染较严重,因此颗粒物污染研究和治理迫在眉睫,目前针对西安市 PM_{10} 浓度昼夜变化和垂向变化研究非常少。本论文对西安市东郊空气中 PM_{10} 质量浓度在垂直高度的变化规律进行探讨,以期西安市的可吸入颗粒物污染治理提供科学依据。

1 观测地点和方法

可吸入颗粒物垂直采样需要有一定高度的采样平台,我们选在西安市东郊军工厂工业区附近

家属区的24层高楼进行观测。具体观测地点为公园北路黄河机械制造厂九街坊家属院2号高层(N34°26', E109°00'), 采样点选在各个楼层的窗户外。这栋楼的北侧靠马路, 附近没有大型烟囱, 居民楼居多。该楼周边有几个大型军工厂, 大气污染主要来自工业和交通污染, 其次有餐饮网点和居民生活产生的污染。由于西安市6月初期风力不大, 雨水不多, 有利于大气环境观测。在采样点布局时, 选择了背对马路靠家属区内部的南边的窗户, 尽量减小交通扬尘带来的局部影响。

在2012年6月2—3日、8—9日、12—13日分别进行了3昼夜的可吸入颗粒物质量浓度观测。采样时间从早上8:00开始至第2天早上8:00结束, 对24层楼的各层固定高度每隔2小时观测1次, 测定1~70 m各个高度的可吸入颗粒物的质量浓度, 每次观测下来可获得24个观测数据, 取几次测定的平均值进行分析和讨论。观测可吸入颗粒物PM₁₀采用的是青岛海特尔环保科技有限公司LD-3C(L)型袖珍式微电脑激光粉尘仪。该仪器利用激光为光源, 使空气中PM₁₀的质量浓度能够快速测出, 每测一次获得数据所需要的时间是1 min。该仪器具有自校系统, 可以通过“测量—校准”按钮对仪器进行校准, 性能可靠, 稳定性高, 可以精确地获得结果, 满足实验所需的精准度。为了消除系统误差, 应把仪器安放在固定高度和固定的地点来进行观测。

温度数据来源于实地温度计所显示气象参数, 并选取西安市2012年6月2—13日整点天气实况数据作为参考。风速则由携带式风速仪在不同高度进行测试。分析采用Word 2007和Excel 2007建立数据库, 对3昼夜观测数据进行平均值处理。

2 结果与分析

2.1 不同高度PM₁₀质量浓度随时间的变化特征

6月份1~70 m不同高度处PM₁₀质量浓度的昼夜观测结果(图1a)表明, 1~16 m变化范围是0.000~0.090 mg·m⁻³, 平均为0.0453 mg·m⁻³。在一昼夜内1 m高度范围各个时间段的质量浓度普遍很低, 根据PM₁₀质量浓度的变化, 我们可将4~16 m PM₁₀质量浓度的昼夜变化分为3个阶段。第1阶段是在8:00—16:00, 浓度最高, 变化范围0.000~0.090 mg·m⁻³, 平均为0.058 mg·m⁻³, 由早

到晚呈现出逐渐升高的趋势。第2阶段在18:00—20:00, 浓度最低, 变化范围0.005~0.075 mg·m⁻³, 平均为0.036 mg·m⁻³, 从早到晚呈逐渐下降的趋势。第3阶段在22:00—6:00, 浓度居中, 变化范围0.010~0.080 mg·m⁻³, 平均为0.043 mg·m⁻³, 从早到晚呈逐渐升高的趋势。

由图1b中的观测结果可知, 在19~34 m楼层范围内PM₁₀浓度变化与4~16 m相近, 从当日早6:00到次日6:00呈现由低到高再到低再到高的变化。在19~34 m高度PM₁₀浓度变化范围为0.010~0.110 mg·m⁻³, 平均浓度为0.0475 mg·m⁻³。根据浓度变化, 可将图1b中的PM₁₀浓度昼夜变化分为3个阶段。第1阶段在8:00—16:00, 浓度最高, 变化范围是0.030~0.110 mg·m⁻³, 平均为0.060 mg·m⁻³, 呈现出先上升后下降的趋势。第2阶段在18:00—20:00, 浓度最低, 变化范围是0.010~0.090 mg·m⁻³, 平均为0.035 mg·m⁻³, 呈现逐步下降的趋势。第3阶段在22:00—6:00, 浓度居中, 变化范围是0.010~0.060 mg·m⁻³, 平均为0.040 mg·m⁻³。

图1c显示, 在37~52 m, PM₁₀浓度变化范围是0.010~0.100 mg·m⁻³, 平均为0.0452 mg·m⁻³。根据浓度变化, 也可将37~52 m高度的PM₁₀质量浓度的昼夜变化分为3个阶段。第1阶段在8:00—16:00, 浓度最高, 为0.040~0.100 mg·m⁻³, 平均为0.048 mg·m⁻³, 呈上升趋势。第2阶段是18:00—20:00, 浓度最低, 为0.010~0.090 mg·m⁻³, 平均为0.036 mg·m⁻³。第3阶段是20:00—6:00, 浓度居中, 为0.010~0.070 mg·m⁻³, 平均为0.043 mg·m⁻³, 呈缓慢上升趋势。

图1d中的观测结果显示, 在55~70 m, PM₁₀质量浓度的昼夜平均值为0.035 mg·m⁻³, 变化范围是0.010~0.080 mg·m⁻³。该高度PM₁₀质量浓度变化可分为4个阶段, 第1阶段为8:00—16:00, 浓度最高, 变化范围是0.010~0.080 mg·m⁻³, 平均为0.042 mg·m⁻³, 呈现逐渐上升的趋势。第2阶段为18:00—22:00, 浓度最低, 变化范围是0.010~0.050 mg·m⁻³, 平均为0.028 mg·m⁻³。第3阶段在0:00—2:00, 浓度较高, 变化范围是0.010~0.060 mg·m⁻³, 平均为0.033 mg·m⁻³。第4阶段为4:00—6:00, 浓度较低, 变化范围是0.010~0.040 mg·m⁻³, 平均为0.029 mg·m⁻³, 呈现

出下降趋势。

综上所述, PM_{10} 质量浓度在昼夜 24 小时内的变化可分为 3 个阶段, 第 1 阶段在 8:00—16:00, 浓度最高, 并由早到晚呈现出逐渐升高的趋势。第 2 阶段在 18:00—20:00, 浓度最低, 从早到晚呈逐渐下降的趋势。第 3 阶段在 22:00—6:00,

浓度居中, 大致呈逐渐升高的趋势。 PM_{10} 质量浓度昼夜变化特点是呈现极不对称双峰型, 少数为单峰型。双峰型即上午 PM_{10} 的质量浓度基本都比下午的质量浓度要大, 夜间又有所升高; 单峰型即夜间浓度变化不明显, 主要显示上午浓度的峰值。

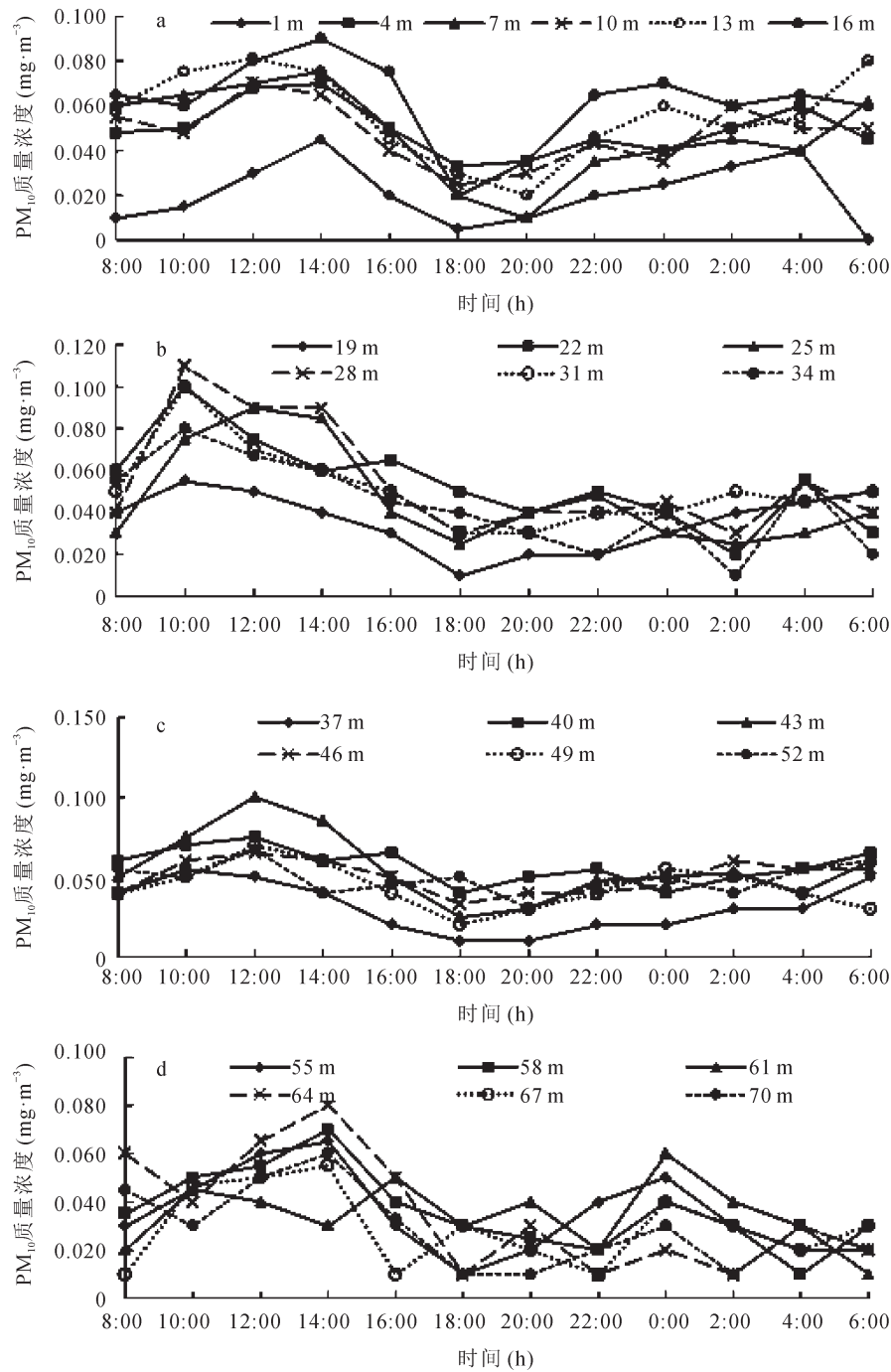


图 1 6 月份不同高度 PM_{10} 质量浓度的昼夜变化 (a.1~16 m b.19~34 m c.37~52 m d.55~70 m)
Fig.1 Temporal variation of PM_{10} mass concentration at different heights from 1 to 70 meters in June

2.2 6月份昼夜质量浓度随高度变化特征

由图2可知,上午(8:00—12:00)PM₁₀质量浓度随高度的变化呈先上升后下降再升高的变化趋势,并可分为4个层段。第1层段为1 m高度以下,浓度最低,平均为0.025 mg·m⁻³。第2层段为4~37 m,浓度最高,平均为0.064 mg·m⁻³,变化范围为0.010~0.080 mg·m⁻³。第3层段在40~55 m,浓度较低,平均为0.038 mg·m⁻³,变化范围为0.030~0.044 mg·m⁻³。第4层段在58~70 m,浓度较高,平均为0.045 mg·m⁻³,变化范围为0.030~0.060 mg·m⁻³。

下午(14:00—20:00)PM₁₀质量浓度的变化与上午相似,但波动较小,也可分为4个层段。第1层段是1 m以下,浓度最低,平均为0.020 mg·m⁻³。第2层段在4~37 m,浓度最高,平均为0.045 mg·m⁻³,变化范围为0.030~0.055 mg·m⁻³。第3层段在40~55 m,浓度较低,平均为0.030 mg·m⁻³,变化范围为0.020~0.040 mg·m⁻³。第4层段在58~70 m,浓度较高,平均为0.040 mg·m⁻³,变化范围是0.035~0.047 mg·m⁻³。

夜间(22:00—6:00)PM₁₀质量浓度随高度的变化呈现出先升高后降低再升高的趋势。根据浓度变化,可分为4个层段。第1层段在1 m高度

以下,浓度最低,平均为0.015 mg·m⁻³。第2层段在4~37 m,浓度最高,平均为0.050 mg·m⁻³,变化范围为0.040~0.065 mg·m⁻³。第3层段在40~55 m,浓度较低,平均为0.030 mg·m⁻³,变化范围为0.020~0.045 mg·m⁻³。第4层段是58~70 m,浓度较高,平均为0.040 mg·m⁻³,变化范围为0.030~0.047 mg·m⁻³。

日平均的PM₁₀质量浓度随高度变化呈现出先上升后下降再升高的变化趋势,可分为4个层段。第1层段在1 m高度以下,浓度最低,平均为0.020 mg·m⁻³。第2层段在4~37 m,浓度最高,平均为0.051 mg·m⁻³,变化范围为0.040~0.058 mg·m⁻³,高于下午和夜间浓度,但还是低于上午时浓度。第3层段40~55 m,浓度较低,平均为0.038 mg·m⁻³,变化范围为0.035~0.040 mg·m⁻³。第4层段在58~70 m,浓度较高,平均为0.042 mg·m⁻³,变化范围在0.030~0.040 mg·m⁻³。

综上所述,西安市东郊6月份PM₁₀质量浓度随高度的变化可分为4个层段,在1 m高度范围内的PM₁₀浓度最低,在4~37 m高度PM₁₀浓度最高,在40~55 m高度PM₁₀浓度较低,在58~70 m高度PM₁₀浓度较高。

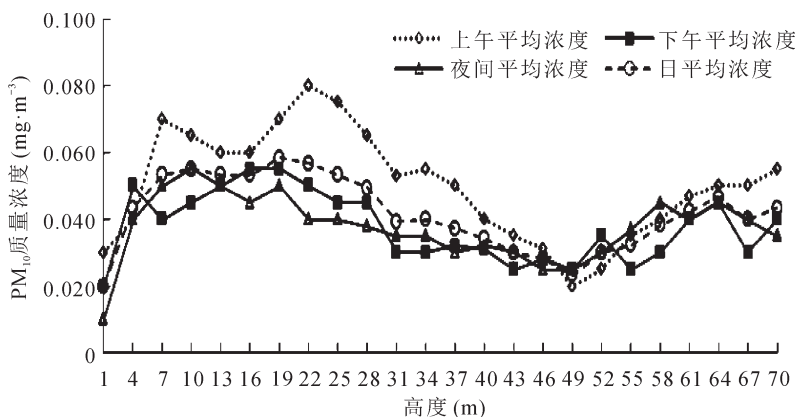


图2 6月不同时间段PM₁₀质量浓度随高度变化

Fig.2 Vertical variation of PM₁₀ mass concentration at different times of day in June

3 讨论

3.1 西安东郊PM₁₀质量浓度的垂直变化规律和原因分析

从PM₁₀质量浓度在不同高度的变化规律来看,1 m高度范围内的PM₁₀质量浓度在各个时间段最

低,4~37 m处PM₁₀质量浓度最高,40~55 m处PM₁₀质量浓度较低,58~70 m处PM₁₀质量浓度较高(图2)。不同高度PM₁₀浓度的昼夜变化受到大气稳定度的影响。陈辉等(2001)研究表明,城市污染物与自然地理条件和气象条件有密切的关系。董雪玲等(2005)对北京市区夏季大气颗粒物

污染的研究发现,夏季颗粒物浓度较其他季节低,是由于夏季雨水多,且日照时间相对较长和扩散较强的缘故。由于 PM_{10} 易于悬浮,主要分布在1 m高度之上,所以一昼夜内1 m高度范围内 PM_{10} 浓度一般最低。上午近地面大气受热,空气垂直对流运动将底层空气输送到上层,使得4~37 m处的 PM_{10} 最高。在向上到40~55 m高度范围, PM_{10} 浓度较低,这是 PM_{10} 浓度向高处浓度减小的结果。在58~70 m则略有升高,其原因有待进一步研究。

孔春霞等(2009)研究表明,在80 m高度范围内,随着高度的增加污染物浓度有逐渐减小的趋势,但没有分辨出高度上的规律变化。虽然我们的观测也显示出 PM_{10} 浓度在高度上总体呈减少的趋势,但发现了在不同高度上的多次变化,这是我们的观测点分布密度大和分辨率高的结果。孔春霞等的研究在高度上的观测点较少,而本文在高度上的观测点分布密集,在高度上的分辨率较高,所以能够揭示 PM_{10} 浓度在高度上存在的变化规律。

3.2 PM_{10} 污染物浓度的昼夜变化规律与影响因素

观测结果(图3)表明,从时间的变化上看,大部分高度范围的 PM_{10} 质量浓度昼夜变化特征呈极不对称的双峰型,即上午为大高峰,夜间为小高峰。西安市6月份空气污染浓度日变化特点是白天高、夜晚低,这是污染物排放和气象条件的综合作用的结果。 PM_{10} 在每天的8:00—14:00和22:00—6:00是污染的两个高峰期,其原因主要由于早晚时段,空气中排放的污染气体多,而且这一时间的大气混合层尚未得到充分的发展,地面风速较小不利

于污染物的稀释和扩散。在早晨和夜间大气层结稳定,在冷高压的影响下往往会有气温逆增现象,即上层气温高,而地表气温低,湍流小,大气对流微弱。由于这时近地面有害污染物不能向大气上层扩散,停留在下层,使污染物滞留、累积,其质量浓度增大,所以污染最重。随着上下班出行高峰时间汽车运行和建筑施工等污染源影响加重,导致污染物浓度不断增高并达到最大值。在工业集中或高楼林立的居民区及汽车飞驰而过的道路两旁,这种现象尤为典型。之后在16:00—20:00是一天的污染最轻的时段,因为这时地面受到了8:00—16:00较强的太阳辐射,地面增温强烈,大气处于不稳定状态,污染物的扩散能力增强,空气的湍流作用明显,空气污染物较易扩散,所以 PM_{10} 的质量浓度变得最低。

大气污染物的扩散与输送直接或间接受到各种气象因子的影响。本文利用实地温度计测定的气温数据以及各高度处的 PM_{10} 质量浓度数据,对二者进行相关分析(图4)。采样期间(6月2日、8日、12日)夜间气温一般维持在20℃左右,而白天最高气温基本上都在30℃左右。结果(图4)表明,随着温度的升高, PM_{10} 浓度呈下降趋势,这是由于气温较高时有利于大气的垂直对流,能够加快颗粒物的扩散,使得颗粒物的质量浓度变低(刘大锰等,2005)。而温度较低时,空气下沉,不利于颗粒物的扩散,致使颗粒物浓度增加。温度对 PM_{10} 浓度的影响在7~31 m高度较明显,对近地面3 m以下 PM_{10} 浓度的影响较小,这可能是3 m以下易受汽车等人类活动直接干扰造成的。

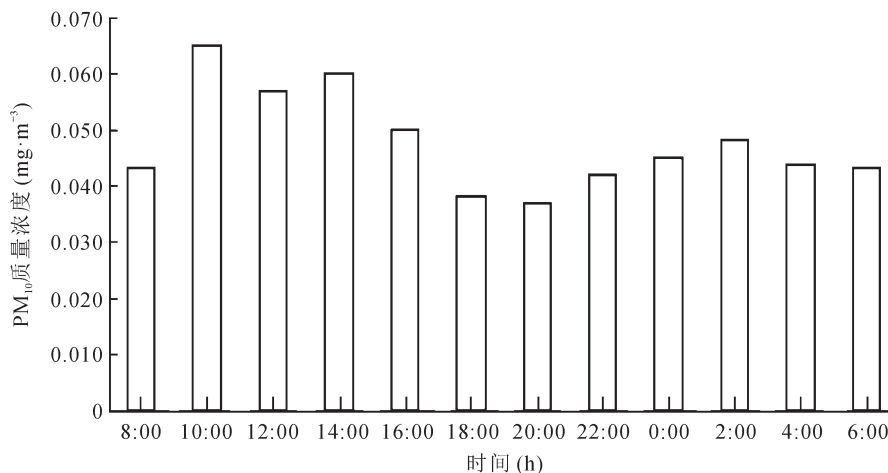


图3 6月份 PM_{10} 质量浓度随昼夜变化

Fig.3 Temperature changes at different periods in June

3.3 西安 6 月 PM₁₀ 空气质量评价

可吸入颗粒物会严重影响人体健康, 谢鹏等 (2010) 研究发现, 如果珠江三角洲地区 2006 年所有监测城市的 PM₁₀ 质量浓度达到国家二级标准, 成人可避免死亡人数为 2300 人, 人群平均期望寿命延长 0.13 a。黄鹂鸣等 (2002) 研究了南京市空气中的 PM₁₀、PM_{2.5} 的污染水平, 指出各功能区的污染大小顺序为交通干道旁 > 商贸饮食区 > 南郊居民区。

根据环境空气质量标准 (GB3095-1996), 大气中 PM₁₀ 质量浓度的日平均值小于 0.05 mg·m⁻³ 为一级标准, 0.05~0.15 mg·m⁻³ 为二级标准,

0.15~0.25 mg·m⁻³ 为三级标准。从图 2 和表 1 可以看出, 在观测时段内, 就 PM₁₀ 浓度而论, 1 m、4 m、31~70 m 高度处空气质量达到了一级标准, 并且 1 m 和 48 m 处的 PM₁₀ 浓度最低, 环境空气质量为优; 7~28 m 处达到国家二级标准, 环境空气质量良好; 没有任何高度上的 PM₁₀ 质量浓度达到三级标准。需要指出的是, 虽然本研究的观测点位于西安东郊工业区, 但是由于夏季雨水多等天气条件都利于颗粒物的扩散和清除, 因此空气质量基本能达到良好, 本研究的测定时间较短, 要进行空气质量的准确、全面评价还需要逐日的监测, 以及对 SO₂ 和 NO_x 的监测。

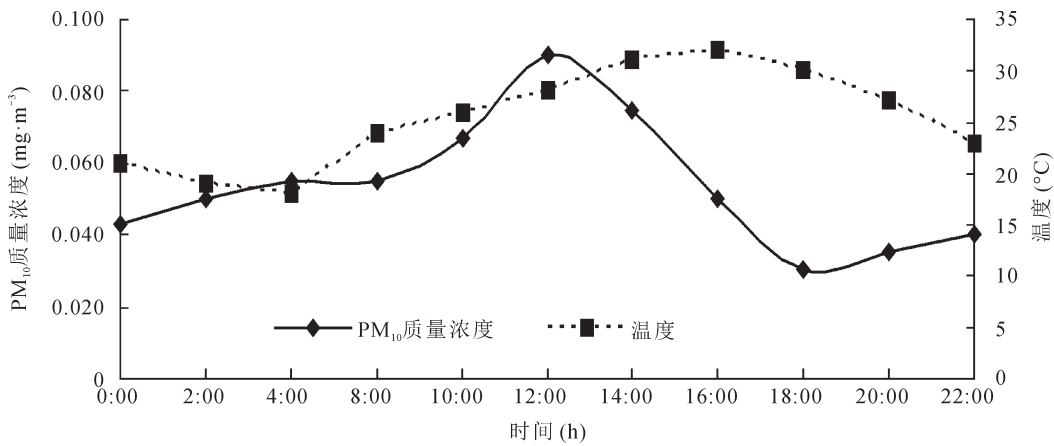


图 4 PM₁₀ 质量浓度随时间和温度的变化
Fig.4 Variation of PM₁₀ concentrations with times and temperature

表 1 6 月各个高度 PM₁₀ 质量浓度日均值 (mg·m⁻³)
Table 1 The average of PM₁₀ concentrations at different heights in June

高度 (m)	浓度	高度 (m)	浓度	高度 (m)	浓度	高度 (m)	浓度
1	0.020	19	0.058	37	0.037	55	0.032
4	0.043	22	0.056	40	0.034	58	0.038
7	0.053	25	0.053	43	0.030	61	0.042
10	0.055	28	0.050	46	0.028	64	0.047
13	0.053	31	0.039	49	0.023	67	0.040
16	0.053	34	0.040	52	0.030	70	0.043

4 结论

(1) 在 70 m 高度范围内, 研究区 6 月份 PM₁₀ 质量浓度在高度上的变化可分为 4 个层段。第 1 层段在 1 m 高度之下, 浓度最低, 平均为 0.027 mg·m⁻³。第 2 层段在 4~37 m, 浓度最高, 平均为 0.055 mg·m⁻³。第 3 层段在 40~55 m,

浓度较低, 平均为 0.038 mg·m⁻³。第 4 层段在 58~70 m, 浓度较高 (高于 40~55 m 浓度, 低于 4~37 m 浓度), 平均为 0.042 mg·m⁻³。研究区 6 月份 PM₁₀ 质量浓度在高度上的变化是先升高后减小再升高的变化规律。这与以往的认识有一定的不同, 原因主要是本实验在高度上和

时间上的观测较前人精细,分辨率高,能够识别出 PM_{10} 浓度在高度上的更多变化规律。

(2) PM_{10} 质量浓度昼夜变化特征可分为3个阶段,第1阶段在 8:00—16:00,浓度最高。第2阶段在 18:00—20:00,浓度最低。第3阶段在 22:00—6:00,浓度居中。昼夜变化另一特点是白天高(平均浓度为 $0.048 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),夜间低(平均浓度为 $0.040 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),昼夜变化呈现极不对称双峰型分布特征,即上午为大高峰,夜间为小高峰。这一变化规律受大气稳定度、污染源和温度等变化的影响。

(3) 观测期间气温与 7~31 m 高度范围内的 PM_{10} 质量浓度呈负相关。随着温度的升高, PM_{10} 浓度呈下降趋势,这是由于气温较高时有利于大气的垂直对流,能够加快颗粒物的扩散造成的。 PM_{10} 浓度与温度、高度的二元线性回归方程表明,在影响 PM_{10} 浓度的高度和温度因素中,温度对 PM_{10} 浓度的作用比高度大。

(4) 根据环境空气质量标准进行评价可知,研究区在监测时段内,1~70 m 的可吸入颗粒物浓度总体较低,空气质量良好,但要进行准确、全面的评价还需要逐日监测数据和 SO_2 及 NO_x 的监测数据。

参考文献

- 陈辉,胡非,任丽红,等. 2001. 北京冬季二氧化硫污染和气象条件的关系[J]. 气候与环境研究, 5(3): 287–298. [Chen H, Hu F, Ren L H, et al. 2001. Relationship between SO_2 air pollution and meteorological conditions in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 5(3): 287–298.]
- 董雪玲,刘大锰,袁杨森,等. 2005. 北京市 2005 年夏季大气颗粒物污染特征及影响因素[J]. 环境工程学报, 1(9): 100–104. [Dong X L, Liu D M, Yuan Y S, et al. 2005. Pollution characteristics and influencing factors of atmospheric particulates in Beijing during the summer of 2005 [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1(9): 100–104.]
- 韩素芹,李培彦,李向津,等. 2008. 天津市近地层 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直分布特征[J]. 生态环境, 17(3): 975–979. [Han S Q, Li P Y, Li X J, et al. 2008. Vertical distribution of the $\text{PM}_{2.5}$ at the ground layer in Tianjin [J]. *Ecology and Environment*, 17(3): 975–979.]
- 黄鹂鸣,王格慧,王芸,等. 2002. 南京市空气中颗粒物 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染水平[J]. 中国环境科学, 22(4): 334–337. [Huang L M, Wang G H, Wang H, et al. 2002. Pollution level of the airborne particulate matter (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) in Nanjing City [J]. *China Environmental Science*, 22(4): 334–337.]
- 孔春霞,郭胜利,汤莉莉. 2009. 南京市生活区夏秋季节大气颗粒物垂直分布特征[J]. 环境科学与管理, 34(11): 35–38. [Kong C X, Guo S L, Tang L L. 2009. Vertical distribution characteristics of atmospheric particles in summer and autumn in Nanjing [J]. *Environmental Science and Management*, 34(11): 35–38.]
- 李良玉,任爱玲,梁银英. 2007. 石家庄市颗粒物质量浓度及粒度随高度变化规律[J]. 环境科学与管理, 32(1): 61–64. [Li L Y, Ren A L, Liang Y Y. 2007. The vertical distribution of the quality density and particle size distribution of particles in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science and Management*, 32(1): 61–64.]
- 刘爱君,杜尧东,王惠英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 30(12): 68–71. [Liu A J, Du Y D, Wang H Y. 2004. Climatic characteristics of haze in Guangzhou [J]. *Meteorological Monthly*, 30(12): 68–71.]
- 刘大锰,马永胜,高少鹏,等. 2005. 北京市区春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素[J]. 现代地质, 19(4): 621–633. [Liu D M, Ma Y S, Gao S P, et al. 2005. The pollution level and affecting factors of atmospheric particulates from combustion during spring in Beijing City [J]. *Geoscience*, 19(4): 621–633.]
- 邵龙义,杨书申,时宗波,等. 2006. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究[M]. 北京:气象出版社. [Shao L Y, Yang S S, Shi Z B, et al. 2006. Physical and chemical characteristics and biological activity of particulate matter in urban atmosphere [M]. Beijing: Meteorological Press.]
- 孙玫玲,穆怀斌,吴丹朱,等. 2008. 天津城区秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直分布特征研究[J]. 气象, 34(10): 60–66. [Sun M L, Mu H B, Wu D Z, et al. 2008. Vertical distribution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in the atmosphere over Tianjin [J]. *Meteorological*

- Monthly, 34(10): 60–66.]
- 唐孝炎. 1991. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 164–166. [Tang X Y. 1991. Atmospheric environment chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 164–166.]
- 谢 鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 2010. 不同控制指标下的大气PM₁₀浓度对人群的健康影响[J]. 中国环境科学, 30(1): 25–29. [Xie P, Liu X Y, Liu Z R, et al. 2010. Impact on human health due to different PM₁₀ controlling targets in Pearl River Delta in 2006 [J]. *China Environmental Science*, 30(1): 25–29.]
- 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 2002. 北京PM_{2.5}浓度的变化特征及其与PM₁₀、TSP的关系[J]. 中国环境科学, 22(6): 506–510. [Yang F M, He K B, Ma Y L, et al. 2002. Variation characteristics of PM_{2.5} concentration and its relationship with PM₁₀ and TSP in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 22(6): 506–510.]
- 杨 龙, 贺克斌, 张 强, 等. 2006. 北京秋冬季近地层PM_{2.5}质量浓度垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 18(2): 23–28. [Yang L, He K B, Zhang Q, et al. 2006. Vertical distributive characters of PM_{2.5} at the ground layer in autumn and winter in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 18(2): 23–28.]
- 张继红, 徐盛荣, 赵淑敏. 2008. 逆温天气对大气污染的影响分析[J]. 黑龙江环境通报, 32(2): 24–25. [Zhang J H, Xu S R, Zhao S M. 2008. Analysis of effect of temperature inversion to atmosphere pollution [J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 32(2): 24–25.]
- 张月明, 颜中民, 于永清. 1996. 淮阴市大气污染物垂直分布规律探讨[J]. 环境监测管理与技术, 8(4): 37–40. [Zhang Y M, Yan Z M, Yu Y Q. 1996. Vertical distribution regularities of atmospheric pollutants in Huaiyin [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 8(4): 37–40.]
- Begum B A, Biswas S K, Hopke P K. 2006. Temporal variations and spatial distribution of ambient PM_{2.5}, PM₁₀ concentrations in Dhaka, Bangladesh [J]. *Science of the Total Environment*, 358: 36–45.
- Juneng L, Latif M T, Tangang F T, et al. 2009. Spatio-temporal characteristics of PM₁₀ concentration across Malaysia [J]. *Atmospheric Environment*, 43(30): 4584–4594.
- Krecl P, Ström J, Johansson C. 2008. Diurnal variation of atmospheric aerosol during the wood combustion season in Northern Sweden [J]. *Atmospheric Environment*, 42(18): 4113–4125.
- van der Wal J T, Janssen L H J M. 2000. Analysis of spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in the Netherlands using Kalman filtering [J]. *Atmospheric Environment*, 34(22): 3675–3687.
- Yi O, Hong Y C, Kim H. 2010. Seasonal effect of PM₁₀ concentrations on mortality and morbidity in Seoul Korea: A temperature-matched case-crossover analysis [J]. *Environmental Research*, 110(1): 89–95.