DOI:10.19789/j.1004-9398.2018.01.017

近地层大气颗粒物垂直分布特征*

——以北京某高校为例

田 欣[1] 赵文吉[2**] 崔梦莹[1] 金卫萱[1] 吴裕豪[1]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;
2. 首都师范大学资源环境与旅游学院,城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048)

摘 要

为了解多种气象因素对近地表 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的影响及对 $PM_{2.5}$ 垂直分布规律的影响,2014 年 9 月 1 日—5 日在首都师范大学本部和北一区的 3 个不同高度(5、20 和 30 m),得到 1 min 平均的 $PM_{2.5}$ 连续质量浓度数据(观测时间段为早 6:30—21:30),并对气象因素进行同步观测. 结果表明:(1) 近地表日平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度垂直分布规律明显,为随高度增加而减小. (2) 分时段分析 $PM_{2.5}$ 质量浓度可发现,在日出日落时分(早 6:30—10:00 和晚 19:00—21:30),受地表与上空空气温差影响,$PM_{2.5}$ 垂直分布无明显规律;10:00—19:00 期间 $PM_{2.5}$ 日平均值垂直分布规律为随高度增加而减小. (3) 气压突降和降水会影响并改变 $PM_{2.5}$ 垂直分布规律.

关键词: 近地层,大气颗粒物,垂直分布,气象因素.
中图分类号: K903

0 引 言

2003 年世界卫生组织(WHO)报告显示,全球因空气污染死亡人数约为 270 万人[1]. 近年来,持续的雾霾天已成为危害中国公民健康的最主要环境污染问题. 2013 年 1 月济南及北京市发生持续严重的雾霾空气污染事件,济南市当月门诊总量和呼吸系统疾病的就诊量均出现显著增加,北京市也出现超频死亡 85 例、儿童门诊增加 7 094 例,相关健康经济损失高达 4.89 亿美元[2-3]. 2016 年 12 月北京发生历年最严重的雾霾污染事件,各大医院呼吸道和心血管疾病患者比平日增加许多,道路能见度不足 50 m,多条高速路封闭,169 次飞机航班被迫取消,此次污染为市民日常生活造成巨大不便. 李根生和韩民春[4]对中国 2001—2010 年雾霾污染事件与城市居民医疗健康支出加以分析,数据显示雾霾污染显著增加了中国城市居民的医疗健康支出,对少儿和老年两个群体的健康指出影响显著,说明雾霾污染导致城市居民呼吸系统有关的疾病患者增加. 宋聃[5]发现当空气中雾霾含量过高时,植物不但起不到吸附的作用,反而会影响植物呼吸作用和光合作用,不利于植物生长. 由此可见,雾霾污染对人体健康、城市交通和生态环境都有严重危害,解决大气颗粒物超标问题迫在眉睫.

作为当前热点问题,国内外学者对大气颗粒物已有大量研究. 针对大气颗粒物垂直方向上的分布研究也有相关论文. Chan 等[6]以香港城区为例得出狭窄街区各粒径大气颗粒物浓度随高度(0 ~ 40 m)的增加均减小的结论. 邬玉龙等[7]在南昌市近地层 $PM_{2.5}$ 的分布及其无机元素组成分析中提到南昌市近地层 $PM_{2.5}$ 浓度的垂直分布具有季节性变化特征:夏季近地层 36 m 内 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布均匀,受高度影响不大;冬季近地层 36 m 内 $PM_{2.5}$ 受高度影响较大,随高度先升高后降低. 韩素芹等[8]利用天津市高度为 225 m 气象塔为观测平台测量了 $PM_{2.5}$ 质量浓度的季节性变化规律. Wu 等[9]以澳门为例得出 $PM_{2.5}$ 的颗粒物浓度均为随高度(0 ~ 228 m)的增加而减少,且主要来源为机动车尾气排放. 丁国安

收稿日期:2017-06-30
* 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20111108110004)
**通讯作者.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等[10]在对北京城区低层大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 垂直结构及其动力特征的研究中得出 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 粒子数浓度日变化呈双峰趋势,且均随高度(0~320 m)的增加而减少,但在静稳天气和污染严重天的沉降速度略有差异. 杨龙等[11]得出秋冬两季 $PM_{2.5}$ 浓度的垂直分布随高度(0~325 m)增加而呈对数递减的规律;且在逆温和非逆温两种条件下风速与 $PM_{2.5}$ 逐时质量浓度在垂直方向也呈线性和非线性关系. 潘鹄等[12]在对上海灰霾过程的研究中利用激光雷达技术探测地表到地表以上3 000 m 高空的灰霾情况,反演得到气溶胶消光系数.

国内关于大气污染物质量浓度垂直分布的观测研究一般集中在三个尺度: 一是借助城市建筑物对污染物进行梯度观测,观测高度一般在 40 m 以下; 二是借助城市高塔进行梯度观测,观测高度一般在 300 m 左右; 第三种就是借助激光雷达等设备进行观测,但该种观测高度一般在 500 或 1 000 m 以上,不能用于近地层污染物梯度变化特征研究. 本文选择研究近地表 40 m 以下的垂直分布规律并观测气象指标以便对 $PM_{2.5}$ 的垂直分布规律加以分析,且这一高度贴近学生日常生活; 通过分析 $PM_{2.5}$ 日平均质量浓度的垂直规律和每天分时段的垂直规律更全面的分析近地表 $PM_{2.5}$ 质量浓度的垂直分布规律.

1 研究区概况

采样地位于北京市海淀区西三环北路首都师范大学校本部和北一区(如图 1 所示),均为学生活动聚集场所. 校本部实验楼(39.93204°N, 116.30975°E)临近西三环主干道和玲珑路,早晚高峰时段尾气排放尤其严重,教学楼平均高度在 40 m 以下,周围污染源主要有施工工地的扬尘和机动车尾气,北一区文科楼(39.93608°N, 116.30673°E)离西三环主干道稍远,周围无施工地,无明显污染源.



图 1 采样点位置图

2 材料与方法

2.1 样品采集

本实验所用仪器为 Dylos air quality monitor DC 1700,该仪器为产自美国的轻便型激光颗粒物检测仪,可检测小到 0.5 μm 的颗粒,可相对准确的反应当地 $PM_{2.5}$ 的值. 仪器可同时检测并显示大于 0.5 μm和大于 2.5 μm 的颗粒物,各项污染物粒子数浓度值均为每 1 min 纪录 1 次数据.

本文在2014 年 9 月 1 日—5 日期间以首都师范大学校本部实验楼和首都师范大学北一区综合楼作为观测平台,在每栋楼高 5、20 和 30 m 处,空气流通的同侧窗口采样. 每天观测 15 个小时(6:30—21:30),每小时取一次平均值进行记录分析. 用衡欣 AZ8909 四合一气象仪同步测量温度、相对湿度、风速和气压,降水数据来自中国天气网的实时气象数据.

2.2 分析方法

采样时仪器记录了大量的数据,为便于对采样结果进行分析判断,本文将数据进行统计和误差校正等预处理.

2.2.1 算数平均法

为便于分析大量数据,本文采用算数平均法对大量观测数据进行处理. 算数平均法公式为:

$$\overline{X} = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \quad (1)$$

$\overline{X}$ 为总体平均值,n 为样本总数.

将观测仪的记录结果导出为 excel 表格,对每一天不同高度的观测数据取平均值,以该值作为当天此高度的粒子数浓度,便于对多天数据进行统计分析.

2.2.2 校正误差

为减小仪器本身误差,采用平均值法对误差进行校正. 每天同时对同一观测点的三台仪器进行取样校正.

校对方法如下: 每天进行 1 小时取样,导出数据. 将三台仪器所得数据求平均值,记为 X_a, X_b, X_c. 三台仪器总平均值为 $\overline{X}$.

$$\overline{X} = \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \quad (2)$$

分别求出每一台机器的差值比 m_i, 即得到每台仪器间的误差比例. 用每台仪器测得的数据以该台仪器的差值比进行校正就可减小仪器本身造成的误差.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$m_i = \frac{\bar{X} - X_i}{X_i} \times 100\% (i = a,b,c) \qquad (3)$$

3　近地层 $PM_{2.5}$ 垂直分布规律

3.1　气象数据

观测期间同步检测气象要素有助于分析 $PM_{2.5}$ 处置分布规律及变化的成因，5 日连续观测期间，1 日白天晴朗，下午晴转多云，傍晚有中到大雨持续到 2 日傍晚；3 日到 5 日晴朗，气温逐渐上升. 除2 日外，其余四天最低气温均出现在早上 6:31—7:30 时段，最高气温均出现在 13:31—15:30 时段；相对湿度最高值出现在早 6:31—7:30 或晚 20:31—21:30 时段，最低值出现在 13:31—15:30 时段；风速最大值出现时间不定，但最小值均出现在上午 6:31—9:30 时段，且风速从上午到下午呈现增加的趋势，在 12:31—17:30 期间风速较大，5 日平均风速在 5 天中最大，平均风速为 3.92 m/s，持续 6 小时风速超过 3.5 m/s；气压最大值一般出现在上午 10:00 之前，且又随时间变化而减小的趋势，1 日平均气压最高，5 日平均气压最低. 降水从 1 日 20:00 持续到 2 日下午 17:30，期间最大降水量在 2 日 13:31—15:30达到 7 mm.

表 1　9 月 1 日至 9 月 5 日各气象因素最大、最小值

	温度/℃			相对湿度/%			风速/m·s^{-1}			气压/Pa		
	最高值	最低值	平均值	最高值	最低值	平均值	最高值	最低值	平均值	最高值	最低值	平均值
9 月 1 日	27.3	22.0	24.9	92.5	62.5	73.5	3.5	0.9	2.3	1 010.0	1 007.0	1 008.4
9 月 2 日	20.0	19.0	19.9	100.0	81.8	94.3	3.6	1.3	2.3	1 008.0	1 006.0	1 006.5
9 月 3 日	30.0	18.2	26.3	81.8	20.8	43.5	5.7	1.6	3.4	1 008.0	1 003.0	1 005.3
9 月 4 日	30.0	20.0	26.4	98.3	43.3	61.0	5.2	1.0	3.1	1 008.9	1 005.0	1 006.5
9 月 5 日	32.9	19.2	27.1	83.3	33.3	47.2	6.1	0.5	3.9	100 3.0	1 000.0	1 001.0

3.2　$PM_{2.5}$ 日平均垂直分布规律

图 2 为校本部和北一区的 $PM_{2.5}$ 质量浓度随高度变化特征曲线图，可发现每日北一区数据都比在校本部相同高度的浓度低，这是由于北一区检测仪采集口朝向西，背对西三环主干道，且北一区文科楼附近无施工工地；而本部实验楼采样仪器朝向北，有玲珑路和西三环主干道双重污染源，且观测期间，校本部主楼正在施工，工地也可能成为污染源之一.

9 月 1 日两观测地不同高度的日平均值最大值均出现在离地表最近的 5 m 处，校本部和北一区最大值分别为 367.89、284.28 μg/m^3，空气质量为局部重污染. 随着高度的增加，20 m 处两地 $PM_{2.5}$ 日平均浓度衰减到最大值的 89% 和 99%；30 m 处两采样地 $PM_{2.5}$ 质量浓度分别衰减为最大值的 83% 和 89%，30 m 处两采样地浓度分别衰减到 20 m 处的 93% 和 89%.

9 月 2 日、3 日、4 日 $PM_{2.5}$ 浓度较低，日平均值最大不超过 100 μg/m^3，原因为受 1 日夜间到 2 日下午的降水影响，水分子对空气中的颗粒物有凝结作用，即降水对 $PM_{2.5}$ 有冲刷作用，使 2 日 $PM_{2.5}$ 质量浓度迅速降为 1 日的 20% 左右，空气质量变为良好，3 日和 4 日天气晴朗 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐渐回升. 但这 3 天 $PM_{2.5}$ 质量浓度日均值垂直分布仍遵循 5 m > 20 m > 30 m 的规律，校本部 2—4 日 5 m 处日均值分别为 77.05、35.16 和 61.87 μg/m^3，随高度增大 20 m 处浓度值分别衰减为最大值的 95%、96% 和 94%，30 m 处 $PM_{2.5}$ 浓度分别衰减为最大值的 82%、80% 和 85%；北一区 2—4 日 5 m 处日均值分别为 55.45、20.79 和 45.06 μg/m^3，随高度增大

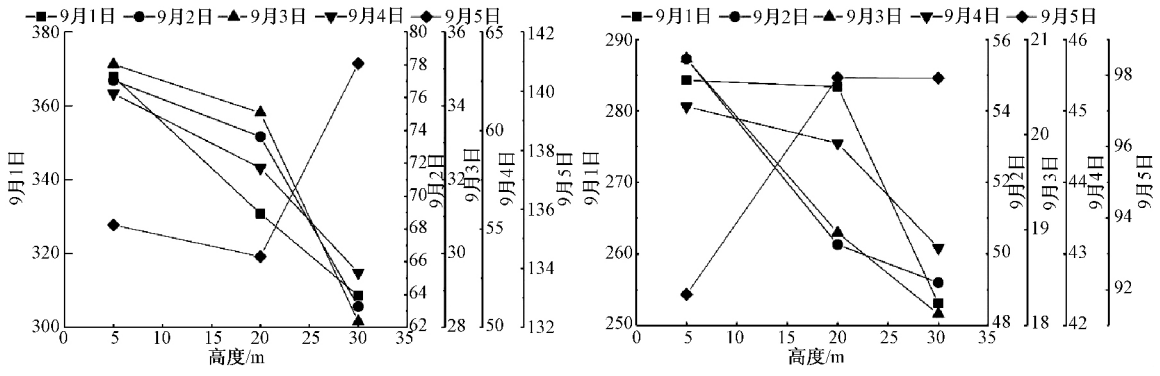


图 2　$PM_{2.5}$ 质量浓度随高度变化特征曲线

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

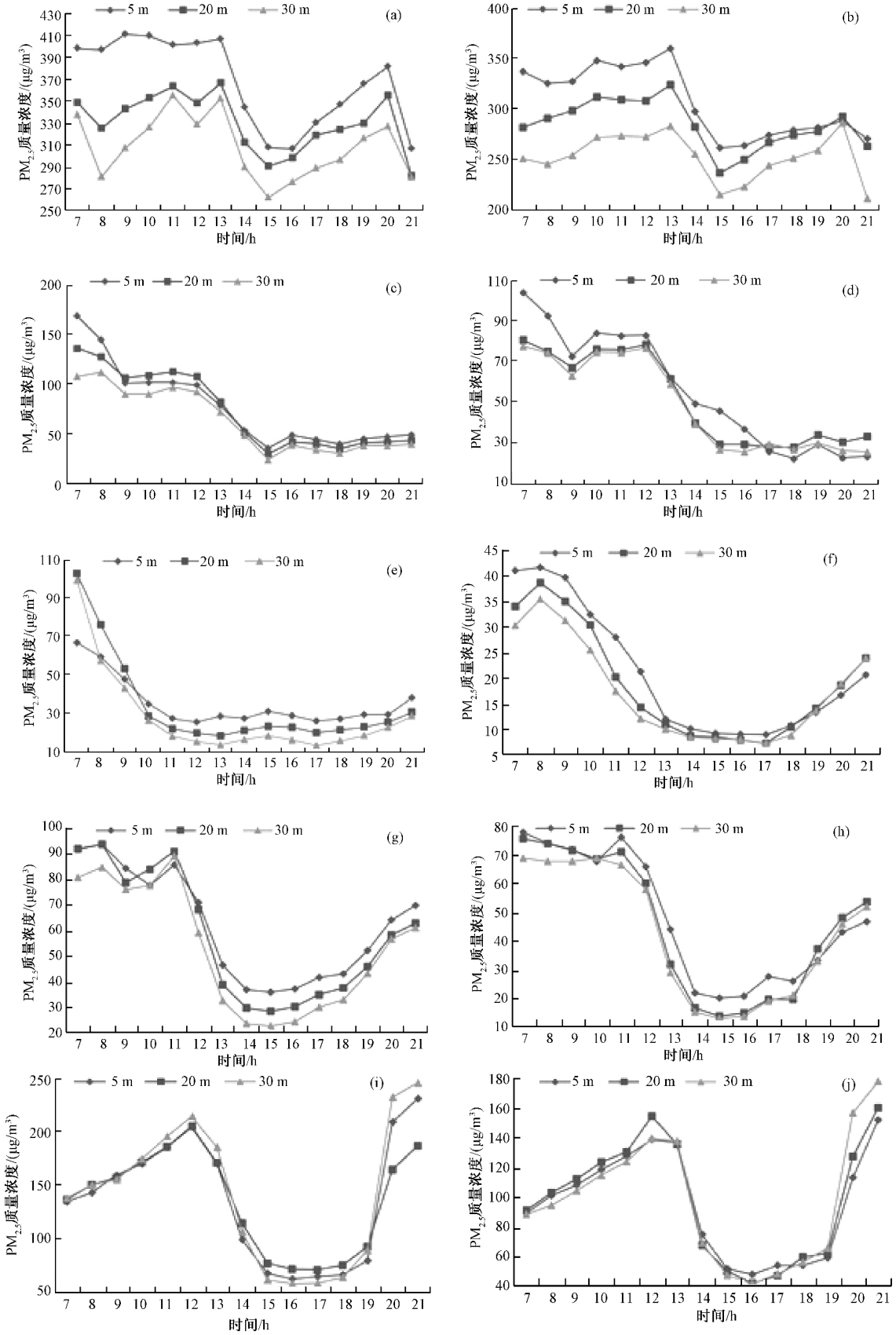


图 3　9 月 1 日—5 日 $PM_{2.5}$ 观测曲线图

(a) (c) (e) (g) (i) 为校本部 9 月 1 日—5 日 $PM_{2.5}$ 日变化图; (b) (d) (f) (h) (j) 为北一区 9 月 1 日—5 日 $PM_{2.5}$ 日变化图

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

20 m 处浓度值分别衰减为最大值的 90%、91% 和 98%,30 m 处浓度衰减为最大值的 88%、87% 和 95%. 可发现校本部和北一区观测点 2 日和 3 日各高度之间有一定的衰减梯度,而 4 日各高度之间的差值不大.

9 月 1 日—4 日均符合 $PM_{2.5}$质量浓度随高度增加而减小的规律,虽然观测高度在 40 m 以下且各层高度间距不大,但同样能体现出衰减规律.

从图 2 可看出 5 日数据无明显垂直分布规律,结合观测期气象因素(见表 1) 可知,4 日大气压强与 5 日大气压强有差值明显,气压骤降会影响大气运动,使 $PM_{2.5}$浓度垂直分布规律发生变化.

3.3　分时段的 $PM_{2.5}$垂直分布规律

图 3(a) ~(j) 分别表示了校本部实验楼和北一区文科楼日间每小时均值的统计结果,可以发现 $PM_{2.5}$日变化规律呈现双峰趋势,及早 9:00 左右和晚 19:00 左右出现峰值,且 9:00 左右峰值更为明显. 图 3 中可直观看出,大部分时段(10: 00—19:00) $PM_{2.5}$垂直分布规律为 5 m > 20 m > 30 m,即随高度增加而减小的趋势. 不同时段各高度之间差值不同,但因为观测时间较短,因此并未得出某时段差值最大或某时段差值最小的结论.

在 9 月 3 日、4 日早 10:00 前和 9 月 1 日、2 日、3 日、4 日晚 19:00 后,两观测地都出现 $PM_{2.5}$垂直分布规律不符合随高度增加而减小的趋势,这与太阳辐射强度和日出日落[12] 时间密切相关. 日出时(10:00 前) ,地面升温较空气快,地表和地表上空大气产生温差,近地表空气受热膨胀上升,与上层空气形成垂直湍流; 傍晚日落时(19:00 后) ,太阳辐射减弱,地面降温较近地表空气降温快,以同样原理形成垂直湍流. 日出日落期间,近地表空气垂直交换,3 个测量高度的 $PM_{2.5}$质量浓度垂直分布规律在早晚时段会发生变化.

2 日从凌晨至下午 16:00 左右有中到大雨,这对 $PM_{2.5}$垂直分布也有显著影响. 图 3(c) 从 9:00—16:00 期间,5 个小时 5 m 处 $PM_{2.5}$浓度都小于 20 m 处; 图 3(d) 在 13:00—14:00 期间也出现了短时的垂直分布不符合随高度增加而减小的规律,因此降水可使不同高度间 $PM_{2.5}$浓度差值减小,甚至改变 $PM_{2.5}$垂直分布规律.

综上所述,在一天中的不同时段,$PM_{2.5}$质量浓度垂直分布不全为随高度增加而减小,在日出日落时段其规律可能出现变化; 但从日平均值角度分析,$PM_{2.5}$质量浓度垂直分布规律仍为随高度增加而减小.

4　结　论

本文选取首都师范大学本部和北一区教学楼为观测平台测量大气颗粒物 $PM_{2.5}$质量浓度垂直分布规律,同步测量天气要素,探究 $PM_{2.5}$质量浓度垂直分布规律. 得到以下结论:

(1) 近地表(h < 40 m) $PM_{2.5}$日平均质量浓度垂直分布规律为 5 m > 20 m > 30 m,即随高度增加而减小. 虽观测尺度较小,各高度间质量浓度差距不大,但三个高度的数值也是呈梯度减少的.

(2) 分时段分析 $PM_{2.5}$质量浓度可发现,在 9 月 1 日、3 日和 4 日的早 10:00 前和晚 19:00 后,出现了 $PM_{2.5}$浓度垂直变化不符合上述规律的情况,这是由于日出和日落时分,地面温度变化速率与地表上空空气温度变化速率不同,从而产生温差,使地表上空局部空气湍流增大,导致 $PM_{2.5}$粒子随空气湍流垂直运动,改变垂直分布规律.

(3) 9 月 5 日受大气压强突降影响,近地表空气湍流发生变化,影响并改变了 $PM_{2.5}$垂直分布规律. 降水可减小不同高度之间的浓度差值,甚至改变 $PM_{2.5}$垂直分布规律.

参　考　文　献

[1] 顾赛菊. 雾霾污染的间接经济损失评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.

[2] 崔亮亮, 李新伟, 耿兴义, 等. 2013 年济南市大气 $PM_{2.5}$污染及雾霾事件对儿童门诊量影响的时间序列分析[J]. 环境与健康杂志,2015, 32(6): 489 - 493.

[3] 潘铭. 浅谈雾霾对人体健康的影响[J]. 微量元素与健康研究,2013, 30(5): 65 - 66.

[4] 李根生, 韩民春. 雾霾污染对城市居民健康支出的影响分析[J]. 中国卫生经济,2015(7): 74 - 76.

[5] 宋聃. 雾霾污染对生物多样性的影响[J]. 科技创新与应用,2014(17): 126.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] Chan L Y, Kwok W S. Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(26): 4403 – 4412.
[7] 邬玉龙. 南昌市近地层 $PM_{2.5}$ 的分布及其无机元素组成分析 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
[8] 韩素芹, 李培彦, 李向津, 等. 天津市近地层 $PM_{2.5}$ 的垂直分布特征 [J]. 生态环境, 2008, 17(3): 975 – 979.
[9] Wu Y, Hao J, Fu L, et al. Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(31): 4907 – 4918.
[10] 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. 2005, 35(z1): 31 – 44.
[11] 杨龙, 贺克斌, 张强, 等. 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. 2005, 18(2): 23 – 28.
[12] 潘鹄, 耿福海, 陈勇航, 等. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2164 – 2173.
[13] 赵金镯, 李丽, 钱春燕, 等. 上海市居民区大气细颗粒物污染水平及时空分布特征研究 [J]. 卫生研究, 2012(1): 35 – 39.
[14] 袁媛. 开封市近地层大气颗粒物垂直分布特征研究 [D]. 开封: 河南大学, 2010.
[15] 高文康, 贵谦, 姚青, 等. 天津重污染期间大气污染物浓度垂直分布特征 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(7): 731 – 738.

Vertical Distribution of $PM_{2.5}$ in Near Surface —a Case Study of an University in Beijing

Tian Xin[1] Zhao Wenji[2] Cui Mengying[1] Jin Weixuan[1] Wu Yuhao[1]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048; 2. Urban Environmental Process and Digital Modeling Laboratory, College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 10048)

Abstract

To study the impact of multiple meteorological factors on the variations of $PM_{2.5}$ mass concentration in near-surface and vertical distribution of $PM_{2.5}$, observation had been implemented at 3 different heights (5 m, 20 m, 30 m) daily from 6:30 to 21:30 between September 1st, 2014 to September 5th, 2014 in Capital Normal University. Average amount of continuous mass concentration perminute was acquired with synchronous observations of meteorological issues. The results indicated: (1) The daily average mass concentration of $PM_{2.5}$ featured an obvious vertical distribution regularity which decreased as altitude increased. (2) According to analyses on the mass concentration of $PM_{2.5}$ in different time periods, the vertical distribution of $PM_{2.5}$ showed no significant regularities during sunrise (6:30—10:00) and sunset (19:00—21:30) due to temperature difference between surface and air, while the vertical distribution of daily average $PM_{2.5}$ concentration from 10:00 to 19:00 decreased with height. (3) Sudden decreased pressure and precipitation would affect and alter the regularity in the vertical distribution of $PM_{2.5}$.

Key words: near surface, atmospheric particulate matter, vertical distribution, meteorological factors.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net