

降雨过程后北京城区 PM_{2.5} 日时空变化研究

郑晓霞¹, 赵文吉^{1*}, 晏星², 赵文慧³, 熊秋林¹

1. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048;
2. 香港理工大学 土地测量及地理资讯学系, 香港; 3. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048

摘要: 随着人类环境意识的增强, 人们对城市雾霾天气的忧虑与日俱增, PM_{2.5} 的时空变化和对人体健康的影响已成为关注的焦点。以往的研究多集中在不同季节或年际的变化, 本文通过统计环保局发布的位于北京城区 13 个逐时浓度监测点降雨前后 PM_{2.5} 质量浓度, 并在城区布设 14 个采样点昼夜连续监测一次降雨后 72 h 内 PM_{2.5} 质量浓度变化情况, 研究北京市城区降雨后 PM_{2.5} 日变化规律及空间分布特征, 由此分析降雨对 PM_{2.5} 日变化规律的影响。同时对比 PM_{2.5} 与同步气象数据(温度、相对湿度)和交通数据(车辆量、车速)最值频率分布情况, 进而对 PM_{2.5} 日变化特征进行成因分析。随后利用 GIS 空间分析方法, 分析了 PM_{2.5} 的日空间分布特征。结果表明, 降雨对颗粒物的去除作用明显, 一次降雨可使 PM_{2.5} 质量浓度平均下降 56.3%。雨后 72 h 内 PM_{2.5} 质量浓度均小于 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 降雨后 1 h 内 PM_{2.5} 质量浓度处于稳定状态, 在随后的 12 h 内 PM_{2.5} 浓度值都处于下降状态。降雨过程只降低 PM_{2.5} 的质量浓度值, 并不影响其日变化规律。PM_{2.5} 的日变化规律以 19 时为界, 表现出明显的昼夜差异。白天的变化规律呈现凹型, 夜间的变化规律呈现拱型。PM_{2.5} 质量浓度峰值多出现在 23 时或 0 时, 谷值多出现在下午 15 时, 该特征受气象因素影响较大, 受交通源的影响作用不明显。早高峰期间, PM_{2.5} 质量浓度变化主要受交通源的影响; 晚高峰期间, 交通源和气象因素共同影响 PM_{2.5} 质量浓度。研究区 PM_{2.5} 日空间分布特征同样存在明显的昼夜差异。白天 PM_{2.5} 空间分布特征为南部高北部低; PM_{2.5} 在夜间的空间分布特征则多表现为四周高、中心低, 三环外围区域多为高值区。

关键词: 降雨; PM_{2.5}; 时空变化; 空间分析

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2014) 05-0797-09

引用格式: 郑晓霞, 赵文吉, 晏星, 赵文慧, 熊秋林. 降雨过程后北京城区 PM_{2.5} 日时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 797-805.

ZHENG Xiaoxia, ZHAO Wenji, YAN Xing, ZHAO Wenhui, XIONG Qiulin. Spatial and temporal variation of PM_{2.5} in Beijing city after rain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(5): 797-805.

大气颗粒物的粒径范围在 0.1~100 μm 之间, 通常把大气中粒径在 2.5 μm 以下的颗粒物称为细颗粒物 (PM_{2.5})。PM_{2.5} 在大气中所占的比例虽不大, 但它对空气质量和大气能见度等有重要的影响(魏玉香等, 2009; 宋宇等, 2003)。此外, PM_{2.5} 粒径小, 富含大量有毒、有害物质且在大气中停留时间长、输送距离远, 可进入人体的下呼吸道, 沉积在肺部, 甚至穿过肺泡进入血液, 对人体健康有严重的危害(陈武等, 2012; 杨维等, 2013)。然而截至 2011 年底, 除美国和欧盟一些国家将 PM_{2.5} 纳入国标并进行强制性限制外, 世界上大部分国家尚未对 PM_{2.5} 开展监测。2013 年 1 月, 北京出现了 25 个严重雾霾日, PM_{2.5} 不仅是管理部门关注的焦点, 同时成为了社会关注的热点。因此, 加强对 PM_{2.5} 的监测和研究对于改善污染现状、提高全国空气质量具有重要意义。

国内外许多学者针对可吸入颗粒物的时空分布特性、与影响因子的相关性分析等方面进行了深入研究。Burton 等人于 1992、1993 年夏季在费城布设了 8 个监测点来监测 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度值, 并分析了两种颗粒物浓度间的关系以及各自的空间分布情况(Burton 等, 1996)。Gebhart 等通过对大弯曲国家公园几年间气溶胶数据进行建模, 研究分析了该地区阴霾的原因, 并分析了颗粒物在空间、时间上的分布情况(Gebhart 等, 2005)。王淑英等选用北京城郊 5 个监测站 2000 年可吸入颗粒物逐时浓度监测资料, 较为系统地统计分析了北京地区可吸入颗粒物的时空分布特征, 揭示了各监测站 PM₁₀ 污染年、日变化趋势(王淑英和张小玲, 2002)。张海霞等分析了邯郸市可吸入颗粒物在时间上的分布特征, 认为可吸入颗粒物平均浓度在采暖期明显大于非采暖期; 日变化规律表现为上午浓度最高,

基金项目: 国家青年科学基金项目 (41201404); 北京市自然科学基金项目 (8133051); 国家基础测绘基金项目 (2011A2001); 博士点基金项目 (20111102110004)

作者简介: 郑晓霞 (1989 年生), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 GIS 应用。E-mail: zhengxx115@163.com

收稿日期: 2014-02-17

夜间次之,下午浓度最低(张海霞等,2009)。赵文慧等利用地统计分析工具模拟北京市城区2008年夏季 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{3.0}$ 、 $PM_{5.0}$ 以及气象因子的空间分布,同时与气象因子进行典型相关性分析,发现可吸入颗粒物的污染范围主要集中在西南部,西北次之,城区中心污染程度相对较轻;确定相对湿度为城区可吸入颗粒物浓度的主要影响因子,其次为地表温度,影响最弱的为风速(赵文慧等,2009)。

关于可吸入颗粒物的时空变化特征,已有研究多侧重分析其浓度在月、季、年等时间尺度上的变化规律(宁海文和吴息,2005;于淑秋等,2002;Zhao等,2011;鲁兴和吴贤涛,2004;穆珍珍等,2011),涉及到空间分布的研究大都受到采样数据非实时同步的限制,未能准确反映同一时刻可吸入颗粒物的面状分布特征(赵文慧等,2012;赵文慧等,2010)。雨水对颗粒物的清除作用是非常明显的(胡敏等,2005),然而雨后,在颗粒物的恢复期内,其时空变化特征是否也如平常尚不明确。本研究分析了一次降雨结束后72 h内不同时段 $PM_{2.5}$ 的空间分布特征及日变化规律,以期对环境管理部门有针对性地治理大气污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市地处华北平原北部,三面环山,地势西北高耸,东南低缓,不利于大气颗粒物的扩散。气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨。北京市城区的路网结构以矩形环状为主,道路多与经纬线平行网状分布,先后依托城市扩展,建设了二、三、四、五和六环路。2009年机动车持有量已超过400万辆。2011年可吸入颗粒物年均浓度值超过国家二级标准14%。北京正面临着十分严重的大气环境污染问题。

1.2 数据来源及采样点分布

本研究采用的数据主要包括以下两个方面。

(1)北京市环境保护监测中心每日实时发布的空气质量数据。本研究选用该监测中心布设在城区13个监测站(东城东四、东城天坛、西城官园、西城万寿西宫、朝阳奥体中心、朝阳农展馆、海淀万柳、丰台花园、永定门内大街、西直门北大街、东四环北路、南三环西路、前门东大街)于2013年5月1日至2013年9月31日共5个月发布的 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度数据($\mu g \cdot m^{-3}$),以及2013年7月2日至5日的 $PM_{2.5}$ 每日实时质量浓度数据,监测站分布情况如图1所示。

(2)采用产自美国的激光颗粒物检测仪昼夜连续监测 $PM_{2.5}$ 数量浓度(particles per cubic feet)。采样点设置在北京城区二、三、四环路附近,依次为

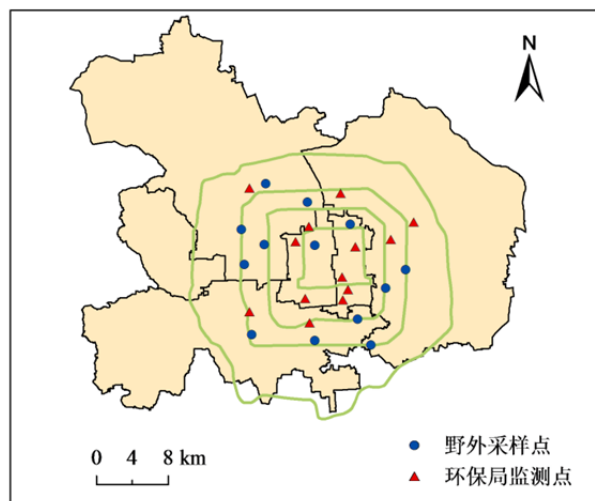


图1 站点分布示意图

Fig.1 Location of air quality monitoring stations

五棵松棒球场、丰铁文化馆、公益西桥、肖村桥西、刘家窑桥东、北人大酒店、四惠停车场、北京大学西门、北京电影学院、三利大厦、平安里地铁、四季青桥北、首都师范大学北门、海淀万柳等,共计14个采样点。采样点分布情况如图1。采样点位置的选择主要考虑采样点分布的均匀性、规律性、广泛性等特征。其中位于海淀万柳的采样点用于同环境保护监测中心在此处监测点进行对比分析,尽可能减少不同仪器设备或者不同配置导致分析结果产生的误差。其余13个采样点将结合数据(1)进行空间插值,实现利用离散点数据反应北京城区四环内 $PM_{2.5}$ 的空间分布情况。其有效采样时长为72 h(2013年7月2日9时~7月5日8时)。采样前对所用仪器进行校正和比对,以确保实验的准确性和可比性。

(3)收集北京市2013年7月2日9时至7月5日8时实时气象因子(气温、相对湿度)数据,气象数据主要来源于北京市气象科学数据共享服务网(<http://cdc.bjmb.gov.cn>)。车流量是研究期内每小时经过某通道所有出租车的数量;速度结果来自浮动车系统,通过对某条道路上所有出租车在一个时段内(1 h)的速度加权平均计算得到。

1.3 研究方法

1.3.1 数据预处理

(1)激光颗粒物检测仪的监测频率为每分钟1组数据,每小时60组数据。本文进行研究分析的时间尺度为小时,因此需对监测数据进行逐时均值处理。为更准确反映 $PM_{2.5}$ 时平均颗粒数量,本研究首先计算每小时内60组 $PM_{2.5}$ 颗粒数量的四分位数,再计算所有大于四分之一位数且小于四分之三

位数的所有数的算术平均值, 并将该算术平均值作为所求的时平均颗粒数量。

(2) 激光颗粒物检测仪获得的数据是颗粒物的颗粒数量, 北京市环境保护监测中心每日实时发布的空气质量数据为颗粒物的质量浓度。为统一两类数据量纲, 且做到与通行标准保持一致, 本研究对利用激光颗粒物检测仪获得的数据进行单位转换, 即将颗粒数量转换为质量浓度。本研究将颗粒数量转换为质量浓度的过程看作计算单位体积中一定数量的大小不同的等效球体的质量。设这些颗粒为球形且平均密度为 ρ , 若已知单位体积内直径为 D_i 的颗粒有 $s(D_i)$ 个, 则等效球形颗粒物的质量浓度可以表示为

$$C = \frac{\pi}{6} \rho \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} s(D_i) D_i^3 dD_i \quad (1)$$

式中 D_{\min} 和 D_{\max} 分别是等效球形颗粒物的最小和最大直径(仪器测量的粒径范围为 0.5~2.5 μm), C 即为所求每立方英尺体积内 PM_{2.5} 的质量浓度(顾芳等, 2008)。

(3) 通过分析激光颗粒物检测仪获得的海淀万柳采样点 PM_{2.5} 的质量浓度 (X) 与北京市环境保护监测中心实时公布的海淀万柳监测点 PM_{2.5} 的质量浓度 (Y) 发现, 两者具有良好的线性关系, 拟合曲线为 $Y=0.531X+14.43$, $R^2=0.86$ 。因此将其余 13 个野外采样点的 PM_{2.5} 浓度数据按上式进行转换, 结果用于对北京市环境保护监测中心的 13 个监测点进行空间插值分析。

1.3.2 空间分析

空间分析是 GIS 的核心和区别于其他信息系统的本质所在, 克里金法是基于包含自相关统计模型的插值方法, 它不仅可以预测表面, 而且能够对预测结果的确定性或准确性提供某种度量(牟乃夏等, 2012^{P341-343})。在 GIS 提供的空间插值方法中, 克里金法以变异函数理论和结构分析为基础, 在数学上被证明是空间分布数据最好(统计最优)的线性无偏估计技术(Stytz 等, 1993)。克里金估计值是以变异函数为工具, 根据待估计点周围的若干已知信息, 确定已知点的参数对待估计点的加权值的大小, 然后对待估计点做出最优、无偏的估计。可通过下式求得未知量

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中, $Z(x)$ 表示未知样点的值, $Z(x_i)$ 表示未知样点周围已知样本点的值, N 为已知样本点的个数,

λ_i 为第 i 个样本点的权重。克里金法在赋权重时, 不仅考虑已知样本点与未知样本点的距离远近, 还考虑到已知样本点的空间分布及与未知样点的空间方位关系(牟乃夏等, 2012^{P520-529})。故本研究采用克里金法进行插值, 利用散点数据来估算整个北京城区 PM_{2.5} 的空间分布情况。通过执行交叉验证确定半变异模型的质量, 各项误差指标参数表明球状模型可使可吸入颗粒物浓度半方差函数模型较好拟合。

2 结果与分析

2.1 降雨对 PM_{2.5} 的清除作用

降水对大气颗粒物不同组分的去除效果虽略有不同, 但总体上对颗粒物的去除作用显著(胡敏等, 2005)。Amato 等通过研究降雨对道路降尘的影响作用发现, 欧洲南部及中部地区可吸入颗粒物的日均质量浓度值几乎是恒定的, 然而降雨却可以使颗粒物质量浓度急剧下降, 甚至可以降至零值; 雨后, 颗粒物质量浓度以指数形式增长, 直到再次达到最大值, 此时颗粒物的生成过程和沉降过程达到一个平衡值(Amato 等, 2012)。

本研究统计了海淀万柳站点于 2013 年 5~9 月(共计 5 个月)11 次降雨过程前后 PM_{2.5} 的日均质量

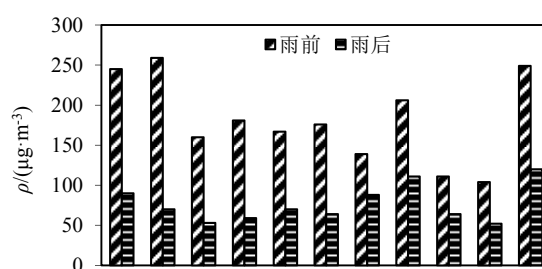


图2 降雨前后 PM_{2.5} 质量浓度值对比图

Fig.2 PM_{2.5} average mass concentration before and after rain

浓度值, 如图 2 所示。结果发现, 一次降雨过程后, PM_{2.5} 质量浓度平均下降 56.3%, 最大可下降 73%, 最小也可达到 36.7%。

同时本研究监测了降雨结束后 PM_{2.5} 质量浓度在连续 72 h(2013 年 7 月 2 日 9 时~7 月 5 日 8 时) 内的逐时变化情况(如图 3)。由变化曲线可以看出, PM_{2.5} 质量浓度值在降雨后 1 h 内处于稳定状态, 在随后的 12 h 内都处于下降状态, 之后随着其他因素影响作用比例的增加, PM_{2.5} 质量浓度呈波动状态变化。而且 PM_{2.5} 质量浓度在雨后 72 h 内均低于 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 24 h 平均质量浓度值依次为 24.64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、37.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、24.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 依次低于国家二级标准 67.1%、49.5%和 67.8%, 并分别低于国家一级标准 29.6%, 高于国家一级标准 8.2%和低于国家一级标

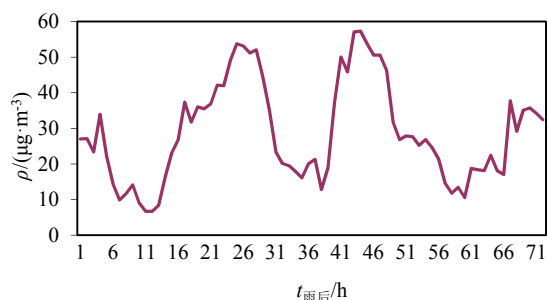
图3 雨后72 h PM_{2.5}质量浓度值变化情况

Fig.3 Temporal variation of PM_{2.5} mess concentration in 72 hours after rain

准 30.9%。(根据《环境空气质量标准》(GB3095—2012)规定, PM_{2.5} 日平均质量浓度限值一级为 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 二级为 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

由以上两个方面可以看出降雨过程对颗粒物的去除确实有明显的效果。

2.2 降雨后 PM_{2.5} 日变化规律

2.2.1 特征分析

根据各监测点 PM_{2.5} 的实时质量浓度数据可得到研究区域的日变化曲线,如图4所示。整体来看, 9-19时 PM_{2.5} 变化规律呈现凹型, 20时至次日8时 PM_{2.5} 变化规律呈现拱型; 且夜间浓度总体高于白天浓度。该结果与王淑英等、穆珍珍等、赵德山等(王淑英和张小玲, 2002; 穆珍珍等, 2011; 赵德山和王明星, 1991)针对非极端气候条件下 PM_{2.5} 日变

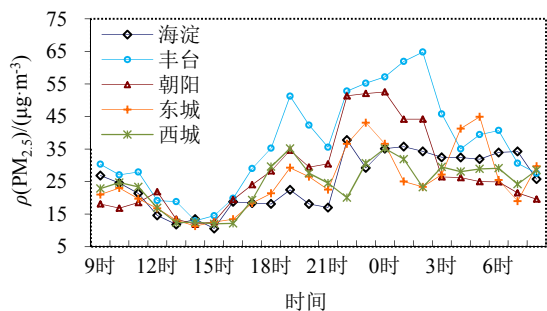
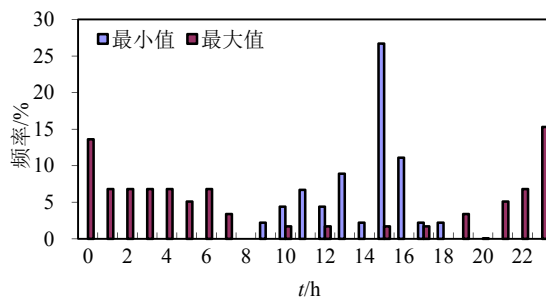
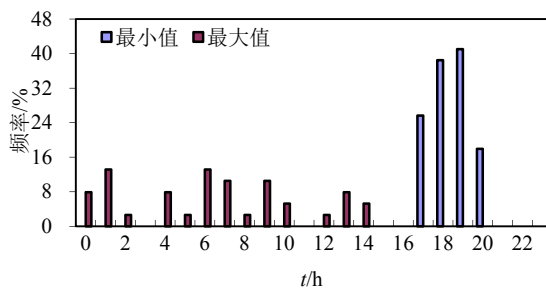
图4 PM_{2.5}平均质量浓度日变化情况

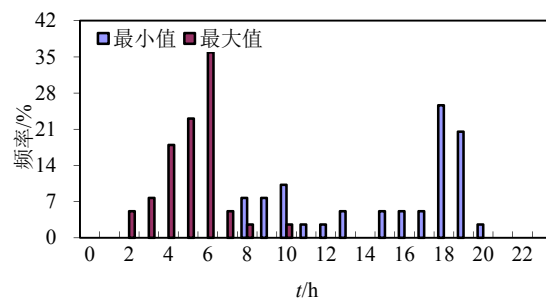
Fig.4 Temporal variation of PM_{2.5} average mess concentration

化规律的研究结果相一致。该结果说明降雨对颗粒物的清除作用显著, 但并没有对颗粒物的日变化规律产生明显影响。

同时, 本研究对研究期内每日 PM_{2.5} 质量浓度最大值及最小值出现的时间进行了统计, 结果如图5(a)所示。一天内 PM_{2.5} 质量浓度最大值出现的时间段主要以夜间和车流量早晚高峰期为主, 最多则出现在23时或0时, 其出现频率依次为15.3%和13.6%。一天内 PM_{2.5} 质量浓度最小值出现的时间段主要集

(a) PM_{2.5}

(b) 车流量



(c) 车速

图5 最大值和最小值频率分布

Fig.5 Frequency distribution of the maximum and minimum

中在上午9时至下午16时, 其中出现在下午15时的频率最大, 可达26.7%; 出现在16时的频率为11.1%, 居第二位。

2.2.2 原因分析

汽车尾气及交通道路尘为北京市交通干线周围大气颗粒物污染主要污染源之一, 其贡献率为28.084%, 占第二位(杨仪方等, 2010)。因此本研究同时统计了车流量最大值、最小值出现的时间, 结果如图5(b)所示。最小车流量主要出现在下午17时至晚上20时, 其中出现在19时的频率最大, 可达41%, 其次是出现在18时, 可达38.5%。最大车流量不同程度的分布在0时至14时。在15、16时, 21-23时这几个时间段车流量既未出现最大值也未出现最小值。对车速数据也做同样处理, 对比图5(c)可知, 18、19时同样为最小车速高频率分布的时间段, 其频率依次为25.6%和20.5%。最大车速主要

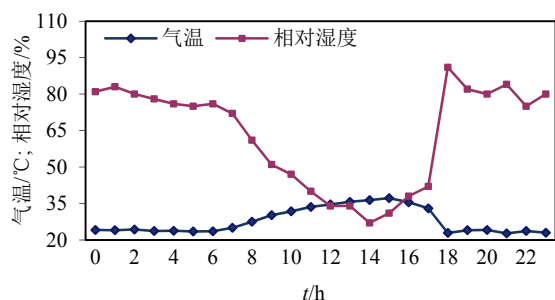


图6 气象因子平均时变化

Fig.6 Diurnal variation of meteorological factors

出现在 2-10 时,其中以出现在早晨 6 时次数最多,出现频率可达 35.9%。21 时至夜间 1 时,车速既未出现最大值也未出现最小值。

当气象条件发生变化时,同一污染源所造成的污染物浓度可相差几十倍乃至几百倍(武辉等, 2002)。本研究制作了研究区在研究期内平均温度和平均相对湿度的日变化曲线图,如图 6。气温在 16 时达到最高值;在 1-7 时和 19-24 时,气温明显较一天中其他时间段低。相对湿度的变化情况则恰好相反。在 15 时达到最低值;在 1-7 时和 19-24 时,相对湿度明显高于一天中其他时间段。

已有研究(赵文慧等, 2009)表明颗粒物浓度与气温呈显著负相关,颗粒物浓度与相对湿度呈正相关。因此认为 PM_{2.5} 质量浓度在下午 15 时出现谷值的原因是此时温度达到一天最高,相对湿度达到一天最低,此时气象因子有利于污染物的扩散、迁移和输送稀释。在夜间 23 时或 0 时,PM_{2.5} 质量浓度出现峰值也是因为此时的温度和相对湿度等气象因子起重要作用。

罗娜娜等对 PM_{2.5} 进行一元最佳子集分析,结果表明,温度、湿度的影响除外,车流量、车速对 PM_{2.5} 的影响分别排在二、三元最佳结果首位(罗娜娜等, 2013)。上午 6-8 时是上班高峰期,此时车流量及车速出现最大值的频率较大;然而温度、相对湿度条件没有明显变化,因此认为此时 PM_{2.5} 质量浓度变化主要受交通源的影响。秦孔建等研究发现,汽车在加速条件下排放的 PM 粒子数相对于匀速条件下激增 5~6 倍,质量排放激增 10 倍以上(秦孔建等, 2010)。下午 18-20 时车流量和车速最小值出现的频率较大,此时处于下班高峰期,汽车多处于高速、加速状态,因此考虑 PM_{2.5} 质量浓度升高是受到交通源的影响;同时,对比图 6 可知,温度、相对湿度从 18 时开始发生明显变化,气象因子对 PM_{2.5} 质量浓度变化也有一定的影响。

2.3 降雨后 PM_{2.5} 空间分布特征

利用 Arcgis10 软件普通克里金法对 PM_{2.5} 时平

均质量浓度数据进行空间插值,实现利用离散点数据大致反应北京四环内区域 PM_{2.5} 的日空间分布情况。由于在讨论 PM_{2.5} 日变化规律中发现 PM_{2.5} 质量浓度在夜间明显高于白天,因此,在本章节也分为昼、夜两个时段进行分析。为了更好的反应 PM_{2.5} 的空间分布特征,本研究将空间插值结果进行分类渲染。结果如图 7、8 所示。

本研究选择 4 个具有代表性的时间段(9 时、10 时、13-14 时、18 时)来分析白天 PM_{2.5} 空间分布特征。整体来看,研究区在 13-14 时的 PM_{2.5} 质量浓度明显低于其他时间段,白天 PM_{2.5} 空间分布特征的变化情况可以定性的反应出 PM_{2.5} 质量浓度凹形分布的变化规律。

7 月 2 日 9 时,PM_{2.5} 质量浓度高值区主要分布在研究区南部,而南二环以北的大部分研究区均为 PM_{2.5} 质量浓度低值区;10 时,PM_{2.5} 质量浓度低值区向西南、东南角延伸,呈现外包趋势,使得 PM_{2.5} 质量浓度高值区逐渐向南部中心区域集中,高值区所占面积呈缩小趋势;13-14 时,研究区的 PM_{2.5} 质量浓度整体降低,高值区主要分布在东二环、东三环、南二环、南三环等环路附近,整体呈现东南部高西北部低的特征;18 时,研究区的 PM_{2.5} 质量浓度整体显著升高,且高值区几乎为以三环路为依托的环状分布,其中南三环附近地区 PM_{2.5} 质量浓度最高。

7 月 3 日 9 时,PM_{2.5} 质量浓度高值区主要分布研究区域的西部,而二环以内及东部区域均为 PM_{2.5} 质量浓度低值区;10 时,PM_{2.5} 质量浓度低值区逐渐向研究区西部扩散,只有城区西南角部分区域仍为高值区,低值区在发生扩散迁移过程的同时 PM_{2.5} 质量浓度显著下降,且东部及北部部分地区质量浓度达到最低;13-14 时,PM_{2.5} 进一步扩散,质量浓度持续下降,西南角部分地区 PM_{2.5} 质量浓度仍较高;18 时,除研究区北部以环路为依托的条带区域 PM_{2.5} 质量浓度仍较低以外,其余大部分区域的 PM_{2.5} 质量浓度发生明显回升,南二环以南地区 PM_{2.5} 质量浓度达到最高值。

7 月 4 日 9 时,PM_{2.5} 质量浓度高值区主要分布在西三环附近及西部部分区域和南三环以南部分区域,研究区大部分区域 PM_{2.5} 质量浓度较低;10 时,研究区东部 PM_{2.5} 质量浓度开始出现降低趋势;13-14 时,研究区的大部分区域的 PM_{2.5} 质量浓度都较其他时间段低;18 时,研究区南部的 PM_{2.5} 质量浓度显著升高,高值区主要分布在东、南三环附近。

对比发现,虽然不同观察日在同一时刻的 PM_{2.5} 质量浓度值不同,但是研究区南部的 PM_{2.5} 质量浓度总体高于北部,其高、低值分布区域大致相同,

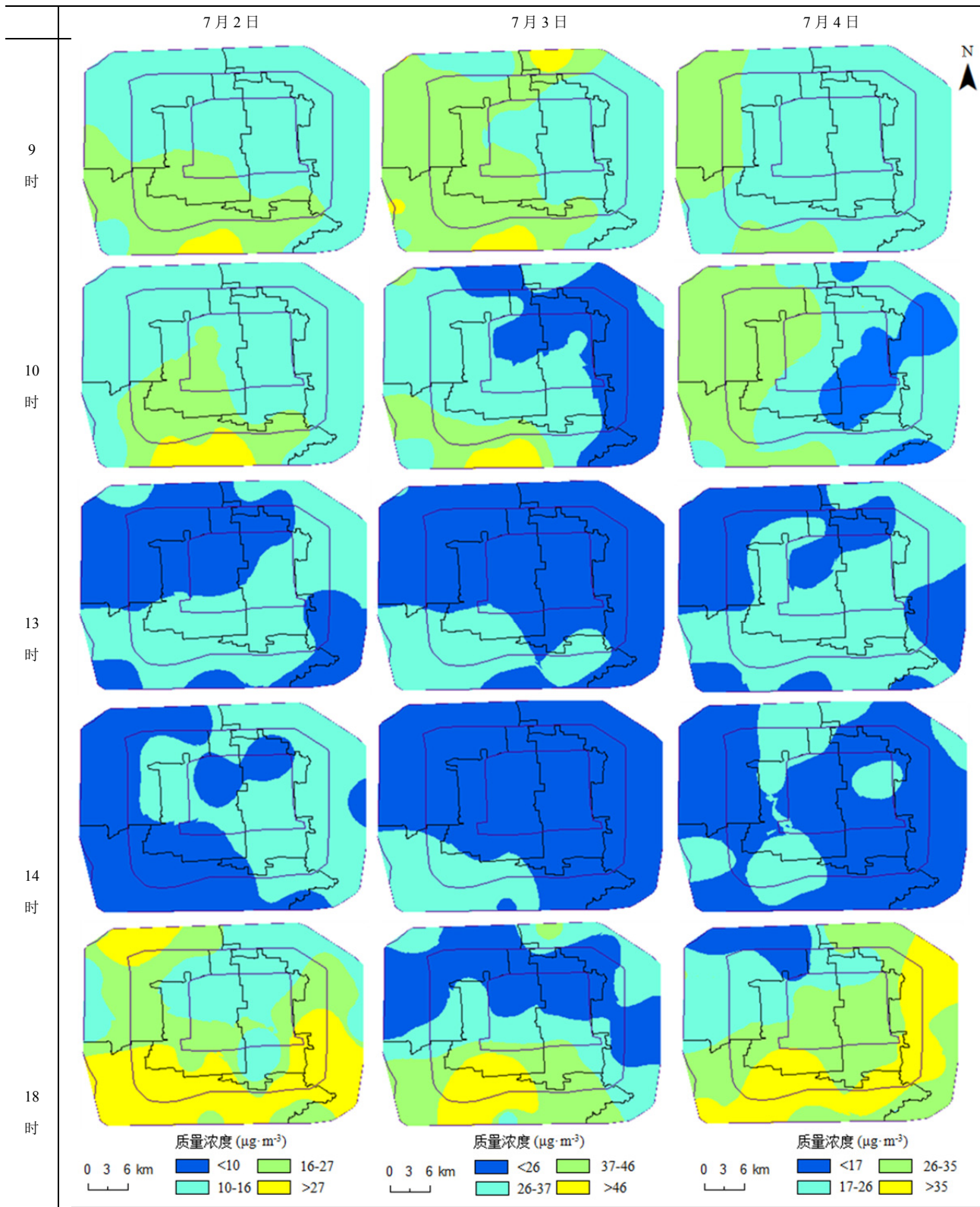


图 7 白天 $PM_{2.5}$ 空间分布特征
Fig. 7 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ in the day time

分布特征表现较为一致,不同时间段 $PM_{2.5}$ 空间分布特征表现为南高北低。
本研究同样选择 4 个具有代表性的时间段 (19 时、23 时、2 时、4 时) 来分析夜间 $PM_{2.5}$ 空间分

布特征。7 月 2-4 日三天 $PM_{2.5}$ 质量浓度在 19 时的空间分布总体表现为南北部高、中部区域低的特征,7 月 2 日 19 时 $PM_{2.5}$ 质量浓度高值区主要分布在西、南三环附近的条带状区域,7 月 4 日 19 时 $PM_{2.5}$ 质

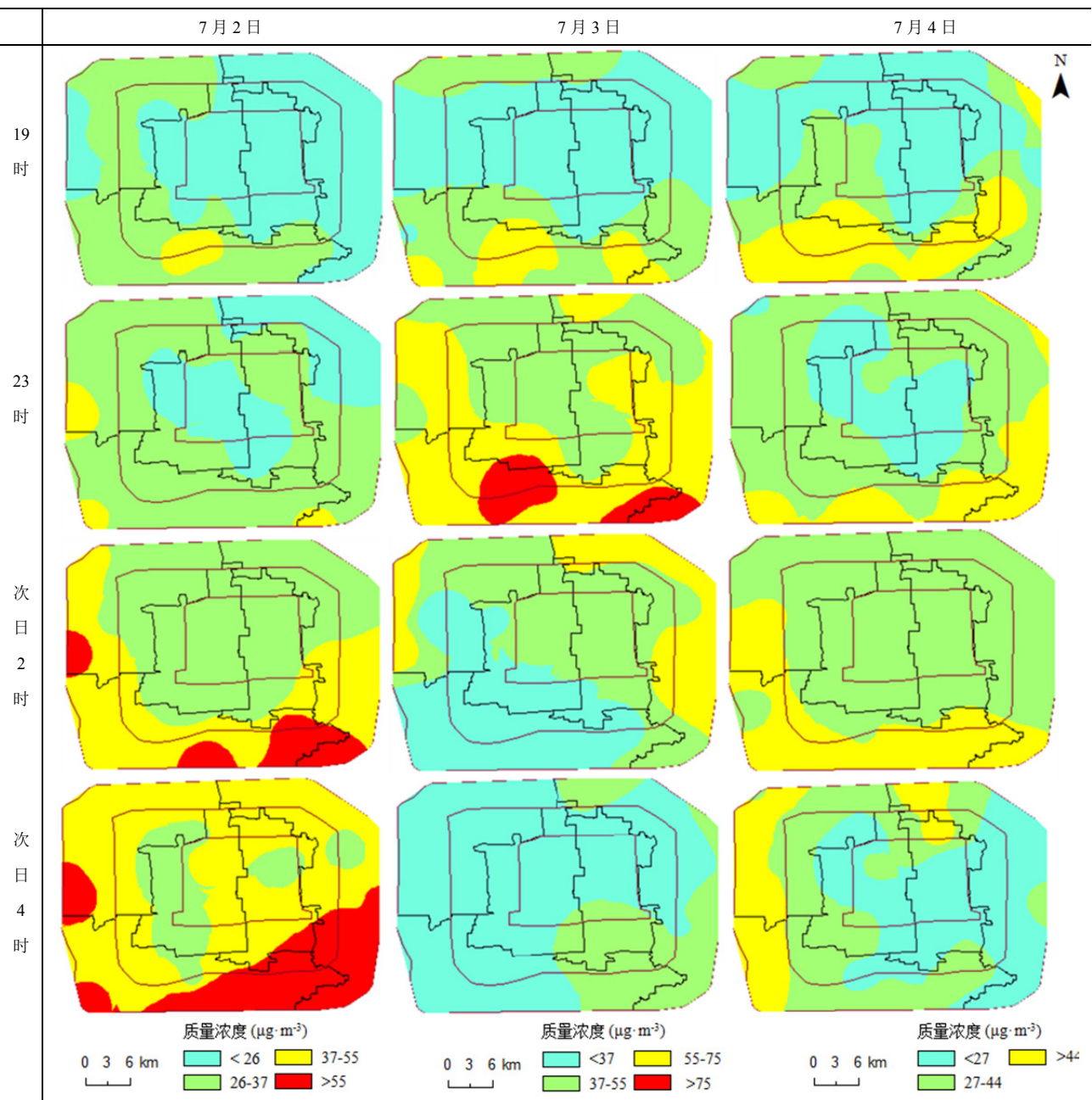


图8 夜间 PM_{2.5} 空间分布特征
Fig.8 Spatial distribution of PM_{2.5} at night

量浓度高值区范围要较其他观察日的广，涵盖了研究区中部的部分区域。7月2-4日 PM_{2.5} 质量浓度在23时的空间分布均表现为四周高、中心低的特征，7月3日23时研究区 PM_{2.5} 质量浓度整体高于其他两个观察日。7月3日2时、4时，研究区的 PM_{2.5} 质量浓度整体显著升高，空间分布仍表现为四周高、中心低的特征。7月4日2时、4时，研究区的 PM_{2.5} 质量浓度开始逐渐降低，空间分布特征表现为东高西低。7月5日2时研究区的 PM_{2.5} 质量浓度整体升高，高值区分布在西南三环外围；4时，研究区的 PM_{2.5} 质量浓度开始不同程度的下降，以东部地

区最为显著。综合来看，PM_{2.5} 在夜间的空间分布特征多表现为四周高、中心低的特征，三环外围区域多为高值区。

总体而言，PM_{2.5} 空间分布特征的变化情况可以定性的反应出 PM_{2.5} 日变化规律。虽然不同观察日在同一时刻的 PM_{2.5} 质量浓度值不同，但是 PM_{2.5} 质量浓度高低值的分布情况表现较为一致。北京市四环内区域 PM_{2.5} 空间分布特征在白天表现为南高北低，在夜间表现为四周高、中心低。

3 结论

降雨对颗粒物的去除作用是明显的，降水作用

只是降低了颗粒物的浓度值,并没有改变颗粒物浓度的日变化规律。通过统计监测点逐时 $PM_{2.5}$ 质量浓度资料,发现研究区内 $PM_{2.5}$ 夜间质量浓度总体高于白天。 $PM_{2.5}$ 日变化规律以 19 时为界,9-19 时 $PM_{2.5}$ 变化规律呈凹型分布,20 时至次日 8 时 $PM_{2.5}$ 变化规律呈拱型分布。

$PM_{2.5}$ 质量浓度峰值一般出现在夜间 23 时或 0 时,此时的温度和相对湿度等气象因子起重要作用,交通源对 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的影响不明显。谷值一般出现在下午 15 时,出现谷值的原因是此时温度最高,相对湿度最低。上午 6-8 时 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化受交通源影响较大,下午 18-20 时 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化受交通源和气象因子二者共同作用。

利用普通克里金法对 $PM_{2.5}$ 时平均质量浓度数据进行空间插值,实现了离散点数据反应研究区 $PM_{2.5}$ 的日空间分布情况。虽然不同观察日在同一时刻的 $PM_{2.5}$ 质量浓度值不同,但是 $PM_{2.5}$ 质量浓度高低值的分布情况表现较为一致。白天研究区南部的 $PM_{2.5}$ 质量浓度总体高于北部,其高、低值分布区域与 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布情况大致相同,不同时间段 $PM_{2.5}$ 空间分布特征表现为南高北低。 $PM_{2.5}$ 在夜间的空间分布特征多表现为四周高、中心低的特征,三环外围区域多为高值区。

参考文献:

- AMATO F, SCHAAP M, PANDOLFI M, et al. 2012. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads[J]. *Atmospheric Environment*, 62: 352-358.
- BRUTON R M, SUH H H, KOUTRAKIS P, et al. 1996. Spatial variation in particulate concentration within metropolitan Philadelphia[J]. *Environmental Science and Technology*, 30(2): 400-407.
- GEBHART K A, MALM W C, ASHBAUGH L L, et al. 2005. Spatial, temporal, and interspecies patterns in fine particulate matter in Texas[J]. *Journal of The Air and Waste Management Association*, 55(11): 1636-1648.
- STYTZ M R, PARROTT R W. 1993. Using kriging for 3d medical imaging[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 17(6): 421-442.
- ZHAO W C, CHENG J P, GUO M X, et al. 2011. Ambient Air Particulate Matter in the Yangtze River Delta Region, China: Spatial, Annual, and Seasonal Variations and Health Risks[J]. *Environmental Engineering Science*, 28(11): 795-802.
- 陈武, 董发勤, 邓跃全, 等. 2012. 银川市城郊 $PM_{2.5}$ 质量浓度日变化规律与组成特性分析[J]. *矿物学报*, 增刊: 131-132.
- 顾芳, 杨娟, 王春勇, 等. 2008. 基于等效球形颗粒数的颗粒物的质量浓度算法[J]. *光电子·激光*, 19(1): 87-91.
- 胡敏, 张静, 吴志军. 2005. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用[J]. *中国科技(B 辑化学)*, 35(2): 169-176.
- 鲁兴, 吴贤涛. 2004. 北京市采暖期大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化分析[J]. *焦作工学院学报*, 23(6): 487-490.
- 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 等. 2013. 交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究[J]. *环境科学*, 4(10): 741-748.
- 牟乃夏, 刘文宝, 王海银, 等. 2012. Arcgis10 地理信息系统教程[M]. 北京: 测绘出版社.
- 穆珍珍, 赵景波, 徐娜, 等. 2011. 西安市雁塔区冬季可吸入颗粒物时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 31(7): 1509-1516.
- 宁海文, 吴息. 2005. 西安市区大气污染时空变化特征及其与气象条件关系[J]. *陕西气象*, (2): 17-20.
- 秦孔建, 高继东, 李孟良, 等. 2010. 实际道路运行条件下公交车颗粒物排放测量与分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 34(6): 1112-1116.
- 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 2003. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. *环境科学学报*, 23(4): 468-471.
- 王淑英, 张小玲. 2002. 北京地区 PM_{10} 污染的气象特征[J]. *应用气象学报*, 13(特刊): 176-184.
- 魏玉香, 银燕, 杨卫芬, 等. 2009. 南京地区 $PM_{2.5}$ 污染特征及其影响因素分析[J]. *环境科学与管理*, 34(9): 29-34.
- 武辉, 房靖华, 钱志强. 2002. 太原市大气中 PM_{10} 的监测与分布[J]. *城市环境与城市生态*, 15(3): 49-52.
- 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 2013. 北京城区可吸入颗粒物分布特性与呼吸系统疾病相关分析[J]. *环境科学*, 34(1): 237-243.
- 杨仪方, 钱枫, 张慧峰, 等. 2010. 北京市交通干线周围可吸入大气颗粒物的污染特征[J]. *中国环境科学*, 30(7): 962-966.
- 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2002. 北京市区大气污染的时空特征[J]. *应用气象学报*, 13(特刊): 92-99.
- 张海霞, 董占强, 杨玲珠, 等. 2009. 邯郸市可吸入颗粒物的污染现状及气象条件分析[J]. *气象与环境科学*, 32: 134-137.
- 赵德山, 王明星. 1991. 煤烟型城市污染大气气溶胶[M]. 北京: 中国环境科学出版社: 213-236.
- 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 2009. 北京市可吸入颗粒物的空间分布特性及与气象因子的 CCA 分析[J]. *地理与地理信息科学*, 25(1): 71-74.
- 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 2010. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. *环境科学学报*, 30(11): 2154-2163.
- 赵文慧, 赵文吉, 宫辉力, 等. 2012. 北京市采暖期可吸入颗粒物时空分布特性及源追踪[J]. *地理研究*, 31(3): 418-428.

Spatial and temporal variation of $PM_{2.5}$ in Beijing city after rain

ZHENG Xiaoxia¹, ZHAO Wenji^{1*}, YAN Xing², ZHAO Wenhui³, XIONG Qiulin¹

1. Resources, Environment and Geographic Information System Key Laboratory of Beijing, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong;

3. Beijing Municipal Environment Monitoring Center, Beijing 100048, China;

Abstract: With increasing awareness of the environmental protection, residents' concerns about the city haze weather are increasing at the same time. The spatio-temporal variation of PM_{2.5} and its impact on human health are becoming the focus of concerns. Previous studies mainly focus on seasonal or yearly variations. This study attempted to explore the characteristics of PM_{2.5} temporal daily variation and the spatial distribution after rainfall. We collected data of hourly PM_{2.5} concentrations before and after rainfall in 13 air sampling stations designated by the Beijing Bureau of Environmental Protection and 14 additional samplings sites in Beijing, and analyzed the impact of rainfall on the characteristics of temporal variations of PM_{2.5}. This study further integrated with synchronous meteorological data (temperature, humidity) and traffic data (vehicle volume and speed) to reveal the reasons behind the characteristics of PM_{2.5} daily variation. The GIS spatial analysis method was subsequently employed to uncover the characteristics of the PM_{2.5} spatial distribution. Results showed that rainfalls efficiently removed particles in the air. A rainfall made the concentration of PM_{2.5} decreased by an average of 56.3%. PM_{2.5} concentration was at steady state within 1 hour after rainfall, continued to decline in the next 12 hours and was less than 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in all 72 hours. The rainfall has significant removal effect on particles with little impact on the diurnal temporal variation curve. The diurnal variation of PM_{2.5} concentrations exhibited, while the curve was concave type during the day and an arch at night. The peak value appeared at 23 or 0 o'clock and the valley value appeared at 3 pm. This characteristic was greatly influenced by meteorological factors, while traffic contribution is not significant. PM_{2.5} concentrations were influenced mainly by traffic factors during rush hours in the morning and by both meteorological and traffic factors during rush hours in the evening. The study area on the spatial distribution characteristics of PM_{2.5} also had marked diurnal variation. The PM_{2.5} was high in the south and low in the north during the day, and high in the periphery area (outside of the 3rd ring in particular) and low in the center.

Key words: Precipitation; PM_{2.5}; temporal and spatial variation; spatial analysis