

城市交叉路口车辆排放颗粒物浓度的时间相关性分析* Time-correlation Analysis of Particulate Matters from Vehicular Emissions at Urban Traffic Intersection

盘薇^{1,2}, 薛郁^{1**}, 卢伟真², 何红第³

PAN Wei^{1,2}, XUE Yu¹, LU Wei-zhen², HE Hong-di³

(1. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004; 2. 香港城市大学土木建筑工程系, 香港; 3. 上海海事大学, 物流研究中心, 上海航运物流信息工程研究中心, 上海 200135)

(1. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Department of Civil and Architectural Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China; 3. Logistics Research Center, Shanghai Engineering Research Center of Shipping Logistics Information, Shanghai Maritime University, Shanghai, 200135, China)

摘要:【目的】研究大都市道路交叉口车辆尾气排放的颗粒物对大气质量的影响。【方法】在香港街谷一个典型的道路交叉口处, 测量不同日期交通高峰时段内车辆排放的6种不同粒径(0.03~0.49 μm, 0.5~0.99 μm, 1~1.99 μm, 2~4.99 μm, 5~9.99 μm, ≥10 μm)的颗粒物浓度, 并通过自相关特性和功率谱分析对这些颗粒物浓度的时间相关性进行分析。【结果】粒径0.03~0.49 μm颗粒物的相关性变化呈现多周期性。与此相反, 粒径0.5~0.99 μm, 1~1.99 μm和2~4.99 μm颗粒物的相关性明显呈现出与交通红绿灯匹配的周期性, 粒径5.0~9.99 μm和≥10 μm较大颗粒物的相关性较小。粒径较小颗粒物的长时间相关函数不趋于0表明存在长时持续作用。功率谱的分析进一步证实了这6种不同粒径的颗粒物浓度的周期性和长时持续性, 特别是粒径0.03~0.49 μm细微颗粒物, 其功率谱呈现 $S(f_k) \sim \frac{1}{f_k^\gamma}$ 的标度关系, 表明存在长时相关特性。【结论】城市道路交叉口车辆尾气排放的颗粒物对大气有较大的影响, 6种不同粒径的颗粒物浓度显示出周期性和长时相关持续性。

关键词: 颗粒物 相关性分析 功率谱 交叉路口

中图分类号: U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)04-0373-09

Abstract:【Objective】In the paper, we study the effects of particulate matters emitted (0.03~0.49 μm, 0.5~0.99 μm, 1~1.99 μm, 2~4.99 μm, 5~9.99 μm, ≥10 μm) from vehicles at intersection of urban on air quality.【Methods】Six particulate matters from vehicle emissions at a typical traffic intersection of street canyon in Hong Kong were measured and collected in rush hour on different date, respectively. The time correlation analyses were performed through autocorrelation and power spectrum.【Results】The correlative variation of particulate matters with the grain diameter 0.03~0.49 μm does not reveal obvious unified periodicity, but multiplex periodicity. On the contrary, correlation of particulate matters with the grain diameter 0.5~0.99 μm, 1~1.99 μm and 2~4.99 μm emerge periodicities approximately matching with traffic light periods. For particulate matter with large the grain diameter like 5.0~9.99 μm and ≥10 μm, their correlations are small and change

收稿日期: 2015-05-27

修回日期: 2015-06-18

作者简介: 盘薇(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事环境工程与交通流研究。

* 国家自然科学基金项目(11262003和11302125), 香港城市大学战略研究项目(No. CityU-SRG 7002718), 广西壮族自治区研究生创新项目(No. YCSZ2012013)和广西教育厅科研项目(2013ZD059)资助。

** 通讯作者: 薛郁(1963-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事交通流动力学研究, E-mail: yuxuegxu@gxu.edu.cn.

and long-time persistence, especially for the grain diameter 0.03~0.49 μm fine particulate matter, its power spectrum presents a scaling relationship $S(f_k) \sim \frac{1}{f_k^\gamma}$, indicating long-time correlation characteristics.【Conclusion】Particulate matter emissions at urban traffic intersections have a significant impact on the atmosphere, and the concentrations of six different grain diameters show periodicity and long-time correlation persistence.

quickly. Nonzero value of correlated variations with time implies long-term persistence of tiny particulate matter from emissions. Periodogram in power spectrum analyses further illustrates that evolutions of six particulate matters from vehicle emissions have oscillating periodicities and long-term trend on different date. Especial to the ultrafine particulate matters with grain diameter $0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$, it shows periodicity without the unified period on different date. Scaling relation of power spectrum for particulate matters indicates the existence of long-term correlation. **【Conclusion】**Particulate matters from vehicles emission have a great influence on air quality at intersection of urban. Six kinds of particulate matters with the different grain diameter from vehicle emissions reveal periodicities and long-term trend.

Key words: particulate matter, correlation analysis, power spectrum, intersection

0 引言

【研究意义】粒径小于 100 nm 的微小颗粒物很容易增加呼吸道疾病和心血管病的风险^[1~5],大量的研究表明颗粒物越小通过呼吸道吸入就越深,而大颗粒物主要沉积在鼻腔内.在很多大城市,机动车排放物除了微纳米颗粒物之外,还有 SO_2 , NO_x , CO 和 CO_2 等各种化学成分,其排放量达到甚至超过工业生产或家庭生活的排放量.当车辆在交叉路口停止和启动时,其排放量比其它情况更多,颗粒物占的比例很大,经不断地积累后释放到路边的大气中.路边行人吸入这些颗粒物会影响其心肺功能,危害身体健康.因此,机动车排放物是产生气溶胶颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的最主要的污染源.**【前人研究进展】**颗粒物的稀释扩散、凝结或凝聚等动力学行为可以通过计算流体力学模型^[6]、统计模型^[7,8]等理论和方法研究.在统计模型中,统计分布分析被证明是描述污染浓度分布的有效工具^[9~11].一般地,统计分布方法涉及统计分布函数的识别和相关参数的估算,因此,组成 χ^2 统计的适合度检测方法^[12],Kolmogorov-Smirnov 统计^[7],Anderson-Darling 统计^[11],线性无偏估算^[13],蒙特卡洛最大可能估计量(MC-MLE)^[14]等定量分析方法都得到优先地广泛应用.分析时间序列的主要目的是了解测量数据中的周期性变化,不同振幅和涨落的周期性变化叠加构成一时间序列,这些时域的周期性变化可以通过相关性分析识别.功率谱分析能够检测出噪声时间序列的周期成分(信号)和长时持续性趋势^[12,15~17],为了分析时间序列的系统演化,可以研究其功率谱所包含的某些性质,如周期性、振荡和变化趋势等.**【本研究切入点】**对于时间较长不为 0 的相关函数,Neubert 等^[18]认为存在长时相关特性,但传统相关性分析不足以完全确定混乱时间序列的长时相关特性,必须借助功率谱分析颗粒物时间序列具有

的多重周期性,应用去趋势涨落分析方法(DFA)探讨长时相关特性.**【拟解决的关键问题】**利用 2009 年 3 月 31、4 月 1 日和 3 日测量得到的车辆排放颗粒物浓度的数据,通过自相关特性和功率谱分析,试图探讨在城市街谷道路交叉口处不同日期车辆尾气排放微纳米颗粒物呈现的相关特性.

1 数据和方法

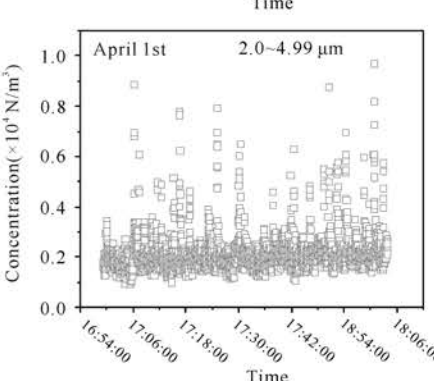
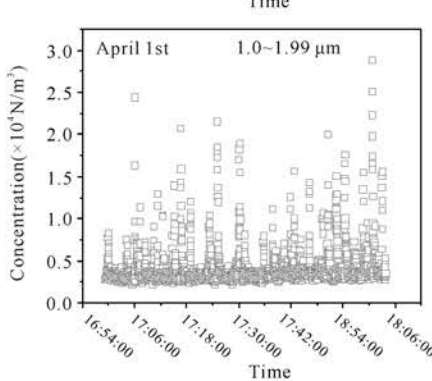
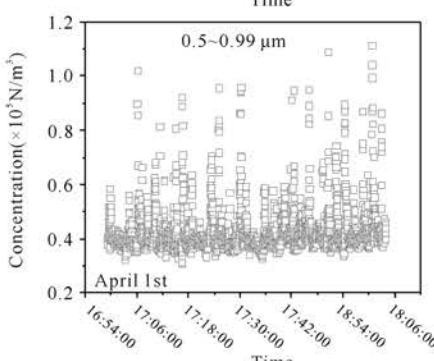
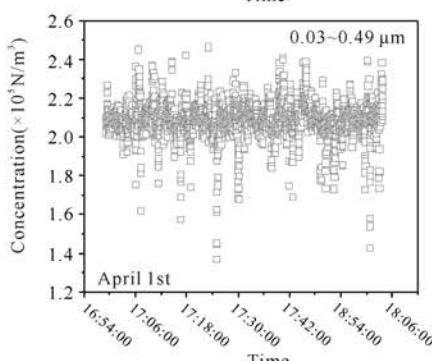
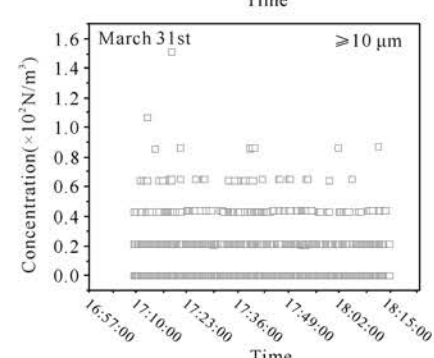
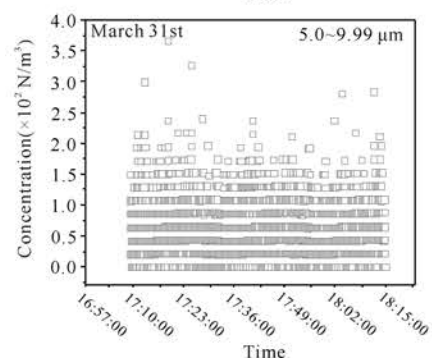
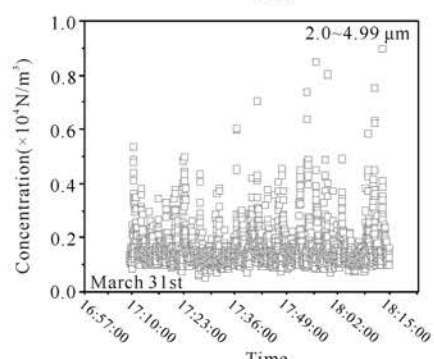
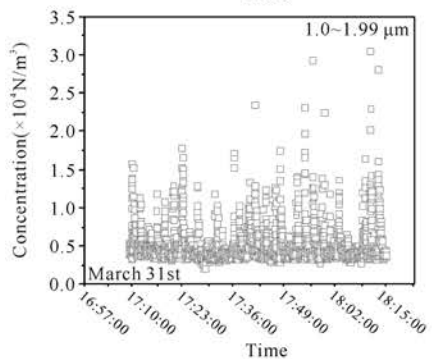
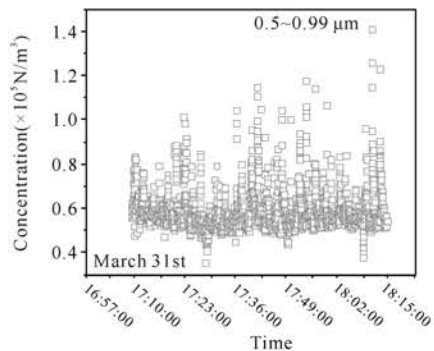
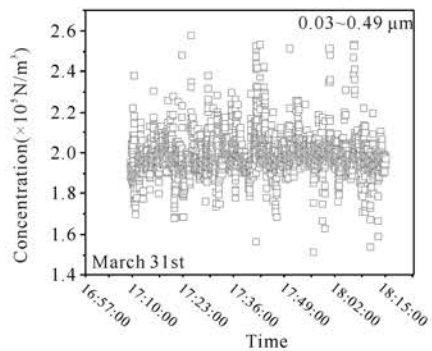
1.1 数据采集

选择香港弥敦道旺角一道路交叉路口处用 Fluke 983 粒子计数器测量车辆排放的空气污染物,观测地点是九龙半岛一处主要的商业街和交通要道,道路被四周的高层建筑所包围,是香港地区一个典型的街道街谷,其建筑物高 180 m ,宽 100 m .在主要的街谷车辆排放的颗粒物不容易迁移.粒子计数器使用激光衍射技术对微纳米颗粒物的粒子数进行统计,可以探测粒径大于等于 $0.03 \mu\text{m}$ 的粒子,根据粒子粒径可以将颗粒物分成 6 类,即 $0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$, $0.5 \sim 0.99 \mu\text{m}$, $1 \sim 1.99 \mu\text{m}$, $2 \sim 4.99 \mu\text{m}$, $5.0 \sim 9.99 \mu\text{m}$ 和 $\geq 10 \mu\text{m}$.这里所用到的数据是分别在 3 个下班高峰期(2009 年的 3 月 31 日,4 月 1 日和 4 月 3 日 17:04:20~18:06:18 时段)在路边采集到的汽车排放的颗粒物浓度的时间序列,采样间隔为 1 s .对 6 种不同粒径的颗粒物浓度每一数据集分别包含 3758 个典型的数据,测量温度在 $26.6 \sim 27.6^\circ\text{C}$,空气湿度 $65\% \sim 69\%$,浓度单位:每立方米含粒子数,即 N/m^3 (图 1).

1.2 相关性分析

自相关分析实质上是通过对计算延迟时间 τ 的相关系数来研究一个或多个粒子数浓度的时间序列的相关特性,延迟时间 τ 的自相关函数为

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1-\tau} x(n)x(n-\tau), \quad (1)$$



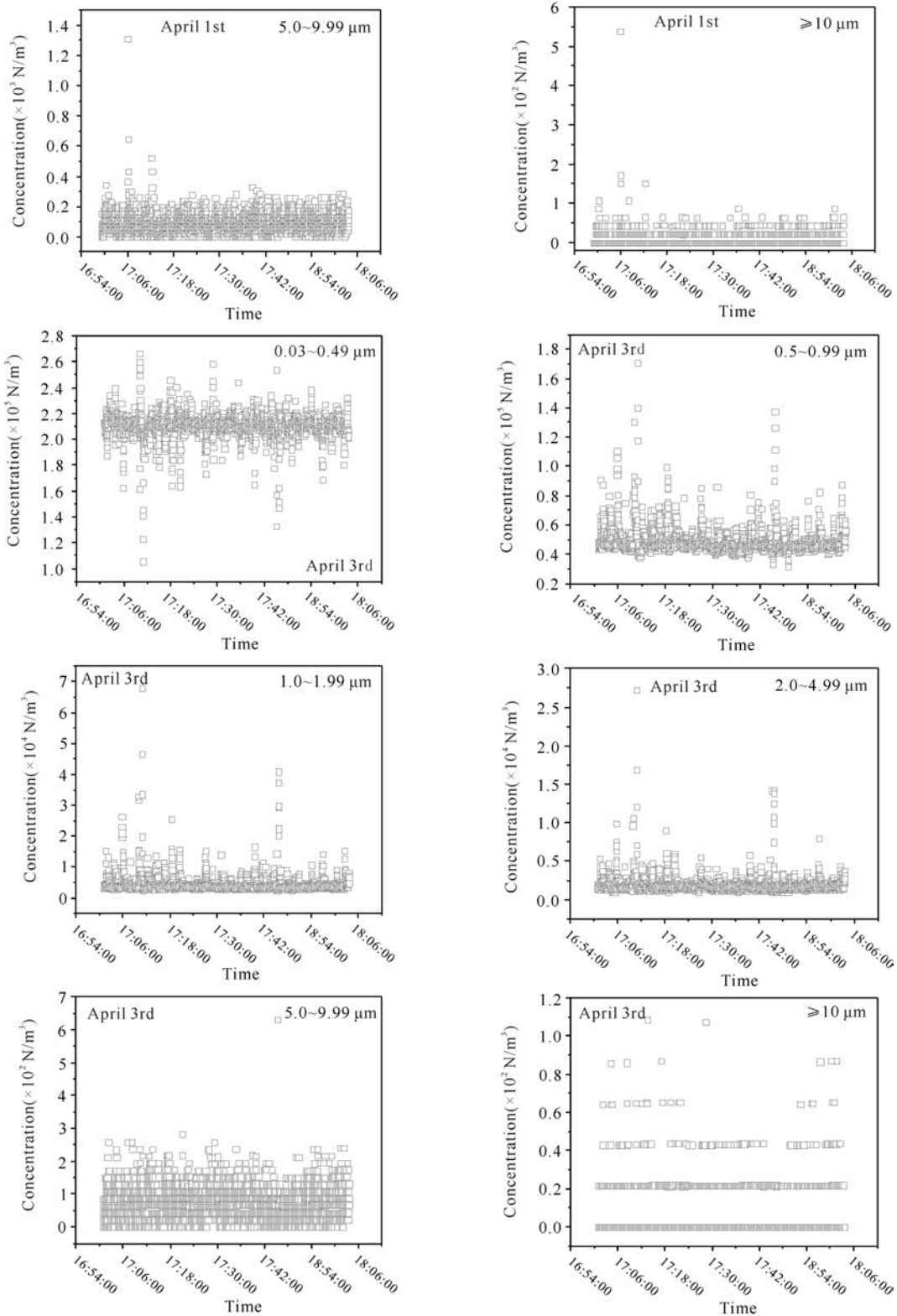


图1 颗粒物浓度的时间序列

Fig. 1 Sequences of concentration for particulate matters

其中 L 为测量得到的时间序列 $\{x\}$ 的长度. 如果时间序列具有周期性, 其自相关函数在延迟时间 τ 上呈现周期变化, 相关系数 $C_{xx}(\tau)$ 最大值重复出现表明具有周期 τ 的周期变化.

1.3 功率谱

依据所选择地点测量得到的实验数据, 通过车辆排放颗粒物的相关函数进行功率谱分析, 以便检测其共同的周期性^[19], 并利用离散快速傅里叶变换 (FFT) 算法计算周期图谱, 估算出有限尺度时间序列

的功率谱密度函数,周期图谱方法可适用于长时间序列,它可提供高频谱分辨率识别谱峰,每一谱峰对应于主频.离散傅里叶变换 $X(k)$ 定义如下

$$X(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \exp(-i2\pi kt/N), \quad (2)$$

其中 $x(t)$ 为原时间序列, N 是观测次数, $k=0, 1, 2, \dots, (N-1)$. 在频率 $\nu_k = k/N$ 的周期图谱可以通过如下离散傅里叶变换 $X(k)$ 的模平方计算得到.

$$S(\nu_k) = |X(k)|^2. \quad (3)$$

功率谱密度函数表示频率函数信号的强度,通过频率的功率谱密度函数积分等于时间序列的方差^[20].

2 结果和分析

2.1 颗粒物的相关特性

从图 2 可知,粒径 $0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$ 的自相关函数不同于其他粒径的变化,其自相关函数变化比较混

乱,没有统一周期,不同日期呈现不同的排放周期,迄今为止,细微颗粒物的多周期性是一个新发现.

粒径 $0.5 \sim 0.99 \mu\text{m}$, $1 \sim 1.99 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 4.99 \mu\text{m}$ 颗粒物的周期性明显,大约为 124 s,该周期刚好对应于所选交叉路口处红绿灯 130 s 的周期,这表明车辆排放的小粒径颗粒物 ($0.5 \sim 4.99 \mu\text{m}$) 在绿灯期 (~ 71 s) 经过排放、扩散和沉积,其最大相关值 $C_{\text{max}}(\tau)$,而在红灯期 (~ 55 s) 由于车辆停止相关函数衰减.同样地,在图 2 中粒径 $> 5.0 \mu\text{m}$ 颗粒物的周期性不太明显.值得注意的是,所有颗粒物的相关函数并不衰减趋于零,而是持续一段时间,粒径 $0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$ 的相关函数在 $-0.05 \sim 0.05$ 之间振荡,粒径 $0.5 \sim 0.99 \mu\text{m}$, $1 \sim 1.99 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 4.99 \mu\text{m}$ 的相关函数在 $-0.1 \sim 0.1$ 之间周期性振荡,而大粒径 $> 5.0 \mu\text{m}$ 颗粒物的相关函数较小,但尚未趋于 0 (图 3). 这表明产生排放积累作用.

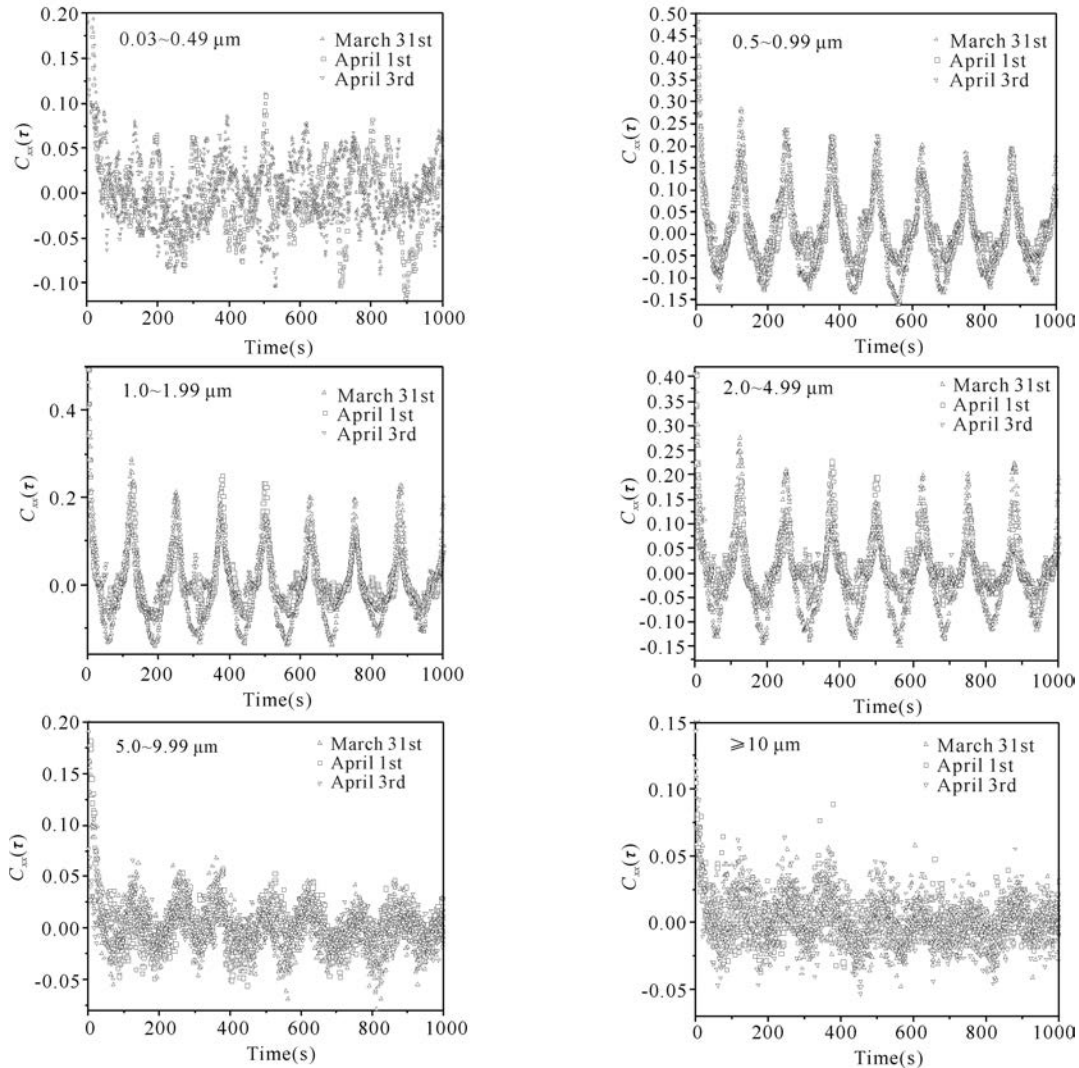


图 2 不同粒径颗粒物浓度的自相关函数

Fig. 2 Auto-correlation function of concentration for the different grain diameter

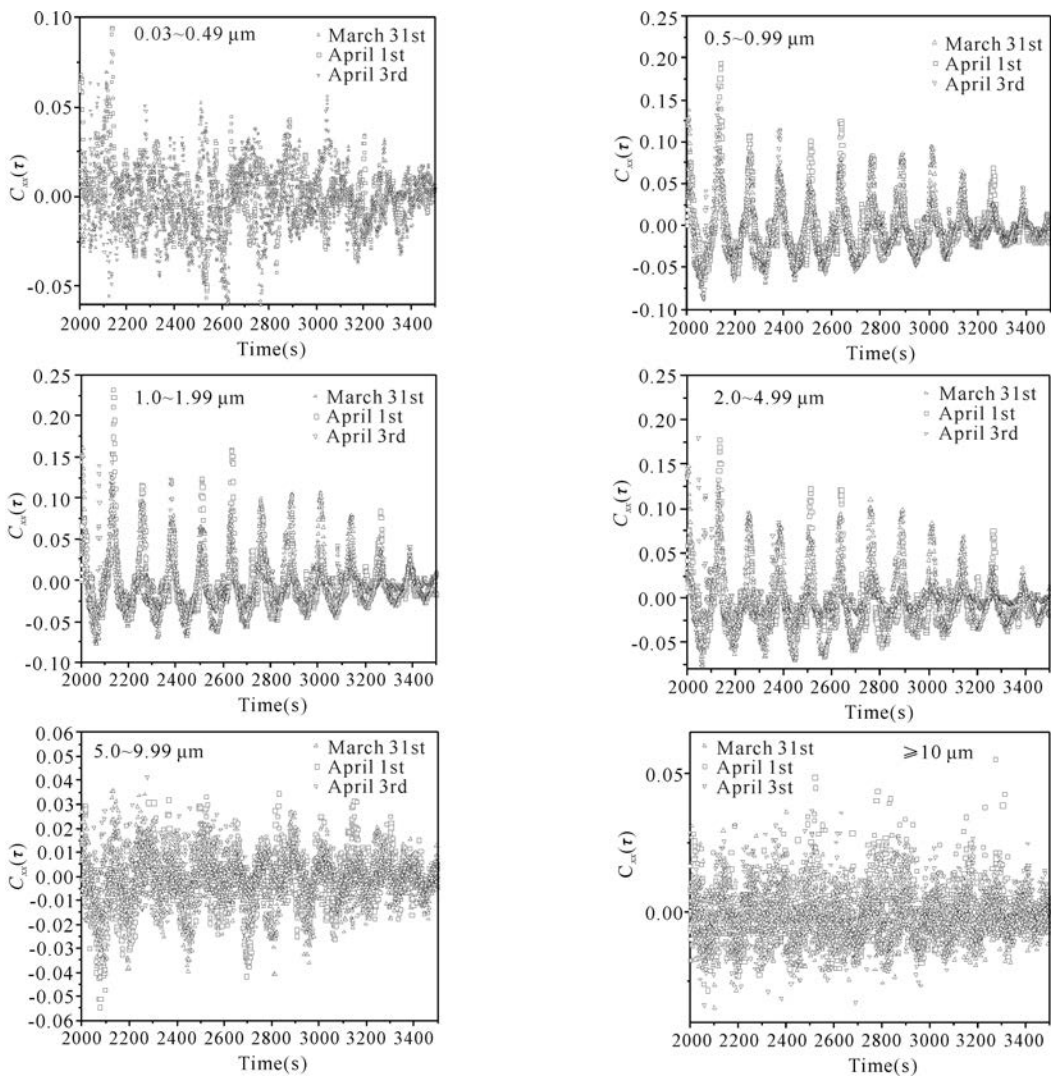


图3 不同粒径颗粒物浓度的较长时间自相关函数

Fig. 3 Auto-correlation function in long time for the different grain diameter

因为红绿灯从一个周期到下一个周期,排队的车流启动时排放新的颗粒物,这些颗粒物和原先排放弥散在大气的颗粒物累积在一起增加颗粒物的浓度,这种反复排放导致长时间的影响,特别是细微颗粒物(0.03~5.0 μm)影响较大。

2.2 颗粒物的功率谱、周期性和长时趋势

以1 h为标准,筛选出每天连续的3600个数据点,并分别对其进行功率谱分析。在舍弃头尾的一到两个数据点后,在 $k=15$ 的条件下,取 N 为3599来计算 X 在频率为 $1/240 \text{ s}^{-1}=0.0042 \text{ s}^{-1}$ 的数值。如表1所示,直径为0.03~0.49 μm的颗粒物在3个测量日所得到的周期有较大差异,分别为164 s,400 s和514 s并对应图4中的峰值。而其它分布得出的周期大约为124 s,这与选定的交叉路口的信号灯周期130 s大致相符。

表1 不同日期颗粒物变化的周期性

Table 1 Period of particulate matters at different date

粒径 Grain diameter(μm)	周期 Period(s)		
	April 1st	April 3rd	March 31st
0.03~0.49	164	400	514
0.5~0.99	124	124	124
1.0~1.99	124	124	124
2.0~4.99	124	124	124
5.0~9.99	124	150	124
≥10.0	124	124	123

由于粒径为0.03~0.49 μm的颗粒物的特殊性,有必要对其的功率谱进行进一步讨论。图4中每一个峰值都对应于重要过程的主频率。在频率最小时,最大的峰值对应于车辆尾气中细小颗粒物的排放周期,而其他峰值则对应于间歇排放。图4不同日期

的最高峰分别发生在 0.0061 s^{-1} , 0.0025 s^{-1} 和 0.0019 s^{-1} 处, 即细小颗粒物的最大排放周期分别为 164 s , 400 s 和 514 s . 这也意味着细小颗粒物的排放周期在每次排放中没有固定的周期. 粒径分布于 $0.03\sim 0.49\ \mu\text{m}$ 的所有周期图都给出了一系列的峰值来代表车辆在晚高峰时期的排放模式. 此外, 达到最大峰值所需要的时间可用于表示颗粒物的长时趋势.

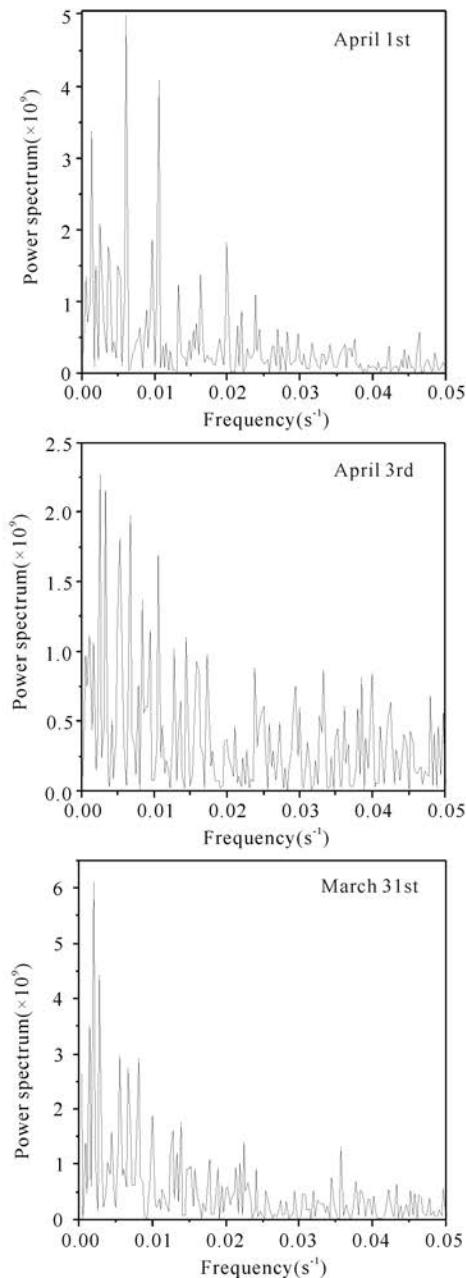


图4 粒径 $0.03\sim 0.49\ \mu\text{m}$ 颗粒物的周期

Fig. 4 Periodogram for grain diameter $0.03\sim 0.49\ \mu\text{m}$

图5为颗粒物大小在 $0.5\sim 0.99\ \mu\text{m}$ 的周期图, 而粒径在 $1\sim 1.99\ \mu\text{m}$ 和 $2\sim 4.99\ \mu\text{m}$ 两个区间的周期图与之类似. 当频率为 0.008 s^{-1} 时, 周期图中出现的最大峰值对应于排放周期 $T = 124\text{ s}$, 这与交通灯

的周期相吻合并表示颗粒排放周期对信号灯控制的依赖性. 而其后的一系列峰值表示的是一系列不规则的排放. 图6和图7中所发现的峰值是由颗粒物浓度的大幅度涨落造成的, 并不代表由交通信号灯控制的真实排放周期. 此外, 在最大峰值之前出现的最显著峰值表示的是颗粒物排放的长时趋势性. 事实上, 信号灯的控制对车辆的排放及其排放的累积效应有很大的影响. 这是因为信号灯的周期性变化, 使得排队等候的车辆在启动和刹车的循环过程中持续排放. 而新周期排放的颗粒物与之前周期的剩余颗粒物相叠加, 形成的累积效应使得总颗粒物浓度上升. 累积效应造成了长时影响, 这就对应于图5~7中最大峰值前出现的一系列其它的代表长时趋势的小峰值.

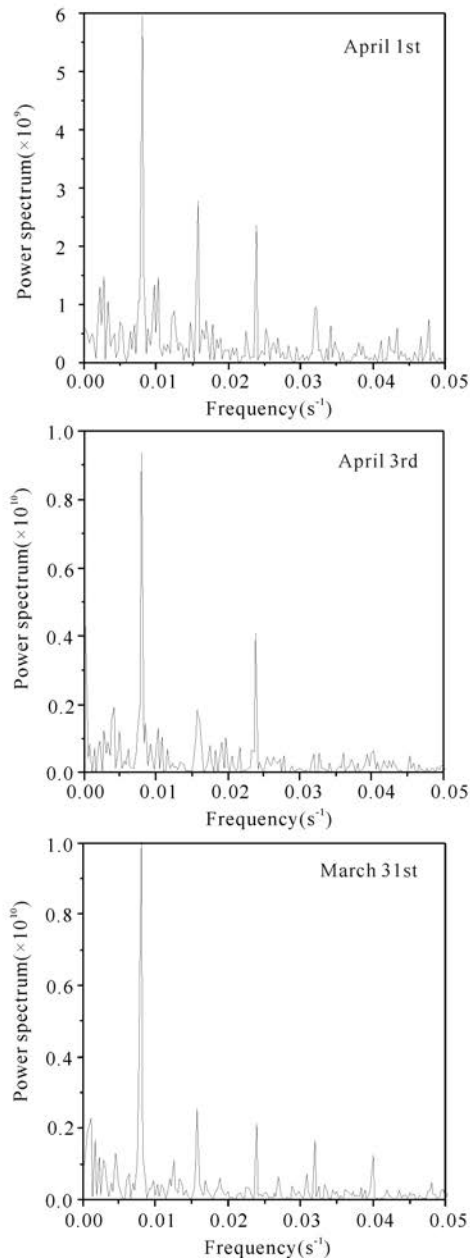


图5 粒径 $0.5\sim 0.99\ \mu\text{m}$ 颗粒物的周期

Fig. 5 Periodogram for grain diameter $0.5\sim 0.99\ \mu\text{m}$

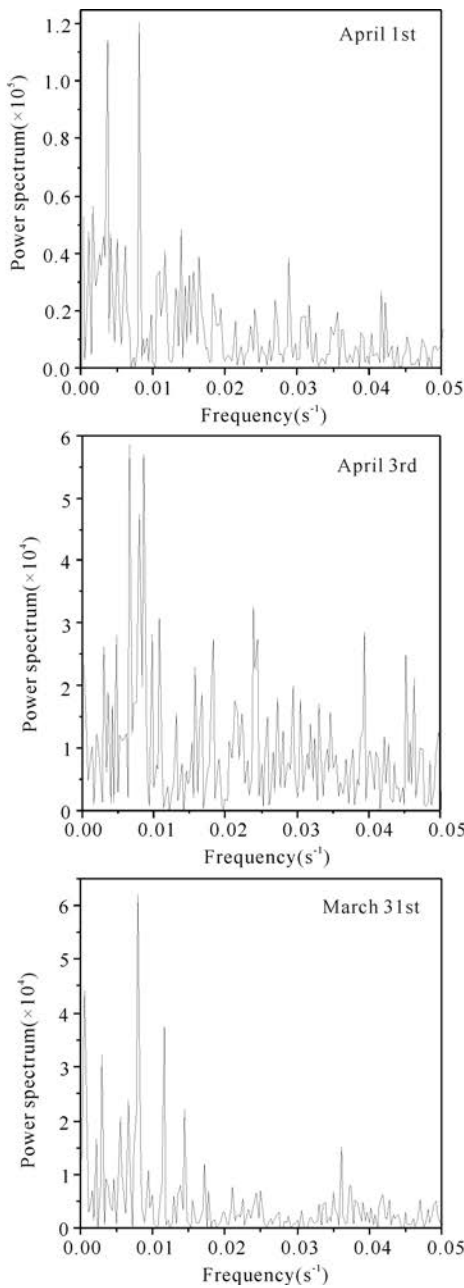


图6 粒径 5.0~9.99 μm 颗粒物的周期

Fig. 6 Periodogram for grain diameter 5.0~9.99 μm

功率谱与以下公式所描述的随机过程有关^[21,22]：

$$S(f_k) = \frac{\text{const.}}{|f_k|^\eta}, \quad (4)$$

其中 f_k 表示频率, 指数 η 取值范围为 $(0 < \eta < 2)$ 。其中, 当 $\eta=0$ 时表示白噪声, 而 $\eta=2$ 则对应于 Wiener 过程。为了探讨功率谱与公式(4)之间的关系, 我们在 log-log 坐标中, 对粒径为 0.03~0.49 μm 的颗粒物用分段的方式对其功率谱曲线进行相应的拟合(图 8)。得到指数 $\eta \approx 1.06$, 而这就包含了一个常见于二极管和晶体管, 以及高速公路交通中的自组织临界(SOC)现象, 其中包含了一个著名的幂律关系

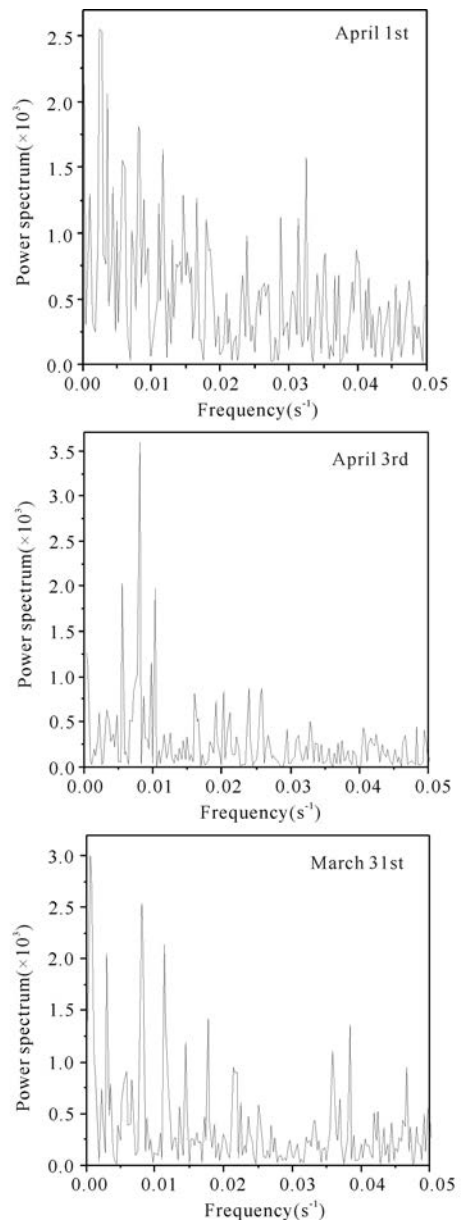


图7 粒径 ≥ 10.0 μm 颗粒物的周期

Fig. 7 Periodogram for grain diameter ≥ 10.0 μm

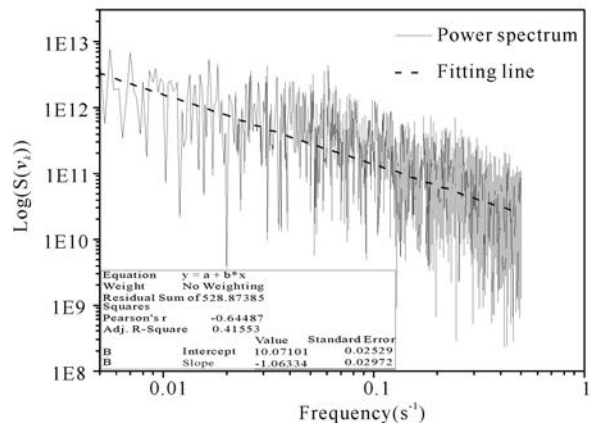


图8 在对数坐标中粒径 0.03~0.49 μm 颗粒物的功率谱和拟合线

Fig. 8 Power spectrum and its fitting line for grain diameter 0.03~0.49 μm in log-log coordinate

$S(f_k) \sim \frac{1}{f_k}$, 我们称之为 $\frac{1}{f}$ 噪声. 与此类似, 粒径为 $0.5 \sim 0.99 \mu\text{m}$, $1 \sim 1.99 \mu\text{m}$, $2 \sim 4.99 \mu\text{m}$, $5.0 \sim 9.99 \mu\text{m}$ 和 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的指数 η 分别为 1.27, 1.29, 1.03, 0.50 和 0.24, 这表明在时间的特征尺度上缺乏幂律关系, 即标度关系. 因此, 粒径分布在所有尺度上的涨落是彼此相关的, 而这又揭示了分形行为的存在.

3 结论

本研究分别于 2009 年 3 月 31、4 月 1 日和 3 日, 在香港一个典型的道路交叉口处测量交通高峰车辆排放的 6 种不同粒径颗粒物 ($0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$, $0.5 \sim 0.99 \mu\text{m}$, $1 \sim 1.99 \mu\text{m}$, $2 \sim 4.99 \mu\text{m}$, $5.0 \sim 9.99 \mu\text{m}$ 和 $\geq 10 \mu\text{m}$) 的粒子数浓度. 通过对这些颗粒物浓度的时间相关性分析, 研究车辆排放细微颗粒物的演化过程, 结果表明, 粒径 $0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$ 颗粒物的相关性变化呈现多周期性. 与此相反, 粒径 $0.5 \sim 0.99 \mu\text{m}$, $1 \sim 1.99 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 4.99 \mu\text{m}$ 颗粒物的相关性就明显呈现出与交通红绿灯匹配的周期性, 粒径 $5.0 \sim 9.99 \mu\text{m}$ 和 $\geq 10 \mu\text{m}$ 较大颗粒物的相关性较小. 细微颗粒物长时间相关函数非零值表明存在长时间持续作用. 功率谱的分析进一步证实了这 6 种不同粒径颗粒物浓度的周期性和长时持续性, 特别是粒径 $0.03 \sim 0.49 \mu\text{m}$ 细微颗粒物, 其功率谱呈现 $S(f_k) \sim \frac{1}{f_k^\eta}$ 的标度关系, 表明存在长时相关特性.

参考文献:

[1] Peters A, Wichmann H, Tuch T, et al. Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1997, 155: 1376-1383.

[2] Burnett R T, Smith-Doiron M, Stieb D, et al. Effects of particulate and gaseous air pollution on cardiorespiratory hospitalizations [J]. Archives of Environmental Health, 1999, 54(2): 130-139.

[3] Lu W Z, Wang X K. Interaction patterns of major air pollutants in Hong Kong territory [J]. Science of The Total Environment, 2004, 324: 247-259.

[4] Chan T L, Ning Z. On-road remote sensing of diesel vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6843-6856.

[5] Xia L, Shao Y. Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong Island [J]. Environmental Modeling and Software, 2005, 20(9): 1175-1188.

[6] Cheng X, Hu F. Numerical studies on flow fields around buildings in an urban street canyon and cross-road [J]. Advance Atmospheric Science, 2004, 22: 290-299.

[7] Kalpasanov Y, Kurchatova G. A study of the statistical distribution of chemical pollutants in air [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1976, 26(10): 981-985.

[8] Kottogoda N T, Rosso R. Statistics, Probability, and Reliability for Civil and Environmental Engineers [M]. Milan: The McGraw Hills Companies, INC, 1997.

[9] Romano D. Different methodologies to quantify uncertainties of air emissions [J]. Environment International, 2004, 30: 1099-1107.

[10] Cassidy B E, Alabanza-Akers M A, Akers T A, et al. Particulate matter and carbon monoxide multiple regression models using environmental characteristics in a high diesel-use area of Baguio City, Philippines [J]. Science of the Total Environment, 2007, 381: 47-58.

[11] Gokhale S, Khare M. Statistical behavior of carbon monoxide from vehicular exhausts in urban environments [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22: 526-535.

[12] Tong E Y, De Pietro S A. Sampling frequencies for determining long term average concentrations of atmospheric particulate sulfates [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1997, 27: 1008-1011.

[13] Bain L J. Statistical Analysis of Reliability and Life Testing Models: Theory and Methods [M]. New York: Marcel Dekker, INC, 1978.

[14] Mage D T, Ott W R. An evaluation of the methods of fractiles, moments and maximum likelihood for estimating parameters when sampling air quality data from a stationary logical distribution [J]. Atmospheric Environment, 1984, 18(1): 163-171.

[15] Marr L C, Harley R A. Spectral analysis of week-day-weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 2327-2335.

[16] Kandlikar M. Air pollution at a hotspot location in Delhi: Detecting trends seasonal cycles and oscillations [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 5934-5947.

[17] Choi Y S, Ho C H, Chen D L, et al. Spectral analysis of weekly variation in PM10 mass concentration and meteorological conditions over China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 655-666.

[18] Neubert L, Santen L, Schadschneider A, et al. Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis [J]. Physical Review E, 1999, 60: 6480-6490.

[19] Lim J S, Oppenheim A V. Advanced Topics in Signal Processing [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1988.

[20] Oppenheim A V, Schaffer R W, Buck J R. Discrete-time Signal Processing [M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.

[21] Mantegna R N, Stanley H E. An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 14-25.

[22] Bak P, Tang C, Wiesenfeld C. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise [J]. Physical Review Letters, 1987, 59: 381-384.

(责任编辑: 陆 雁)