

北京城区道路灰尘季节性粒度分布及分形特征

周恋彤,董黎明*,赵钰,秦泽敏 (北京工商大学环境科学与工程系,北京 100048)

摘要: 对采集的北京城区道路灰尘样品用扫描电镜及 X 射线能谱进行形貌特征分析,用激光粒度仪进行粒度测定.结果表明:北京城区四季道路灰尘包含矿物颗粒,轮胎磨损颗粒及球形燃烧颗粒,四季道路灰尘粒度分布频率曲线均呈双峰态分布,第一峰值粒径介于 256~303 μm ,第二峰值粒径介于 74~88 μm .四季道路灰尘粒度分布分形维数为 1.7533~2.3137,平均粒径为 188.08~200.20 μm ,分选性差,呈极不对称的极正偏宽峰态到很窄峰态,属砂土.四季道路灰尘均主要是局地灰尘跃移搬运形成,直接通过大气运移沉降的远源灰尘相对较少.平均粒径春季>秋季>夏季>冬季,分选系数夏季~秋季>冬季>春季,峰度冬季>秋季>夏季~春季,偏度无较大区别.春季灰尘可吸入颗粒物最高,并含有可入肺颗粒物,对人体健康和大气环境的危害潜力不容忽视.

关键词: 道路灰尘; 粒度分布; 分形; 北京

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)06-1610-10

Particle size distribution and fractal dimension characteristics of urban road dust in four seasons in Beijing. ZHOU Lian-tong, DONG Li-ming*, ZHAO Yu, QIN Ze-min (Department of Environmental Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China). *China Environmental Science*, 2015,35(6): 1610~1619

Abstract: Road dust samples were collected in 14 representative sampling zones stratified across core urban areas in Beijing. Three types of particles that included aggregated mineral matter, tire wear particles and spherical combustion products were detected with Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-ray (SEM-EDS). Bimodal patterns of grain size distributions were observed with Laser Granularity Analyzer. Results of the research showed that bimodal size distribution spectrum ranged from 256 to 303 μm and from 74 to 88 μm , respectively. The fractal dimensions of urban road dust ranged from 1.7533 to 2.3137. The mean particle sizes ranged from 188.08 to 200.20 μm . The poor sorting, the extremely positive skewness and the broad to very narrow kurtosis made urban road dust sand. Saltation and shorter distance suspension actually contribute significantly to the formation of the urban road dust, other transport ways, like long distance suspension, only did a few work. According to the research of road dust in the four seasons, the decreased order of them on mean particle size was spring, autumn, summer, and winter (the last two were similar). The decreased order of sorting coefficient was summer, which was closed to autumn, winter, and spring. When it comes to kurtosis, the decreased order was winter, autumn, summer, and spring, which was also near to summer. The differences of skewness can be ignored. Road dust in spring seemed to have the highest proportions of thoracic, as well as more inhalable and respirable particles, whose potential risk to health and environment should be aware of.

Key words: road dust; particle size distribution; fractal dimension; Beijing

城市道路灰尘是指来自于人为源(汽车尾气排放、部件以及路面磨损、建筑施工及工业生产等)直接排放或土壤风化的悬浮颗粒物沉积在户外道路界面形成的固态颗粒物^[1-3],在风力、机动车和人群活动等外动力条件下,可再悬浮与大气颗粒物相互转化,形成典型的"点、线、面"型污染,从而给城市生态系统带来环境风险与健康威胁^[2,4-6].

细级别的土粒所占的比例,它强烈地影响着道路灰尘的可迁移性、吸附性能、溶质迁移规律及环境健康风险等重要的物理化学特性^[7].近年来,我国有关道路灰尘粒度分布的研究已在北京^[8-11]、长春^[12]、西宁^[13]、洛阳^[14]、昆明^[15]等城市展开,

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 北京市教育委员会科技计划(KM201310011005);北京市自然科学基金(8112012)

* 责任作者, 副教授, donglm@btbu.edu.cn

道路灰尘粒度分布(PSD)是指固相中不同粗

但粒度季节性分布特征少有报道.由于道路灰尘与土壤及大气颗粒物的理化性质有着十分密切的联系,可将在土壤及大气颗粒物粒度研究中较为成熟的分形理论及分形维数^[16-23]引入道路灰尘粒径分布特征研究中,使定量描述其结构非均匀特征成为可能.目前,分形理论应用于地表灰尘颗粒物的研究刚刚起步,国内仅有南京^[24]及芜湖^[25-26]的道路灰尘分维数研究.

本研究依据北京城区大气环境监测的

环境评价点和道路监控点设置采样点,按城市环路梯度采集四季道路灰尘,采用激光衍射粒度分析技术获得道路灰尘的粒径分布,结合分形理论研究其四季不同的粒度分布及分形特征,并探究其环境效应,以期为北京中心城区道路灰尘污染防治提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

表 1 北京城区各采样点详细信息

Table 1 The locations of sampling sites of Beijing urban area

采样地区	采样点编号	采样道路	坐标	采样地区	采样点编号	采样道路	坐标
前门东	1P	前门东大街	39.901° N, 116.402° E	朝阳农展馆	8E	东三环北路	39.938° N, 116.455° E
	1M	正义路	39.901° N, 116.400° E		8P	东直门外大街	39.940° N, 116.453° E
	1C	东交民巷	39.902° N, 116.402° E		8C	三里屯中街	39.938° N, 116.452° E
永定门内	2P	永定门内大街	39.873° N, 116.394° E	东城天坛	9P	天坛东路	39.882° N, 116.421° E
	2M	永定门东街	39.871° N, 116.397° E		9M	体育馆路	39.884° N, 116.423° E
	2C	天坛南里	39.872° N, 116.398° E		9C	体育馆西路	39.883° N, 116.425° E
西直门北	3E	西直门北大街	39.941° N, 116.350° E	西城万寿西宫	10P	右安门内大街	39.879° N, 116.358° E
	3M	西直门内大街	39.940° N, 116.353° E		10M	白纸坊西街	39.876° N, 116.353° E
	3C	桦皮厂胡同	39.940° N, 116.354° E		10C	樱桃二条	39.880° N, 116.356° E
南三环西	4E	南三环西路	39.853° N, 116.356° E	北四环西	11E	北四环西路	39.984° N, 116.300° E
	4P	右安南桥	39.852° N, 116.359° E		11P	苏州街	39.982° N, 116.300° E
	4C	角门北路	39.850° N, 116.360° E		11C	海淀大街	39.983° N, 116.299° E
东四环北	5P	东四环北路	39.966° N, 116.469° E	西三环航天桥	12E	航天桥	39.927° N, 116.310° E
	5M	霄云路	39.966° N, 116.467° E		12P	阜成路	39.924° N, 116.319° E
	5C	芳园南街	39.966° N, 116.471° E		12M	增光路	39.928° N, 116.314° E
12C			阜成路北三街		39.926° N, 116.317° E		
西城官园	6E	车公庄	39.933° N, 116.350° E	南四环西	13E	南四环	39.830° N, 116.285° E

续表 1

采样地区	采样点编号	采样道路	坐标	采样地区	采样点编号	采样道路	坐标
	6M	平安里西大街	39.931° N, 116.353° E		13M	百强大道	39.832° N, 116.286° E
	6C	西直门南街	39.932° N, 116.353° E		13C	宝隆路	39.831° N, 116.290° E
东城东四	7E	朝阳门内大街	39.924° N, 116.430° E	南四环东	14E	东南四环	39.832° N, 116.452° E
	7M	朝阳门内北大街	39.925° N, 116.426° E		14M	成寿寺路	39.831° N, 116.448° E
	7C	仓南北巷	39.928° N, 116.427° E		14C	南顶村路	39.829° N, 116.453° E

注:*采样点编号说明:1P(1-采样地区编号,P-交通类型:快速路E,express way、主干路P,primary road、次干路M,minor road、支路C,collector road)

本研究在北京城区四环路以内选择 14 个采样地区(二环路以内 6 个,二环路到三环路内 4 个,三环路到四环路内 4 个),结合四种道路类型(快速路、主干路、次干路和支路)共布设 43 个采样点(表 1).四季道路灰尘样品分别于 2013 年 3 月 25~29 日(春季)、2013 年 7 月 12~16 日(夏季)、2013 年 10 月 23~27 日(秋季)及 2014 年 1 月 2~6 日(冬季)在风速<1m/s、天气晴好的天气条件下采集,采样前 10d 内无降水、无沙尘天气,采样时间选在采样区清扫周期的中间时刻.在每处采样点,选取道路边缘地带一定区域面积(4~6m²),采用干净的塑料扫帚和铲子收集道路灰尘样品约 500g.

1.2 样品制备

采集的道路灰尘样品自然风干,用清洁的筛子(筛孔直径 1000μm)筛除烟头、植物碎屑等杂物.留取各采样点粒径≤1000μm 的道路灰尘样品作为总样品.

1.3 样品分析

粒度分析采用美国 Microtra 公司的 Microtrac S3500 激光粒度分析仪进行.粒度测量范围为 0.02~2000μm,分 100 个粒度,重复测定 3 次,重复测量误差小于 2%.

单颗粒微观形貌特征分析采用日本 JEOL 公司的 JSM-6490 型扫描电镜进行,分辨率 3.0nm,放大倍数 20~30 万倍,配备美国 Oxford Instruments 公司的 EDS-7573 型 X 射线能谱仪进行元素分析.测试时分别取适量四季道路灰尘

样品粘附于 1cm×1cm 导电胶上,粘于样品台上,喷金后进行电镜及能谱分析.

1.4 统计方法

根据 Microtrac S3500 所测得数据绘制北京城区冬季道路灰尘粒径分布频率曲线与累积频率曲线,含量以体积浓度表示.采用 Folk-Ward 图解法^[27]计算粒度参数(平均粒径 M_Z 、分选系数 σ_I 、偏度 SK_I 和峰度 K_G):

$$M_Z = (\Phi_{16} + \Phi_{30} + \Phi_{84}) / 3 \quad (1)$$

$$\sigma_I = (\Phi_{84} - \Phi_{16}) / 4 + (\Phi_{95} - \Phi_5) / 6.6 \quad (2)$$

$$SK_I = (\Phi_{16} + \Phi_{64} - 2\Phi_{30}) / 2(\Phi_{64} - \Phi_{16}) + (\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}) / 2(\Phi_{95} - \Phi_5) \quad (3)$$

$$K_G = (\Phi_{95} - \Phi_5) / 2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25}) \quad (4)$$

式中: Φ_n 代表累积百分含量为 $n\%$ 时的粒径,根据 Krumbein 公式^[28]对数转化而得:

$$\Phi = -\log_2^R \quad (5)$$

式中: R 为颗粒直径,mm.同时,根据 Folk-Ward 粒度参数分级标准^[27],研究分析道路灰尘的粒度参数特征.

根据王国梁等^[29]修正的 Tyler 颗粒体积分形模型^[30],如果道路灰尘的粒度分布是分形的,应满足:

$$V(r < R_i) / V_T = (R_i / R_{\max})^{3-D} \quad (6)$$

式中: $V(r < R_i) / V_T$ 表示粒径小于 R_i 的体积累积百分含量; R_{\max} 表示最大粒径; D 表示道路灰尘的粒度分布分形维数.将(6)式两边取对数可得:

$$\lg[V(r < R_i) / V_T] = (3-D) \lg[R_i / R_{\max}] \quad (7)$$

根据(3-D)是 $\lg[V(r < R_i) / V_T]$ 和 $\lg[R_i / R_{\max}]$ 拟合直线的斜率可计算分形维数 D .

2 结果与讨论

2.1 单颗粒微观形貌特征

四季道路灰尘样品于扫描电镜下分别选取单颗粒(共约 150 个)进行微观形貌及能谱分析,结果表明四季道路灰尘单颗粒形貌特征及元素组成相似,包含 3 类颗粒:矿物颗粒,轮胎磨损颗粒及球型燃烧颗粒(图 1)。高度风化破碎的矿物颗粒

含量最高(80%~90%)(图 1a),这类颗粒含硅、铝、钙和钠,主要来自于周边土壤侵蚀及大气颗粒物沉降,并含有建筑施工及人行道磨损等部分人为源贡献^[31]。部分颗粒中含有标记元素硫和锌,并具有橡胶碎屑类似形貌特征(图 1b),可鉴定为轮胎磨损颗粒^[32-35]。少量表面光滑的球形燃烧颗粒(<5%)(图 1c)即飞灰可能来自于煤炭燃烧过程^[36],这类颗粒主要含有钙、硅、氧和铁。

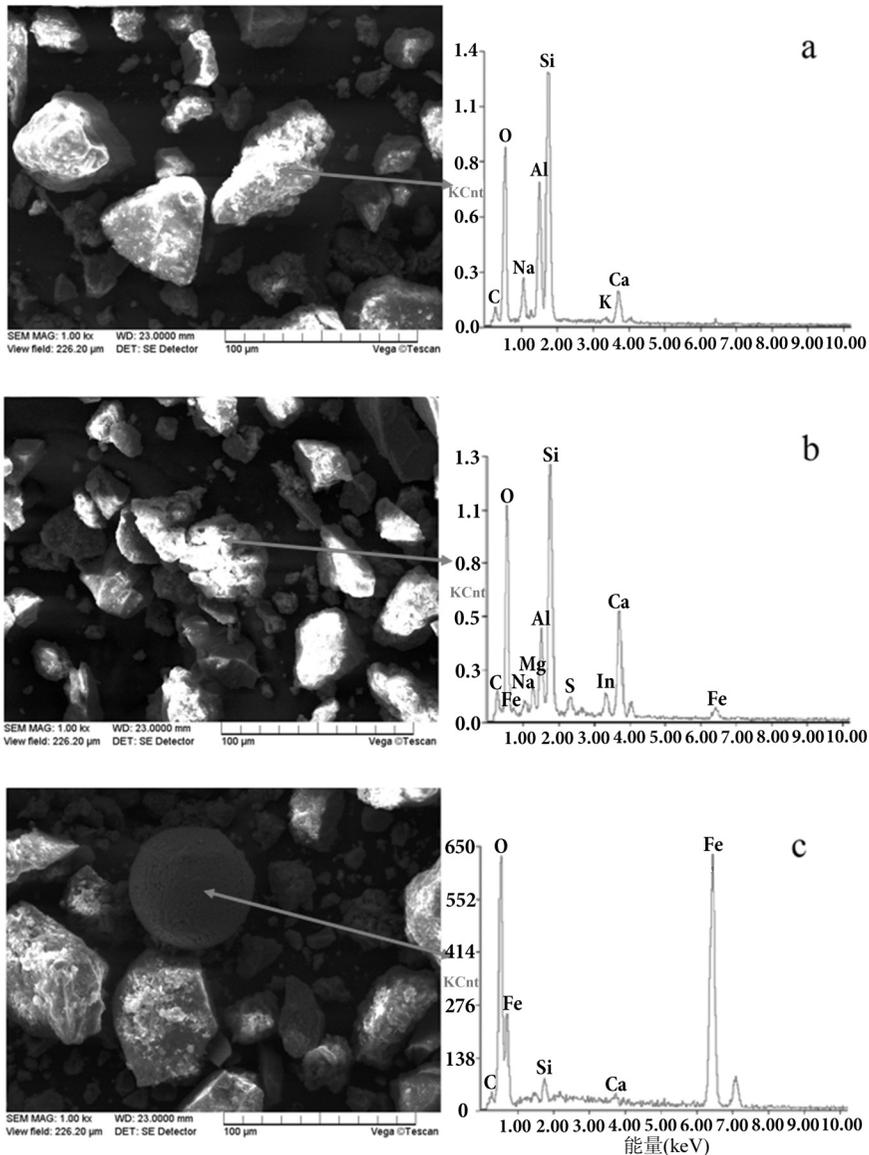


图 1 四季道路灰尘典型颗粒 SEM-EDS 图(a)矿物颗粒,(b)轮胎磨损颗粒,(c)球形燃烧颗粒

Fig.1 SEM images and EDS spectrums from road dust particles in temporal changes (a) mineral matter, (b) tire wear particle and (c) spherical combustion product

2.2 粒度分布频率曲线及累积频率曲线

采集的四季道路灰尘样品粒径分布频率曲线如图 2a 所示,四季均呈头短尾长的负偏态双峰型分布,粒径众数值大于中位数和均值,峰偏向粒径较粗的一侧.第一峰值粒径介于 256~303 μm ,粒度范围较大,其占全部颗粒物的体积分数约为 7.1%~7.5%,第二峰值粒径介于 74~88 μm ,粒度范围较小,其占全部颗粒物的体积分数约为 5.3%~6.6%.可以认为北京城区四季道路灰尘的双峰型分布特征反映了道路灰尘的多源性,同时也说明颗粒物来源比较稳定.根据"黏粒组-粉砂组-砂粒组"^[37]三因分类三角图解法,北京城区四季道路灰尘均属砂土,组成以作为较粗组分的砂粒(>63 μm)为主,占 52.42%~94.40%,其次为粉砂(4~63 μm),占 5.60%~47.16%,而作为较细组分的黏土(<4 μm)最少,含量<4.15%.

地表颗粒物的粒径决定其在风力作用下的运动状态、输送方式以及输送距离.研究表明,粒径在 70~500 μm 及 >500 μm 的颗粒物主要以跃移及蠕移方式在地表输送,属于局地物质;粒径在 20~70 μm 的颗粒物主要作短时悬浮,属于区域物质;粒径<20 μm 的颗粒物可在对流层中长期悬浮并被气流搬运到几 km 以外,属于远源物质^[38].由

四季道路灰尘样品的频率曲线可以看出,第一峰值组分(256~303 μm)及第二峰值组分(74~88 μm)均属于局地物质,可以跃移方式在近地层一定距离运动.四季样品的累积频率曲线(图 2b)均呈细粒尾较长的不对称"S"型,且在 10~40 μm 有明显的拐点,粗颗粒物含量较多,这与频率曲线所反映的特征基本一致,进一步佐证四季北京城区道路灰尘均大部分来自于局地物质,远源沙尘贡献物质<10%.也就是说,局地市内来源(市内建设作用、市内交通作用、市内汽车尾气、市内颗粒物排放)^[39]对四季北京城区道路灰尘贡献大,直接通过大气环流远程搬运并沉降于道路表面的灰尘相对较少.

比较四季道路灰尘粒径分布特征发现,夏、秋、冬季道路灰尘粒度分布模式基本一致,春季样品第二峰值粒径相比其他 3 个季节不明显,含量约为 5.30%,且细粒尾较长,含量比其他 3 个季节高 2~3 倍.结合分析北京市气象局资料显示,北京地区春季受上游的蒙古国、内蒙、河北西北部地区大范围沙尘暴影响,伴随 3 次明显降雪过程,可以有效地将滞留在大气里的沙尘暴细粒粉尘带至地面,这也就解释了春季道路灰尘细粒组分含量略高的原因.

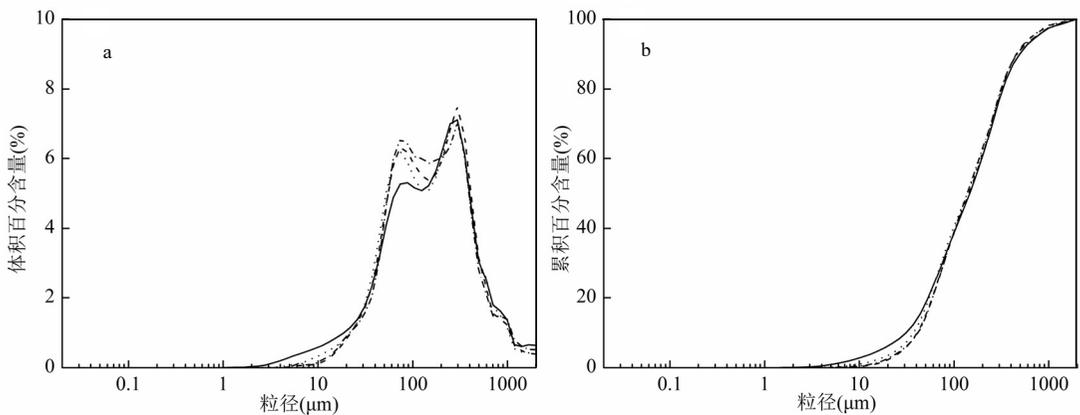


图 2 北京城区四季道路灰尘频率曲线及累积频率曲线

Fig.2 Frequency curves and cumulative frequency curves of urban road dust in temporal changes in Beijing

——春夏 ----秋 -.-.-冬

2.3 粒度分布分形维数

道路灰尘的粒度分布分形维数 D 可描述颗

粒组成的均匀程度,分维数越大,颗粒的粒径越小,细粒含量越高,质地组成越不均匀,反之亦然.四

季道路道路灰尘的粒度分布分形维数 D (图 3) 为 1.7533~2.3137, 表明在一定的粒径范围内存在自相似的粒径分布^[40]. 春季道路灰尘的粒度分布分形维数 D 在 2.0028(采样点 2C、3C) 至 2.3137(采样点 11E) 之间, 平均为 2.0976, 拟合决定系数介于 0.8305~0.9409; 夏季道路灰尘的粒度分布分形维数 D 在 1.7533(采样点 1C) 至 2.1695(采样点 11E) 之间, 平均为 2.0118, 拟合决定系数介于 0.7557~0.9113; 秋季道路灰尘的粒度分布分形维数 D 在 1.8066(采样点 11C) 至 2.2674(采样点 14C) 之间, 平均为 1.9871, 拟合决定系数介于 0.6906~0.9168; 冬季道路灰尘的粒度分布分形维数 D 在 1.8190(采样点 3C) 至 2.1720(采样点 5M) 之间, 平均为 1.9758, 拟合决定系数介于 0.6950~0.9149. 道路灰尘的粒度分布分形维数总体上春季>夏季>秋季>冬季的特点, 并且四季道路灰尘的分形维数均小于南京市(2.302~2.541)^[24] 及芜湖市高新区(2.54~2.74)^[25-26], 接近于北京市 PM_{10} 的分形维数(1.64~2.67)^[41].

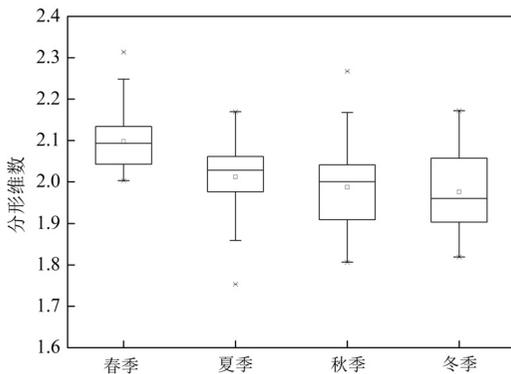


图 3 北京城区四季道路灰尘颗粒体积分形维数
Fig.3 Volume fractal dimension of urban road dust particles in temporal changes in Beijing

2.4 粒度参数及环境意义

粒度参数可综合反应沉积物粒度特征及沉积环境(表 2). 平均粒径 M_z 代表粒度分布的集中趋势, 反映搬运介质平均动能和源区物质粒度分布. 依据北京城区空间结构呈同心圆形态, 以二环路、三环路及四环路为界, 把市区分为二环路以内、二环路到三环路内、三环路到四环路内 3

部分进行量化分析(图 4), 发现春季道路灰尘平均粒径呈现从二环路以内向外依次递减规律(二环路以内 $210.00\mu\text{m}$ >二环路到三环路内 $201.85\mu\text{m}$ >三环路到四环路内 $183.72\mu\text{m}$); 夏季也呈现从二环路以内向外依次递减规律(二环路以内 $218.76\mu\text{m}$ >二环路到三环路内 $167.90\mu\text{m}$ >三环路到四环路内 $163.92\mu\text{m}$); 而秋季平均粒径在二环路以内最细(三环路到四环路内 $195.94\mu\text{m}$ ~二环路到三环路内 $195.71\mu\text{m}$ >二环路以内 $185.96\mu\text{m}$); 冬季平均粒径无梯度规律性(三环路到四环路内 $207.66\mu\text{m}$ >二环路以内 $191.32\mu\text{m}$ >二环路到三环路内 $167.78\mu\text{m}$), 这可能与北京冬季多风的气候有关, 导致市内空气紊流加剧, 加上地面人类扰动, 道路灰尘多次扬起, 混合较均匀. 梁涛等^[15]研究发现, 昆明市旱季、雨季街道灰尘的中值粒径、算术平均粒径均无从市中心到郊区的明显变化规律性. 刘春华等^[11]发现北京市秋季样品平均粒径有沿盛行西北风向由西北至东南逐渐减小的趋势, 而春季所取样品无明显趋势. 本研究中路灰尘平均粒径分布季节变化明显, 但空间变化趋势与盛行风向不一致, 可能是由于四季道路灰尘均主要为近地层跃移颗粒, 其运动不仅受所在地范围常年季节性风速、风向影响, 还和地表湿性、粗糙度状况有关.

分选系数反映粒度的分散和集中程度, 常被用作环境指标. 四季样品分选系数范围为春 1.14~3.37, 夏 1.19~3.32, 秋 1.71~3.40, 冬 1.77~4.11, 即属于分选性较差(1.00~2.00)到分选性差(2.00~4.00)范围内, 且冬季样品中有 1 个样品位于分选性极差(>4.00)范围内. 表明道路灰尘大部分具有同源性的同时也存在一定大气环流远程搬运产生的差异.

偏度 SK_i 实质上反映粒度分布的不对称程度. 春季样品的偏度范围为 0.31~0.70, 位于极正偏+0.30~+1.00 范围内. 夏季、秋季和冬季样品的偏度范围分别为 0.22~0.74、0.23~0.78 和 0.22~0.78, 其中有 1~2 个样品的偏度位于正偏+0.10~+0.30 范围内, 其余样品偏度均在极正偏+0.30~+1.00 范围内, 与道路灰尘频率曲线及累积频率曲线反映出的特征一致. 由此可看出四季道路灰

尘样品频率曲线形态均极不对称,峰在粗粒度一侧,细粒度一侧有一低的头部,即道路灰尘中粗粒径粉尘出现.

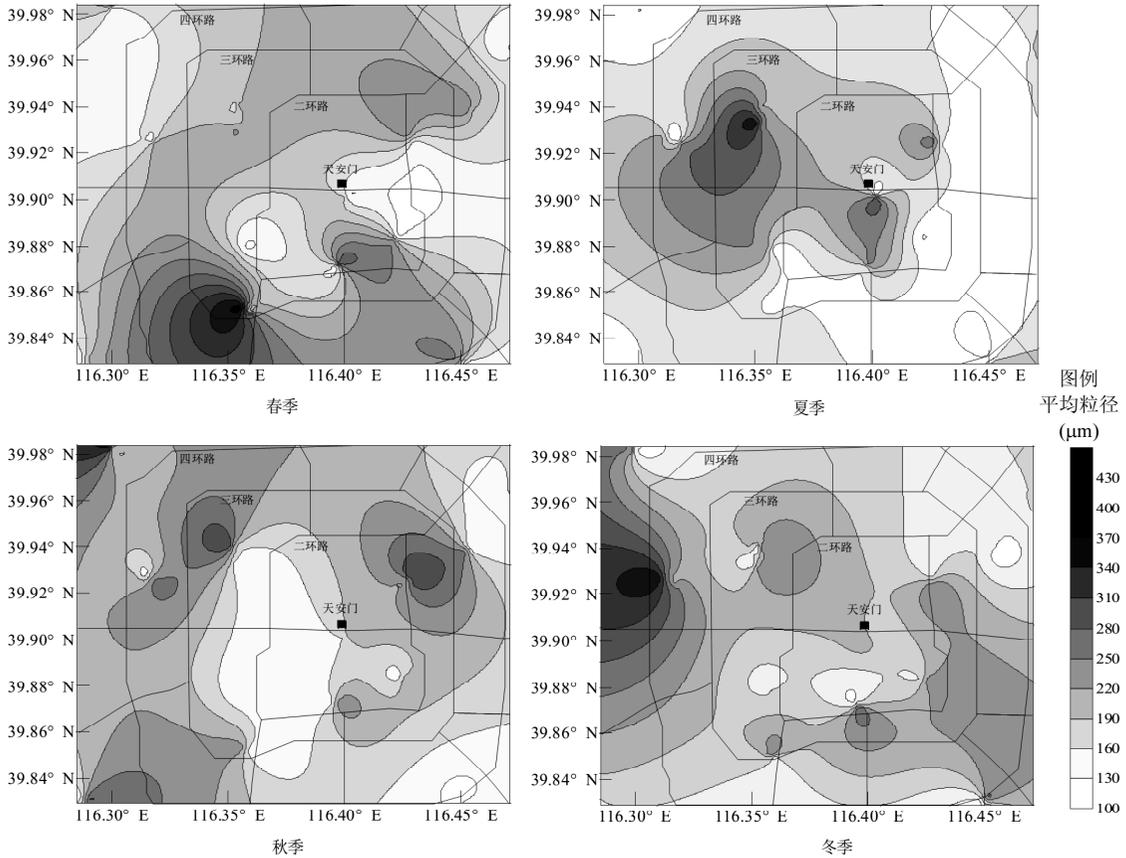


图 4 北京城区道路灰尘平均粒径时空分布特征

Fig.4 Spatial and temporal distribution of average particle size in urban road dust in Beijing

峰度可用来衡量频率曲线峰凸程度.四季样品峰度范围为春季 0.76~1.85,夏季 0.77~2.13,秋季 0.67~3.86,冬季 0.64~2.64,即峰态包括宽峰态(0.67~0.90)、中等峰态(0.90~1.11)、窄峰态(1.11~1.50)和很窄峰态(1.50~3.00),且秋季样品中有 1 个样品位于极窄(>3.00)范围内,冬季样品中有 1 个样品位于很宽(<0.67)范围内.由此进一步说明远程搬运风尘在不同采样点对道路灰尘粒度特征产生影响.

研究四季道路类型灰尘样品粒度参数发现,平均粒径春季>秋季>夏季~冬季,分选系数夏季~秋季>冬季>春季,偏度无较大区别,峰度冬季>秋季>夏季~春季.根据粒度参数的数学和物理意

义^[42-43]研究四季道路类型灰尘样品粒度参数发现:春季道路灰尘平均粒径最粗,分选系数、偏度与峰度均最小,可以判定粒径在较粗粒径的小邻域内分散的分布,无明显极端粗粒径出现.夏季道路灰尘平均粒径最细,分选系数与偏度最大,峰度较小,可以判定粒径在细粒径的大邻域内相对分散的分布,且出现明显极端粗粒径分布.秋季道路灰尘平均粒径较大,分选系数、偏度与峰度均较大,可以判定粒径在较粗粒径的较大邻域内相对集中的分布,且出现极端粗粒径分布.冬季道路灰尘平均粒径较小,分选系数较小,偏度与峰度最大,可以判定粒径在较细粒径的较小邻域内集中的分布,且出现明显极端粗粒径分布.

表 2 北京城区四季道路灰尘粒度参数

Table 2 Particle size parameters of urban road dust in temporal changes

季节	粒度参数				
		平均粒径(M_z)(μm)	分选系数(σ_f)	偏度(SK_f)	峰度(KG)
春季 ($n=43$)	范围	112.3~446.9	1.14~3.37	0.31~0.70	0.76~1.85
	平均值	200.20	2.39	0.48	1.17
	SD	69.55	0.62	0.09	0.26
夏季 ($n=43$)	范围	120.2~371.2	1.19~3.32	0.22~0.74	0.77~2.13
	平均值	188.08	2.56	0.52	1.19
	SD	60.40	0.49	0.13	0.33
秋季 ($n=43$)	范围	116.7~370.2	1.71~3.40	0.23~0.78	0.67~3.86
	平均值	191.69	2.56	0.51	1.26
	SD	61.48	0.53	0.14	0.53
冬季 ($n=43$)	范围	98.6~367.2	1.77~4.11	0.22~0.78	0.64~2.64
	平均值	188.76	2.49	0.52	1.36
	SD	56.67	0.58	0.15	0.49

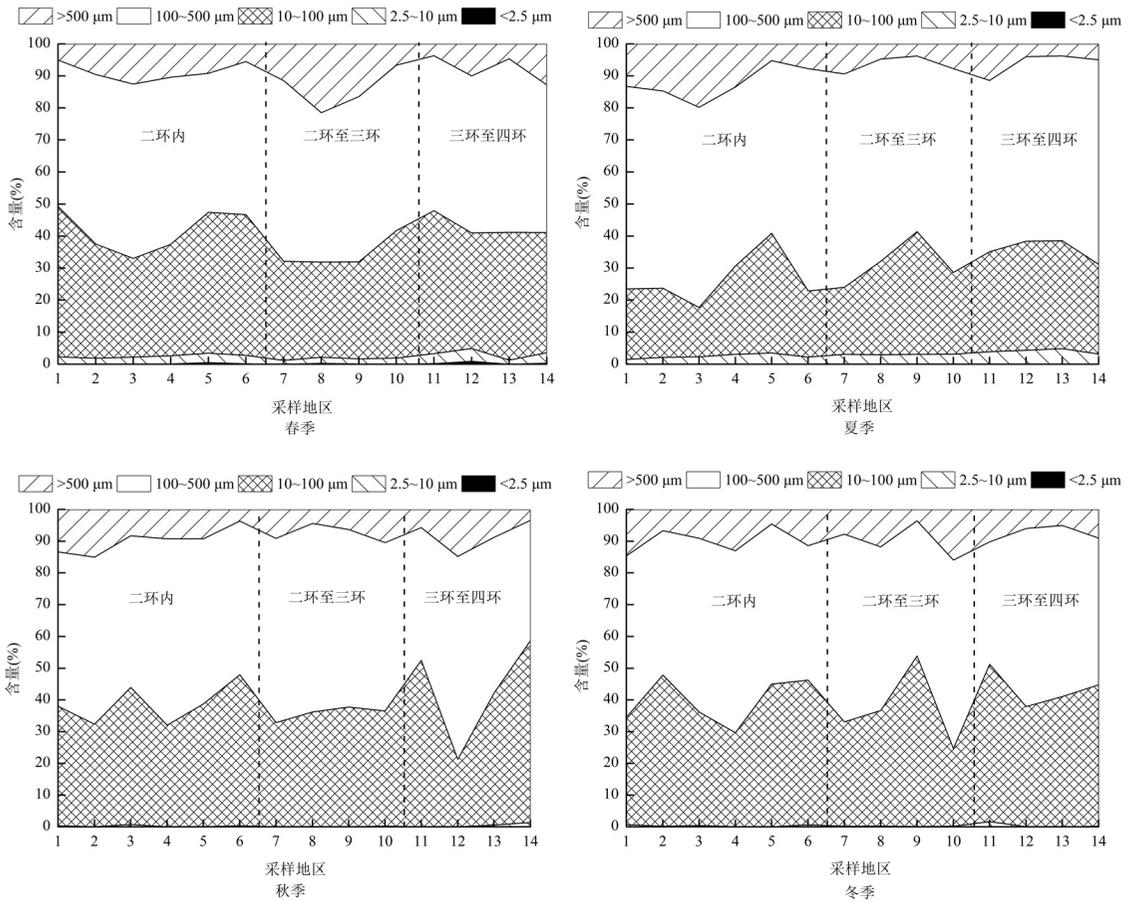


图 5 北京城区四季道路灰尘细颗粒含量

Fig.5 Size distribution of urban road dust in Beijing

依据不同粒级地表颗粒物在风力作用下的运动特点和对人类健康的影响,参照大气颗粒物粒级划分标准进行道路灰尘粒级划分(图 5)。结果表明:粒径 $<2.5\mu\text{m}$ 的道路灰尘只在春季样品中检出,含量平均为 0.16%。粒径 $<10\mu\text{m}$ 的灰尘含量也存在季节差异,春季样品中含量最高(平均值为 2.49%),其次为夏季样品(0.81%),冬季(0.37%)和秋季(0.29%)样品均处于较低水平。粒径 $<100\mu\text{m}$ 的灰尘含量差异不显著,其平均含量为 40.07%~41.88%。综合比较北京城区 4 季道路灰尘的粒度组成特征可以认为,春季灰尘粒度明显要比其他 3 个季节细,粒径 $<10\mu\text{m}$ 的灰尘含量比其他三季道路灰尘高 3 倍以上,并含有粒径 $<2.5\mu\text{m}$ 的灰尘,说明春季道路灰尘对城区空气环境及人体健康具有重要影响,应在春季通过冲洗后清扫等方式降低路面尘负载。

3 结论

3.1 四季道路灰尘单颗粒微观形貌特征显示 3 类颗粒:矿物颗粒,轮胎磨损颗粒及球型燃烧颗粒。其中高度风化破碎的矿物颗粒含量最高(80%~90%)。

3.2 四季道路灰尘粒度分布频率曲线及累积频率曲线相似,均呈负偏态双峰型分布,第一峰值粒径介于 256~303 μm ,第二峰值粒径介于 74~88 μm 。受西北沙尘暴及降雪影响,春季道路灰尘细粒组分含量略高。四季道路灰尘主要来自跃移搬运的局地物质,而直接通过大气运移沉降至道路表面的远源灰尘相对较少。

3.3 四季道路道路灰尘的粒度分布分形维数与北京 PM_{10} 近似,为 1.7533~2.3137。

3.4 四季道路灰尘平均粒径为 188.08~200.20 μm ,粗颗粒物含量较大,分选性在差到较差之间,呈极不对称的极正偏宽峰态到很窄峰态,属以砂粒成分为主的砂土。平均粒径春季 $>$ 秋季 $>$ 夏季 \sim 冬季,分选系数夏季 \sim 秋季 $>$ 冬季 $>$ 春季,峰度冬季 $>$ 秋季 $>$ 夏季 \sim 春季,偏度无较大区别。春季灰尘可吸入颗粒物最高,并含有可入肺颗粒物,对人体健康和大气环境的危害潜力不容忽视。

参考文献:

- [1] Shi G, Chen Z, Xu S, et al. Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008,156(2):251-260.
- [2] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005,39(25):4501-4512.
- [3] Charlesworth S, Everett M, McCarthy R, et al. A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK [J]. *Environment International*, 2003,29(5):563-573.
- [4] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4):726-733.
- [5] 李如忠,童芳,周爱佳,等.基于梯形模糊数的地表灰尘重金属污染健康风险评估模型 [J]. *环境科学学报*, 2011,31(8):1790-1798.
- [6] 杜佩轩,田晖,韩永明,等.城市灰尘粒径组成及环境效应-以西安市为例 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2002,21(1):93-98.
- [7] Abrahams, P W. Soils: their implications to human health [J]. *Science of the Total Environment*, 2002,291(1-3):1-32.
- [8] 周恋彤,董黎明,赵钰.北京城区冬季道路灰尘粒度特征分析 [J]. *中国环境监测*, 2014,30(4):37-43.
- [9] 王小梅,赵洪涛,李叙勇,等.北京城区城乡街尘中铅污染分异特征研究 [J]. *土壤*, 2011,43(2):232-238.
- [10] 王铮,华蕾,胡月琪,等.北京市无组织排放源颗粒物的粒度分布 [J]. *中国环境监测*, 2007,23(2):75-78.
- [11] 刘春华,岑况.北京市街道灰尘粒度特征及其来源探析 [J]. *环境科学学报*, 2007,27(6):1006-1012.
- [12] 杨忠平,张强,张梁,等.长春市城区近地表灰尘粒度特征及其环境意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014,44(1):319-327.
- [13] 窦筱艳,陆炳,孔少飞,等.西宁市典型开放源颗粒物粒径组成特征分析 [J]. *中国环境监测*, 2013,29(2):113-119.
- [14] 刘德鸿,王发园,寇太记.洛阳市不同功能区地表灰尘重金属的粒径分布特征 [J]. *生态环境学报*, 2012,21(4):700-705.
- [15] 梁涛,史正涛,刘志国.昆明市街道灰尘粒度特征及其环境意义 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011,20(1):122-128.
- [16] Kaye B H. 分形漫步 [M]. 徐新阳,康雁,陈旭,等译.沈阳:东北大学出版社,1994,1-15.
- [17] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain, statistical self-similarity and fractional dimension [J]. *Science*, 1967, 156(3775):636-638.
- [18] 张治伟,傅瓦利,朱章雄,等.石灰岩区土壤分形特征及其与土壤

- 性质的关系 [J]. 土壤, 2009,41(1):90-96.
- [19] 刘雪梅. 土壤粒径分布的多重分形描述 [J]. 安徽农业科学, 2008,36(24):10557-10559.
- [20] 张季如, 朱瑞庚, 祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征 [J]. 水利学报, 2004,4:67-71,79.
- [21] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究 [J]. 土壤与环境, 2000,9(4):263-265.
- [22] Harris S J, Maricq M M. Signature size distributions for diesel and gasoline engine exhaust particulate matter [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001,32(6):749-764.
- [23] 杨书申, 邵龙义, 沈蓉蓉, 等. 上海市大气可吸入颗粒物的粒度分布分形特征 [J]. 中国环境科学, 2007,27(5):594-598.
- [24] 李传统, 贾荷花. 南京市区路面积尘的物理与化学特性实验研究 [J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2009,9(3):28-32.
- [25] 张志明, 方凤满, 余 键, 等. 城市地表灰尘颗粒体积分形特征及其吸附性 [J]. 生态环境, 2008,17(5):1887-1890.
- [26] 张志明, 方凤满, 杨 丁, 等. 城市地表灰尘的分形特性分析 [J]. 土壤, 2010,42(1):142-147.
- [27] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957,27:3-26.
- [28] Krumbein W C. Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1938,8:84-90.
- [29] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用 [J]. 土壤学报, 2005,42(4):545-550.
- [30] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989,53:987-996.
- [31] 李卫军, 邵龙义, 余 华, 等. 内陆输送过程中沙尘单颗粒类型及其非均相反应 [J]. 中国环境科学, 2008,28(3):193-197.
- [32] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust [J]. *Environment International*, 2004,30(8):1009-1017.
- [33] Camatini M, Crosta G F, Dolukhanyan T, et al. Microcharacterization and identification of tire debris in heterogeneous laboratory and environmental specimens [J]. *Materials Characterization*, 2001,46(4):271-283.
- [34] Gent A N. A hypothetical mechanism for rubber abrasion [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1989,62:750-756.
- [35] White J R, Thomas E L. Advances in SEM of polymers [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1984,57:457-506.
- [36] Goodarzi F. Characteristics and composition of fly ash from Canadian coal-fired power plants [J]. *Fuel*, 2006,85(10/11):1418-1427.
- [37] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1981:8-26.
- [38] Pye K. *Aeolian dust and dust depositions* [M]. London: Academic Press, 1987:49.
- [39] 杜佩轩, 田秉晖, 韩永明. 城市灰尘概念、研究与方法 [J]. 陕西地质, 2004,22(1):73-79.
- [40] 李 嘉, 周 鲁, 李克锋. 泥沙粒径分布函数的分形特征与吸附性能 [J]. 泥沙研究, 2003(6):17-20.
- [41] 邵龙义, 沈蓉蓉, 杨书申, 等. 北京市 PM₁₀ 粒度分布分形维数特征 [J]. 中国矿业大学学报, 2008,37(3):407-411.
- [42] 徐 跃, 朱 彬, 刘卓谔, 等. 时域内污染物浓度的统计学指标评价方法研究 [J]. 环境工程, 2011,29(增刊):260-263.
- [43] 张正德, 董治宝, 腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征 [J]. 中国环境科学, 2011,31(11):1789-1794.

作者简介: 周恋彤(1991-), 女, 北京人, 北京工商大学硕士研究生, 主要从事重金属环境行为及迁移转化机理等研究。