

# 我国地表矿物质颗粒物的粒度分布与来源

娄高僮<sup>1</sup>, 罗 源<sup>1,2</sup>, 陈 渔<sup>1</sup>, 陈思宇<sup>1\*</sup> 1. 兰州大学 大气科学学院 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000 2. 湖南省气象台, 长沙 410118

摘 要:下垫面的地表矿物质颗粒物是大气气溶胶的源和汇,对生物地球化学循环、环境状况和人体健康 产生影响。下垫面地表矿物质颗粒物的粒度分布是表征颗粒行为的重要参数,颗粒物的物理性质、化学 性质和环境学性质等都与粒径有关。为探究人为下垫面(城市铺装道路、农村土路和农田等)和自然下 垫面(沙漠和戈壁)地表矿物质颗粒物的粒径分布,并分析其影响因素,对城市铺装道路、农村土路、 裸露农田、沙漠和戈壁下垫面的地表矿物质颗粒物进行粒度研究。结果表明:从沉积物中值粒径来看, 城市铺装道路表现为佛山市南海区(254.9 μm)>杭州市桐庐县(247.5 μm)>北京市(201.3 μm)> 南平市延平区(178.7 μm)>兰州市(65.5 μm);赣州市湖江镇农村土路为131.3 μm;兰州市榆中县裸 露农田为21.1 μm;沙漠和戈壁表现为腾格里沙漠(272.7 μm)>塔克拉玛干沙漠(121.9 μm)。总体 来说,地表矿物质颗粒物的粒度分布与人类活动、地理位置、风速和季节等因素密切相关,人类活动对 粒度分布的影响因人类活动的复杂而难以明确,风速不同将裹挟不同粒径颗粒物,不同季节风速与风向 不同,不同地理位置人类活动与风速存在差异。样本中,除兰州市外,城市铺装道路的地表矿物质颗粒 物主要来自土壤、工地和交通活动等局地源,远距离传输来的颗粒物较少;沙漠沉积物的来源为单一的 局地物质;沙漠沉积物中重金属含量表现出随粒径变大而减小的趋势。 关键词:地表矿物质颗粒物;粒度分布;沙漠;城市铺装道路;农村土路;重金属

# Grain size distribution and source of surface mineral particles

LOU Gaotong<sup>1</sup>, LUO Yuan<sup>1, 2</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, CHEN Siyu<sup>1\*</sup>

1. Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Meteorological Observatory of Hunan Province, Changsha 410118, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Surface mineral particles on the land cover are the source and sink of atmospheric aerosols, which make significant contributions to biogeochemical cycle, environmental conditions and human health. The particle size distribution of surface mineral particles on the land cover is a kind of vital parameter to characterize particle behavior, and the physical, chemical and environmental properties of particulate matters are related to particle size. Due to the influence of natural and anthropogenic activities, the formation,

收稿日期:2021-12-06;录用日期:2022-01-30;网络出版:2022-02-18

Received Date: 2021-12-06; Accepted Date: 2022-01-30; Online first: 2022-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(U2242209, 42175106, 91837103);中国博士后科学基金(2020M681156)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (U2242209, 42175106, 91837103); China Postdoctoral Science Foundation (2020M681156)

通信作者:陈思宇,E-mail:chensiyu@lzu.edu.cn

Corresponding Author: CHEN Siyu, E-mail: chensiyu@lzu.edu.cn

引用格式:娄高僮,罗 源,陈 渔,等.2023.我国地表矿物质颗粒物的粒度分布与来源[J].地球环境学报,14(2):145-155.

Citation: Lou G T, Luo Y, Chen Y, et al. 2023. Grain size distribution and source of surface mineral particles [J]. Journal of Earth Environment, 14(2): 145–155.

#### 146

#### 地球环境学报

characteristics, release and transportation of surface mineral particles on distinct land covers vary significantly. For the purpose of revealing the impact of surface mineral particles on natural and anthropogenic disturbed land covers, the particle size of surface mineral particles on the bottom surface of urban paved roads, rural dirt roads, deserts and farmland is studied in this paper. *Materials and methods* Sand grains with a depth of 0-1 cm on the surface are collected uniformly in the desert; urban paved roads, rural dirt roads and bare farmland are collected using brushes and shovels with approximately 30 g per sample. For urban paved road sampling, the specific sampling area is an area near the curb (1-2 m). For farmland and rural dirt road sampling, the winter fallow period was chosen. The collected samples are naturally air-dried for 24 h, as well as the samples are filtered through a clean 20-mesh standard inspection sieve to remove plant debris, hairs, pebbles and other debris. The filtered samples are stored in sealed bags and used as the original samples. The particle size tests are tested by Malvern Mastersizer 2000 laser particle size analyzer and the composition tests are performed by a Magic PW2403 X-ray fluorescence spectrometer. Results As for the size of median diameter, in terms of urban pavement, Nanhai District of Foshan City (254.9 μm) > Tonglu County of Hangzhou City (247.5 μm) > Beijing City (201.3 µm) > Yanping District of Nanping City (178.7 µm) > Lanzhou City (65.5 µm); while for deserts and gobi, Tengger Desert (272.7  $\mu$ m) > Taklimakan Desert (121.9  $\mu$ m). In regard to rural dirt roads, the rural dirt roads in Hujiang Town of Ganzhou City is 131.3 µm. As far as the bare farmland is concerned, the farmland in Yuzhong County of Lanzhou City is 21.1 µm. The particle size distribution curve of urban paved road sediment exhibits a bimodal distribution in Lanzhou City, Gansu Province. The Taklimakan Desert shows a triple-peaked distribution. Ganzhou City, Jiangxi Province presents a bimodal distribution. Moreover, the agricultural soils in Tengger Desert and Yuzhong County, Lanzhou City illustrate a single-peaked distribution. *Discussion* (1) Beijing employs the characteristics of small median diameter, high content of fine particles, and low volume fraction in areas with low population density. The median particle size in Beijing is 219.2 µm in winter and 187.5 µm in summer, and the proportion of fine particles in summer is higher than that in winter. The particle size distribution of urban paved road sediment is closely related to the wind speed size and geographical location, and the particle size distribution is concentrated when the wind speed is high. When the wind speed is high the wind speed is low and there are many sand sources around, the proportion of fine particles is high and the particle size is small. (2) Surface mineral particulate matter in Beijing, Nanhai District, Foshan City, Tonglu County, Hangzhou City, and Yanping District, Nanping City, mainly stems from local sources such as soil, construction sites, and traffic activities. The sources of Lanzhou City are more complex, and the atmospheric circulation transports the mixture of local and regional materials. The Taklimakan Desert and Tengger Desert have only a single source, and there are relatively many foreign substances in the Taklimakan Desert. (3) The grain size effect of heavy metals in desert sediments is significant, and the content shows a tendency to decrease gradually with the increase of particle size. Compared with Shanghai and other cities, the particle size effect of heavy metals in paving road sediments in Beijing and Lanzhou is not obvious, which may be influenced by surrounding sand sources. *Conclusions* The particle size distribution of surface mineral particulate matter is closely related to human activities, geographical location, and seasons. Surface mineral particles from urban paved roads come from local sources such as soil, construction sites, and traffic activities, with less particulate matter coming originate from long-distance transport, and desert sediments come from a single local source. In addition, with the increase of particle size, the content of heavy metals in desert sediments shows a downward trend. Recommendations and perspectives In this paper, the differences of geography, economic development, and anthropogenic activities were taken into account when selecting sampling locations. However, owing to the difficulty of collecting samples on a large scale, there are few data at some sample points, which need to be further improved in future research. Key words: surface mineral particles; grain size distribution; desert; urban paved roads; rural dirt roads; heavy metal

下垫面是大气与其下界的固态地面或液态水 面的分界面,是大气的主要热源和水汽源,也是 低层大气运动的边界面(方如康, 2003)。下垫 面的地表矿物质颗粒物是大气气溶胶的源和汇, 不仅包含了远处传输而来的混合物质,还会在地 面风速、边界层内的湍流结构与大气环流背景的 共同作用下进入大气并输送至其他地区,对生物 地球化学循环、环境状况和人体健康产生影响 (王耀庭等, 2002; 周秀骥等, 2002)。例如: 地表矿物质颗粒物给海洋中的浮游植物带去氮、 磷、铁和锌等元素,引起海洋浮游植物的快速 繁盛 (Baker et al., 2003; 韩永翔等, 2006; Hsu et al., 2009)。此外, 地表矿物质颗粒物表面会 吸附大量的细菌病毒和其他有害物质,进入人体 器官组织使人产生呼吸系统疾病、心血管疾病等 (Tao et al., 2012) 。

下垫面地表矿物质颗粒物的粒度分布是表征 颗粒行为的重要参数,颗粒物的物理性质、化学 性质和环境学性质等都与粒径有关。粒径≤125 μm 的颗粒容易吸附在皮肤上;≤100 μm 的颗粒物容 易在风力、交通活动等作用下,以悬浮方式进入 大气并长期滞留和运移;≤66 μm 的颗粒物是城市 大气颗粒污染物的主要来源,一般在降水或静风 条件下才会降落到地表(de Miguel et al., 1997; 杨忠平等,2014);粒径≤10 μm 的可吸入颗粒 物容易进入人体,对环境和人体都有严重的危害 (Pope et al., 2002; Zanobetti et al., 2009)。此 外,地表颗粒物释放到大气中可通过影响辐射收 支、作为云凝结核来改变云反照率和寿命从而间 接影响降水,对天气气候产生影响(石广玉等, 2008; Huang et al., 2015)。

受自然和人为活动的影响,不同下垫面地表 矿物质颗粒物形成、特性及释放和输送均有巨大 差异(Chen et al., 2019)。对自然(沙漠和戈 壁)和人为裸露下垫面(城市铺装道路、农田土 路和农田)地表矿物质颗粒物的粒度开展研究, 是气溶胶特别是沙尘气溶胶环境和气候效应研究 的基础。近年来,对我国主要沙漠的沉积物进行 粒度研究取得了重要成果,如:与塔克拉玛干沙 漠和腾格里沙漠的沉积物相比,巴丹吉林沙漠沙 丘沙的平均粒径较大,**Φ**的范围为 2.104—2.706 (钱广强等,2011);库姆塔格沙漠的粒径集中 在中沙(250—500 µm)和细沙(125—250 µm)

(何清等,2009);塔克拉玛干沙漠沙丘沙样本的 平均粒度为121 μm (吉启慧, 1996); 我国主要 沙漠和沙地的粒度特征存在较大差异,平均粒径最 大的为乌兰布和东北部的巴音温都尔沙漠,最小的 为古尔班通古特沙漠和塔克拉玛干沙漠,其他沙 漠和沙地的地表组成物质以细沙为主(宋洁等, 2016)。在针对铺装道路沉积物的研究中,周恋 彤等(2014)采集北京市城区铺装道路沉积物样 品,利用激光粒度仪测试发现,铺装道路沉积物的 粒度分布曲线呈单峰或双峰型分布; 咸阳市铺装道 路沉积物也呈双峰分布,第一众数为35-75 µm, 第二众数为 280—500 µm, 平均粒径为 80 µm (史 兴民和刘卫强, 2009);昆明市铺装道路沉积物的 平均粒径为 87.1 μm, 且旱季的平均粒径大于雨季 (梁涛等, 2011); 谢远云等(2009)对哈尔滨 市几个行政区铺装道路地表沉积物的粒度组成进行 了分析,发现≤63 µm 的物质含量较多;此外,不 同功能区的粒度分布差异较大,交通区的中值粒径 最大,为143.51 µm,在文教区和居民区粒径较小 (潘虹梅, 2009)。

目前国内外的相关研究大多集中在对某一种 自然或人为下垫面的地表矿物质颗粒物开展讨 论,并且多集中在重金属及其生态健康影响上, 对自然(沙漠和戈壁)和人为裸露下垫面(城市 铺装道路、农田土路和农田)地表矿物质颗粒物 的粒度分布、来源的综合研究相对较少。因此, 本文对城市铺装道路、农村土路、农田和沙漠下 垫面的地表矿物质颗粒物进行粒度研究,讨论粒 径、粒度分布、颗粒物质地的差异及其影响因素, 并进一步解释不同下垫面地表矿物质颗粒物的粒 径大小与重金属含量的关系,以期加深地表矿物 质颗粒物粒径与人类生活关系的理解。

# 1 实验与数据

## 1.1 样品采集

城市铺装道路、农村土路与农田均使用毛刷清 扫表面,用铲子收集样本。每个样本30g左右,在 袋子上标记采样地点、时间、天气及其他信息。沙 漠样本采集表面0-1 cm深、上下均匀的沙粒。由 于风力、路缘石的阻挡以及灰尘被扫至道路两侧的 原因,在路缘石附近沉积物较多,因此,在城市铺 装道路采样时,采样区域设置为路缘石旁1-2 m 的区域,并保证采样时无风、天气晴好、无降水及 洒水车的影响。在农村土路和农田采样时,选择冬季休耕期。为保证数据的准确性和代表性,在一个 点做多次采样。样点及采样的具体区域和时间如图 1和表1所示。



本图基于自然资源部标准地图服务网(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/) 下载的审图号为 GS(2016)1585 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 样品采集点位置 Fig. 1 Locations of sample collection sites

# 1.2 样品制备和分析

采集的样本自然风干 24 h,用干净的 20 目标 准检验筛对样本进行筛分,去除植物碎屑、毛发、 小石子等杂质。将筛分过的样本用密封袋保存, 作为试验样品。试验在兰州大学西部环境教育部 重点实验室开展,使用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度测试,使用 Magic PW2403 X-射线荧光光谱仪进行成分测试。

# 2 结果与讨论

# 2.1 不同下垫面地表矿物质颗粒物的粒度对比

使用质量中值粒径(*D*<sub>50</sub>)、Sauter 平均粒径(*D*<sub>(4,3)</sub>) 与 De Brouckere 平均粒径(*D*<sub>(4,3)</sub>)来讨论四种不同下垫面地表矿物质颗粒物的粒径

差异(表2)。城市铺装道路沉积物D<sub>50</sub>表现 为:佛山市南海区(254.9 µm)>杭州市桐庐县 (247.5 µm)>北京市(201.3 µm)>南平市延平 区 (178.7 µm)>兰州市 (65.5 µm); 赣州市湖 江镇农村土路沉积物 D<sub>50</sub> 为 131.3 μm; 兰州市榆中 县裸露农田沉积物 D50 为 21.1 µm; 沙漠戈壁颗粒 物 D<sub>50</sub> 表现为: 腾格里沙漠(272.7 µm)>塔克拉 玛干沙漠(121.9 μm)。已有研究显示:北京城区 的道路灰尘平均粒径为188.08-200.20 μm (周恋 形等, 2015); 兰州市街道灰尘 D<sub>(43)</sub> 为 118.73 μm (王冠等, 2008); 塔克拉玛干沙漠沙丘沙的平 均粒径为121 µm (吉启慧, 1996)。本研究中, 城市铺装道路沉积物 D50 最大值为佛山市南海区, 最小值为兰州市,前者约为后者的3.9倍,这是因 为兰州市具有带状盆地城市特征,风速较小,地 表沉积物不易被风扬起进入大气。沙漠 D50 差异也 较大, 腾格里沙漠为 272.7 µm, 塔克拉玛干沙漠 为121.9 µm, 同一种下垫面类型的地表矿物质颗 粒物粒径特征并不相似,还需考虑较多因素。

D(1,2) 和 D(4,3) 分别定义为具有此直径的1个 颗粒的表面积(体积),正好等于所有颗粒的 表面积(体积)平均值。当D<sub>(32</sub>和D<sub>(43)</sub>的值越 接近,说明样品颗粒的形状越规则,粒度分布 越集中。D<sub>(4,3)</sub>/D<sub>(3,2)</sub>值的大小为:赣州市湖江镇 农村土路(14.9)>杭州市桐庐县城市铺装道路 (12.4)>兰州市城市铺装道路(10.2)>南平市 延平区城市铺装道路(9.7)>北京市城市铺装道 路(7.4)>佛山市南海区城市铺装道路(6.7)> 榆中县农田(5.3)>塔克拉玛干沙漠(3.0)>腾 格里沙漠(1.2)。相较其他下垫面的地表矿物质 颗粒物,沙漠沉积物形状最规则、最接近球体, 这与沙漠长期受到风化作用有关。赣州市胡江镇 的农村土路沉积物则是形状最不规则的, 与城市 街道相比,其受农田土壤、春节期间烟花爆竹燃 烧物的影响,可能造成沉积物颗粒较为复杂。

粒度分布曲线可以反映地表矿物质颗粒物中 各粒度的含量、颗粒的中值粒径和粗细部分的相 对大小(杨忠平等,2014)。图 2a 为不同地区的 城市铺装道路沉积物粒度分布曲线,由图可知: 甘肃省兰州市铺装道路沉积物粒度呈双峰分布, 第一峰值在100.0 μm以下;其他地区为单峰分 布,第一峰值在317.0—447.7 μm。兰州市城市铺 装道路沉积物粒度分布曲线的第一峰值为44.7—

50.2 µm, 体积分数为 3.5%, 第二峰值为 251.8— 282.5 um。粒度曲线的双峰分布表明:兰州市地 表矿物质颗粒物来源复杂。北京市城市铺装道路 沉积物粒度呈单峰型分布,峰值偏向粒径较粗的 一侧,范围为317.0-355.7 µm,占5.3%;粒径在 20.0—100.0 µm 的细颗粒部分占 21.8%, 可能由外 来颗粒物传输沉降造成。佛山市南海区城市铺装 道路与杭州市桐庐县城市铺装道路的沉积物粒度 分布曲线较为相似,峰值偏向粒径较粗的一侧, 第一峰值范围都在355.7-399.1 µm,该部分颗粒 分别占 6.0% (佛山市南海区)和 5.7% (杭州市 桐庐县);与北京市城市铺装道路的沉积物粒度 曲线相比, 它们在 100 µm 以下细粒部分呈现近似 线性增长。南平市延平区城市铺装道路沉积物粒 度的第一峰值为355.7-399.1 µm,该部分颗粒占 4.4%

表1 样品采集信息 Tab. 1 Sample collection information								
样本类型	地点	个数	时间					
Site type	Site	Number	Time					
城市铺装道路 Urban paved road	甘肃省兰州市	100	2017年8月,2018年3月					
	Lanzhou City, Gansu Province	109	Aug. 2017, Mar. 2018					
	北京市	196	2018年2月、8月					
	Beijing City	180	Feb., Aug. 2018					
	广东省佛山市南海区	27	2018年2月					
	Nanhai District, Foshan City, Guangdong Province	27	Feb. 2018					
	浙江省杭州市桐庐县	11	2018年2月					
	Tonglu County, Hangzhou City, Zhejiang Province	11	Feb. 2018					
	福建省南平市延平区	10	2018年2月					
	Yanping District, Nanping City, Fujian Province	10	Feb. 2018					
农村土路	江西省赣州市湖江镇	12	2018年2月					
Rural dirt road	Hujiang Town, Ganzhou City, Jiangxi Province	12	Feb. 2018					
裸露农田	甘肃省兰州市榆中县	40	2018年3月					
Bare farmland	Yuzhong County, Lanzhou City, Gansu Province	40	Mar. 2018					
沙漠	塔克拉玛干沙漠	20	2018年9月					
Desert	Taklimakan Desert	50	Sep. 2018					
戈壁	腾格里沙漠	21	2019年1月					
Gobi	Tengger Desert	51	Jan. 2019					

图 2b 为沙漠和农田土壤沉积物的粒度分布 曲线,可知:塔克拉玛干沙漠沉积物粒度呈主 次双峰分布, 主峰值在 100.2—112.5 µm, 该部 分颗粒占 8.6%, 次峰值为 563.7—632.5 µm, 占 1.2%; 腾格里沙漠沉积物粒度呈单峰分布, 峰值 为 251.8—282.5 µm, 占 8.4%。整体来看沙漠沉积 物的分选性较好,颗粒物粒径分布相对集中。赣 州市胡江镇农村土路沉积物粒度呈双峰型分布, 第一峰值为 355.7—399.1 µm, 占 3.9%, 第二峰值 为 63.3—71.0 µm, 占 2.3%。农村土路沉积物细颗 粒部分占比大,一方面是农田表层土壤在风力作 用下的输送,另一方面是受春节期间燃放烟花爆 竹的颗粒物影响。榆中县农田沉积物粒度为单峰 型分布,峰值为 31.7—35.6 µm,占 4.7%。农田曲 线形态不对称,峰偏向粗粒一侧,100.0 µm 以下

的颗粒约占全部颗粒的98.0%,极易进入大气。

造成不同下垫面地表矿物质颗粒物粒径分布差 异的原因复杂。总体来说,城市铺装道路沉积物的 粒度分布与地理位置和城市建设密切相关, 当城市 远离沙源、气象条件好且城市空气治理较好时,粒 度分布集中:当城市处于快速发展阶段且周围沙源 较多时,细颗粒部分含量高、粒径偏小。塔克拉 玛干沙漠和腾格里沙漠地区起沙风速较大,高于 全国平均值,较大的风速让沙粒之间不断摩擦、较 小的颗粒吹入大气, 使得沙粒具有形状较规则、 粒度分布集中和分选性较好的特征。兰州市地处 带状盆地,谷内风速较小,不利于颗粒物的扩散。 而南疆、甘肃北部和内蒙古等地地表植被稀疏,在 冬春季节蒙古高压与南疆蒙古一带地表热低压的 共同作用下,沙尘等细小颗粒物易传输至兰州。

150

地球环境学报

同时,兰州市工业区燃煤工厂排放的大量飞灰和 城市发展过程中的拆迁建设工程(Chen et al., 2019),导致兰州市地表沉积物以细颗粒物为主。 北京市和福建省南平市沉积物的粒度分布曲线虽 然呈现单峰分布,但在100.0 µm 以下均有一个隆 起,沉积物中含有较多细颗粒。这是因为北京受 内蒙古中东部沙漠和沙地的影响,而福建省南平 市延平区地处闽中大谷地最低处导致细颗粒物不易 被传输出去。佛山市和杭州市没有较大的外来传输 源,沉积物粒度分布相对集中。

表 2 不同地区地表矿物质颗粒物的粒径统计学数据										
	Tab. 2 0	Tab. 2         Grain size statistics of surface mineral particles in different regions								
下垫面类型	地区	统计量		D50 平均值	D <sub>(3,2)</sub> 平均值	D(4,3) 平均值	$D_{(4,3)}/D_{(3,2)}$			
Type of land cover	Site	Statistics		Mean of $D_{50}/\mu m$	Mean of $D_{(3,2)}/\mu m$	Mean of $D_{(4,3)}/\mu m$				
城市铺装道路 Urban paved road	北京市 Beijing	均值	Mean	201.3	33.3	244.9	7.4			
		范围	Range	62.6-364.1	9.8-177.1	119.1—417.4	-			
		标准差 Stand	dard deviation	68.9	18.8	53.1	—			
	兰州市 Lanzhou	均值	Mean	65.5	12.1	122.8	10.2			
		范围	Range	18.4—226.7	5.2-21.4	37.1-253.7	—			
		标准差 Stand	dard deviation	32.9	3.7	43.6	—			
	佛山市 Foshan	均值	Mean	254.9	43.4	291.5	6.7			
		范围	Range	85.6-410.3	11.5-288.1	205.1-422.9	-			
		标准差 Stane	dard deviation	72.9	43.4	58.4	-			
	杭州市 Hangzhou	均值	Mean	247.5	23.0	284.5	12.4			
		范围	Range	110.9—289.8	9.7—44.9	211.2—317.9	-			
		标准差 Stane	dard deviation	50.4	9.3	29.4	_			
	南平市 Nanping	均值	Mean	178.7	24.4	237.5	9.7			
		范围	Range	61.4—292.2	10.5-35.9	176.1-300.5	_			
		标准差 Stane	dard deviation	66.3	9.5	40.5	_			
农村土路 Rural dirt road	赣州市 Ganzhou	均值	Mean	131.3	13.9	206.4	14.9			
		范围	Range	44.9—220.1	7.1-22.8	120.8-262.4	_			
		标准差 Stane	dard deviation	66.1	5.1	49.9	_			
裸露农田 Bare farmland	兰州市 Lanzhou	均值	Mean	21.1	5.8	30.6	5.3			
		范围	Range	11.5-30.8	3.53-7.8	18.18-76.1	_			
		标准差 Stan	dard deviation	3.9	0.9	10.6	_			
沙漠 Desert	塔克拉玛干沙漠 Taklimakan Desert	均值	Mean	121.9	59.4	175.7	3.0			
		范围	Range	98.6—168.8	38.9-103.1	103.0-288.2	_			
		标准差 Stane	dard deviation	20.2	20.2	56.4	_			
戈壁 Gobi	腾格里沙漠 Tengger Desert	均值	Mean	272.7	247.3	293.6	1.2			
		范围	Range	171.4—451.4	159.3-433.6	186.5-479.3	-			
		标准差 Stand	dard deviation	81.9	76.5	82.3	-			



图 2 城市铺装道路地表矿物质颗粒物粒径分布(a),沙漠、农村道路、农田下垫面地表颗粒物粒径分布(b) Fig. 2 Grain size distribution of surface mineral particles on urban paved roads (a) and other land cover (b) over different sites

为考虑同一气候背景下人类活动对粒径的影 响,以及季节变化导致的粒度差异,分别给出了 北京市不同行政区(6个)(图 3a)和不同季节 (冬、夏)(图3c)道路沉积物的粒度分布曲 线。除大兴区为双峰型分布外,其余地区为单峰 型分布,海淀区和丰台区细颗粒部分含量也较高。 各行政区的峰值范围较为相似,均在 300.0 μm 附 近,但所占的体积分数却有所不同。中值粒径 (图 3b)表现为东、西城区(218.9 µm)>朝阳 区 (214.5 μm) > 海淀区 (193.2 μm) > 丰台区 (189.2 µm)>大兴区(166.8 µm)。行政区的 人口密度大小也表现出相同的顺序,即人口密度 低的地区,中值粒径小、细颗粒物含量高、主峰 值所占的体积分数也偏低。人口密度最低的大兴 区,在71.0-79.6 µm 处出现第二峰值,所占体 积分数为3.2%。这种情况的出现与清扫频率、 交通等人类活动有关。北京市不同人口密度地 区的1级清扫保洁城市道路数量不同。东、西 城区、朝阳区、海淀区、丰台区、大兴区分别 有 183 条、382 条、229 条、147 条、277 条、

51条。道路清扫保洁等级越高,每日清扫次数 就越多,细颗粒物越容易离地并传输到清扫次数 少的地区。同时人口密度高的地方, 地表矿物质 颗粒物的粒径因车辆经过的碾压变得更细,并且 车辆行驶产生的风力让沉积物更容易进入大气输 送至其他地方。根据图 3c 中 2018 年 2 月(冬 季)和2018年8月(夏季)北京市道路沉积物 的粒度分布曲线,冬季和夏季均为单峰型分布曲 线,峰值范围为317.0—355.7 µm,占比分别为 5.8% 和 4.8%, 前者中值粒径为 219.2 µm, 后者为 187.5 μm (图 3d)。从细粒子占比来看, 夏季的 比例高于冬季。夏季曲线在100.0 µm 以下有凸 起,0-100.0 µm 的颗粒物占 33.9%, 而冬季仅占 26.5%。相反地,冬季则是 100.0 µm 以上的颗粒物 含量较高。这可能是由于北京冬季寒冷干燥、风 速大、降水少且植被稀疏,细颗粒在风力作用下 容易散逸和形成气溶胶,使得细颗粒含量降低、 粒径变粗。夏季由于降雨量增加,大气中悬浮的 颗粒物大部分通过湿沉降到达地表,因此夏季的 细颗粒部分增加(梁涛等,2011)。



图 3 北京市 2018 年不同区域冬夏季的道路地表矿物质颗粒物粒径分布(a、c)和中值粒径(b、d) Fig. 3 Grain size distribution (a, c) and median diameter (b, d) of surface mineral particles on urban paved roads in different administrative regions of Beijing in summer and winter in 2018

#### 152

### 2.2 地表矿物质颗粒物的来源和粒级效应

粒径小于 20.0 μm 颗粒可长期悬浮在大气中, 并通过远距离输送到几十甚至上百千米,属于远源 物质; 20.0-70.0 µm 颗粒物主要为短时间悬浮, 属于区域性物质:大于 70.0 um 颗粒物主要以跃移 及蠕移方式在地表运动,属于局地物质(Tsoar and Pye, 1987; 陈新闯等, 2016), 因此可以通过沉 积物的粒径来简单推断其来源。根据图4可知: 腾格里沙漠和塔克拉玛干沙漠的局地物质分别占 体积分数的 99.7% 和 83.2%, 说明其来源单一, 目塔克拉玛干沙漠的外来物质相对较多。塔克拉玛 干沙漠极端干旱,当春夏两季有冷空气入侵时,在 塔克拉玛干沙漠南端、昆仑山北麓辐合上升(韩 永翔等, 2005);同时,昆仑山北麓松散物质丰 富,易传输碎屑物质到塔克拉玛干沙漠(杨发相 等,2010)。北京市、佛山市南海区、杭州市桐 庐县、南平市延平区地表矿物质颗粒物大部分为 在地表运动的局地物质,大于 70.0 μm 颗粒所占体 积分数分别为77.3%、79.2%、78.4%和71.4%, 主要来自土壤、工地和交通活动等局地源,远距离 传输来的颗粒物较少。因此这些地区的道路沉积物 容易受到当地风速、地表粗糙度和降雨等因素的 影响。赣州市局地物质占 59.8%, 20.0-70.0 µm 的区域性物质占 21.0%, 进一步说明局地的农田传 输对农村土路沉积物有很大影响。兰州市道路沉 积物中大于 70.0 µm 的局地物质占 43.4%, 20.0— 70.0 µm 的区域性物质占 33.2%, 远源物质占 23.3%,来源较为复杂,大气的水平和垂直平流输 送对局地物质和区域性物质进行了混合搬运。农 田土壤由于自身的质地,小于 20.0 µm 和 20.0-70.0 µm 颗粒分别占 48.6% 和 44.7%。

图 5 为城市(北京市、兰州市)和沙漠(腾格 里沙漠、塔克拉玛干沙漠)的地表矿物质颗粒物 粒径与 Mn、Zn、Cr、Cu、Ni 五种重金属元素含



量的关系。横坐标根据样本的中值粒径(um)划 分为[0,120) µm、[120,240) µm、[240,360) µm 和 [360,480] µm 四个范围,纵坐标根据各重金属含 量、城市和沙漠类型划分范围。整体来看,道 路沉积物的重金属含量远高于沙漠沉积物。在沙 漠沉积物中,五种元素粒级效应明显,重金属含 量表现出随粒径变大而逐渐减小的趋势,可能是 因为测定时选取了相同质量的样本,当颗粒的粒 径越小, 比表面积就越大, 因此能够吸附更多的 重金属。在道路沉积物中,重金属含量明显高于 沙漠沉积物且其粒径效应并不明显。这与常静等 (2008)指出上海、阿伯丁、伦敦等城市地表灰 尘重金属含量随粒径降低而增加的趋势相反,可 能是由于兰州和北京受附近沙漠传输颗粒物的 影响, 传输至兰州和北京的多是粗粒径的颗粒 物,导致城市道路沉积物的重金属粒级效应并不 明显。







(待续 To be continued)



图 5 不同重金属在沙漠(红色)与城市铺装道路(蓝色)的粒级效应 Fig. 5 Grain grade effect of different heavy metals in desert (red) and urban paved roads (blue)

# 3 结论

对城市铺装道路、农村土路、沙漠和农田下垫 面的地表矿物质颗粒物进行粒度研究,讨论粒径、 粒度分布、沙土质地的差异,并分析风速大小、地 理位置、人类活动和季节对粒度分布的影响。此外 根据粒级分布判断地表矿物质颗粒物的来源,并讨 论粒径与重金属的关系。主要结论如下:

(1)从中值粒径平均值来看,城市铺装道路表现为佛山市南海区(254.9 μm)>杭州市桐庐县(247.5 μm)>北京市(201.3 μm)>南平市延平区(178.7 μm)>兰州市(65.5 μm);赣州

市湖江镇农村土路为131.3 μm; 兰州市榆中县裸 露农田为21.1 μm; 沙漠戈壁表现为腾格里沙漠 (272.7 μm)>塔克拉玛干沙漠(121.9 μm)。相 比其他下垫面的地表矿物质颗粒物,沙漠沉积物 形状最规则、最接近球体,与沙漠长期受风化作 用有关。

(2)各下垫面粒度分布曲线表现为:除兰 州市外,其他地区城市铺装道路均为单峰分布, 而兰州市呈双峰分布,说明其来源更为复杂。 北京市、杭州市、南平市和佛山市的第一峰值在 317.0—447.7 μm,兰州市的第一峰值在 100.0 μm 以下。塔克拉玛干沙漠呈主次双峰分布,江西省 赣州市农村土路呈双峰分布,腾格里沙漠和兰州 市榆中县的农田土壤呈单峰分布。整体来看沙漠 沉积物的分选性较好,是由于沙丘沙中的粉沙在 风力的长期作用下被吹走,颗粒分布相对集中。

(3)北京市人口密度低的地区,中值粒径 小、细颗粒物含量高、主峰值所占的体积分数 偏低。北京市冬季中值粒径为219.2 μm,夏季为 187.5 μm,夏季的细粒子部分占比比冬季高;城市 铺装道路沉积物的粒度分布与风速大小和地理位 置密切相关,风速较大时,粒度分布集中;风速 相对较小且周围沙源较多时,细颗粒部分含量高、 粒径偏小。

(4)北京市、佛山市南海区、杭州市桐庐县、南平市延平区的地表矿物质颗粒物主要来自土壤、工地和交通活动等局地源,远距离传输来的颗粒物较少。兰州市来源较为复杂,大气环流对局地物质和区域性物质进行了混合搬运。塔克拉玛干沙漠和腾格里沙漠的来源单一。

(5)沙漠沉积物中重金属粒级效应明显,表现出随粒径变大而含量逐渐减小的趋势。北京市 与兰州市城市铺装道路沉积物中重金属粒级效应 与上海等城市相比并不明显,可能是受到周围沙 源的影响,需进一步研究。

本文在选取研究样本时综合考虑了地域、经 济发展、人为活动等的差异,例如兰州代表我国 经济欠发达的西北内陆地区、北京代表经济发达 且受人为活动影响大的华北内陆地区,然而由于 大范围采集样本的困难,一些样本点的数据较少, 需要在未来的研究中进一步完善。

# 参考文献

- 常静,刘敏,李先华,等.2008. 上海城市地表灰尘 重金属污染粒级效应与生物有效性[J]. 环境科学, 29(12): 3489-3495. [Chang J, Liu M, Li X H, et al. 2008. Fractionation and bioavailability of heavy metal contamination of urban surface dusts in Shanghai City [J]. *Environmental Science*, 29(12): 3489-3495.]
- 陈新闯,郭建英,董 智,等. 2016. 乌兰布和沙漠流动沙 丘下风向降尘粒度特征 [J]. *中国沙漠*, 36(2): 295–301. [Chen X C, Guo J Y, Dong Z, et al. 2016. Grain size characteristics of dustfall in the Ulan Buh Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 36(2): 295–301.]
- 方如康. 2003. 环境学词典 [M]. 北京:科学出版社. [Fang R K. 2003. Dictionary of environmental science [M].

Beijing: Science Press.]

- 韩永翔,方小敏,宋连春,等.2005. 塔里木盆地中的大气环 流及沙尘暴成因探讨——根据沙漠风积地貌和气象观 测重建的风场 [J]. *大气科学*, 29(4): 627-635. [Han Y X, Fang X M, Song L C, et al. 2005. A study of atmospheric circulation and dust storm causes of formation in the Tarim Basin— the restructured wind field by shapes of dune and observed prevailing wind [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 29(4): 627-635.]
- 韩永翔,宋连春,赵天良,等. 2006. 北太平洋地区沙 尘沉降与海洋生物兴衰的关系 [J]. *中国环境科学*,
  26(2): 157-160. [Han Y X, Song L C, Zhao T L, et al.
  2006. The relationship between continental dust and marine phytoplankton in the North Pacific [J]. *China Environmental Science*, 26(2): 157-160.]
- 何 清,杨兴华,霍 文,等.2009. 库姆塔格沙漠粒度分 布特征及环境意义 [J]. 中国沙漠, 29(1): 18-22. [He Q, Yang X H, Huo W, et al. 2009. Characteristics of sand granularity from Kumtag Desert and its environmental significance [J]. Journal of Desert Research, 29(1): 18-22.]
- 吉启慧. 1996. 粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应 用[J]. *中国沙漠*, 16(2): 173–179. [Ji Q H. 1996. Application of grain size analysis in the studies of Taklimakan Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 16(2): 173–179.]
- 梁 涛,史正涛,刘志国.2011.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,20(1):122-128.
   [Liang T, Shi Z T, Liu Z G. 2011. Grain size characteristics of street dust in Kunming and its environmental significance [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 20(1): 122-128.]
- 潘虹梅. 2009. 金华城市灰尘的理化特征及环境影响 [D]. 金 华:浙江师范大学. [Pan H M. 2009. Physicochemical characteristics and its environmental effect of urban dust from Jinhua [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University.]
- 钱广强,董治宝,罗万银,等. 2011. 巴丹吉林沙漠地表 沉积物粒度特征及区域差异 [J]. 中国沙漠, 31(6): 1357–1364. [Qian G Q, Dong Z B, Luo W Y, et al. 2011. Grain size characteristics and spatial variation of surface sediments in the Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research, 31(6): 1357–1364.]
- 石广玉,王 标,张 华,等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气 候效应 [J]. *大气科学*, 32(4): 826-840. [Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. 2008. The radiative and climatic effects of

atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32(4): 826–840.]

- 史兴民,刘卫强.2009. 咸阳市区街道灰尘粒度特征分析 [J]. 水土保持通报, 29(5): 76–79. [Shi X M, Liu W Q. 2009. Analysis on particle size of street dusts in Xianyang City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 29(5): 76–79.]
- 宋 洁,春 喜,白雪梅,等.2016.中国沙漠粒度分析研究
   综述 [J]. 中国沙漠, 36(3): 597-603. [Song J, Chunxi, Bai
   X M, et al. 2016. Review of grain size analysis in China
   Desert [J]. Journal of Desert Research, 36(3): 597-603.]
- 王 冠,夏敦胜,陈发虎,等.2008. 兰州市街道尘埃粒度空 间变化特征 [J]. 环境科学与管理,33(3): 67-72. [Wang G, Xia D S, Chen F H, et al. 2008. Spatial characteristics of grain size distribution of street dust in Lanzhou and its environmental significance [J]. Environmental Science and Management, 33(3): 67-72.]
- 王耀庭,赵燕华,杨新兴,等. 2002. 沙尘暴传输机理及源 地环境特征 [J]. 安全与环境学报,2(6): 18-22. [Wang Y T, Zhao Y H, Yang X X, et al. 2002. Study on transport mechanism of sand-dust storm and the environmental features of its source ground [J]. Journal of Safety and Environment, 2(6): 18-22.]
- 谢远云,梁 鹏,孟 杰,等.2009. 哈尔滨沙尘沉降物物源 敏感粒度组分的提取及来源分析 [J]. *地理与地理信息科* 学,25(6): 51-55. [Xie Y Y, Liang P, Meng J, et al. 2009. Obtainment of grain-size populations sensitive to material source area of sand-dust fallouts in Harbin City and their source analysis [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 25(6): 51-55.]
- 杨发相, 雷加强, 岳健, 等. 2010. 昆仑山北麓地貌过程 对风沙危害形成的影响 [J]. *山地学报*, 28(6): 718–724. [Yang F X, Lei J Q, Yue J, et al. 2010. Influence of geomorphologic processes on formation of the blown sand disaster in the north piedmont of Kunlun Mountains [J]. *Journal of Mountain Science*, 28(6): 718–724.]
- 杨忠平,张 强,张 梁,等. 2014. 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)*, 44(1): 319–327. [Yang Z P, Zhang Q, Zhang L, et al. 2014. Particle size character and environmental implication of urban dust near the ground in Changchun City, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 319–327.]
- 周恋彤,董黎明,赵 钰,等. 2015. 北京城区道路灰尘季 节性粒度分布及分形特征 [J]. *中国环境科学*, 35(6): 1610-1619. [Zhou L T, Dong L M, Zhao Y, et al. 2015.

Particle size distribution and fractal dimension characteristics of urban road dust in four seasons in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 35(6): 1610–1619.]

- 周恋彤, 董黎明, 赵 钰. 2014. 北京城区冬季道路灰尘粒 度特征分析 [J]. *中国环境监测*, 30(4): 37-43. [Zhou L T, Dong L M, Zhao Y. 2014. Analysis on particle size distribution of urban road dust in winter of Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 30(4): 37-43.]
- 周秀骥, 徐祥德, 颜 鹏, 等. 2002. 2000 年春季沙尘暴动 力学特征 [J]. *中国科学(D 辑)*, 32(4): 327–334. [Zhou X J, Xu X D, Yan P, et al. 2002. Dynamic characteristics of spring sandstorms in 2000 [J]. *Science in China (Series D)*, 32(4): 327–334.]
- Baker A R, Kelly S D, Biswas K F, et al. 2003. Atmospheric deposition of nutrients to the Atlantic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2296. DOI: 10.1029/2003GL018518.
- Chen S Y, Zhang X R, Lin J T, et al. 2019. Fugitive road dust PM<sub>2.5</sub> emissions and their potential health impacts [J]. *Environmental Science & Technology*, 53(14): 8455–8465.
- de Miguel E, Llamas J F, Chacón E, et al. 1997. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead [J]. Atmospheric Environment, 31(17): 2733-2740.
- Hsu S C, Liu S C, Arimoto R, et al. 2009. Dust deposition to the East China Sea and its biogeochemical implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D15): D15304. DOI: 10.1029/2007JD009574.
- Huang J P, Liu J J, Chen B, et al. 2015. Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(20): 11653–11665.
- Pope C A 3rd, Burnett R T, Thun M J, et al. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *Journal of the American Medical Association*, 287(9): 1132–1141.
- Tao Y, An X Q, Sun Z B, et al. 2012. Association between dust weather and number of admissions for patients with respiratory diseases in spring in Lanzhou [J]. Science of the Total Environment, 423: 8–11.
- Tsoar H, Pye K. 1987. Dust transport and the question of desert loess formation [J]. *Sedimentology*, 34(1): 139–153.
- Zanobetti A, Franklin M, Koutrakis P, et al. 2009. Fine particulate air pollution and its components in association with causespecific emergency admissions [J]. *Environmental Health*, 8: 58. DOI: 10.1186/1476-069X-8-58.