

A study on the particle size distribution characteristics during a sandstorm process in Dalian

Xiaohuan Wang Jianyu Chen Xin Chen Shanshan Cao Wei Wang

Liaoning Province Dalian Ecological Environment Monitoring Center, Dalian, Liaoning, 116021, China

Abstract

A sand-dust weather process from April 11 to 16, 2023 was analyzed by using the data of Dalian comprehensive observation station. The results show that the dust process has little effect on the mass concentration of $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$, especially the concentration of $PM_{1.0}$ does not rise but decreases. From the point of view of particle size distribution, the change of the concentration of each particle size segment below $0.35\mu m$ shows a decreasing trend, and the change rate thereof. The change of the concentration of each particle size segment in the range of $-76\% \sim -50\%$ and the particle size range of $0.35\mu m \sim 5\mu m$ is very significant, and the change rate is between 52% and 1072%, the total concentration of particulate matter was significantly higher than normal, but the total concentration of particulate matter was decreased compared with that of dust weather. The distribution proportion of each particle size is relatively stable in the sand dust process, which can be used as an important basis for judging the sand dust weather process.

Keywords

Dalian; dust process; particle size distribution; number concentration; relative mass

大连一次沙尘过程中颗粒物粒径分布特征研究

王笑欢 陈建宇 陈鑫 曹姗姗 王伟

辽宁省大连生态环境监测中心, 中国·辽宁 大连 116021

摘 要

本次研究通过利用大连市大气综合观测站监测数据, 分析了2023年4月11至16日一次沙尘天气过程。结果表明, 沙尘过程对 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 以下颗粒物质量浓度影响较小, 尤其 $PM_{1.0}$ 以下出现不升反降。从粒径分布上看, $0.35\mu m$ 以下各粒径段数浓度变化呈下降趋势, 其变化率在 $-76\% \sim -50\%$ 之间, $0.35 \sim 5\mu m$ 粒径范围内的各粒径段数浓度变化非常显著, 其变化率在 $52\% \sim 1072\%$ 之间, 显著高于平日正常状态, 但颗粒物总数浓度相比沙尘天气前后是减少状态。沙尘过程中观测到, 各粒径分布占比相对比较稳定, 可以作为判断沙尘天气过程的重要依据。

关键词

大连; 沙尘过程; 粒径分布; 数浓度; 相对质量

1 引言

自“十三五”以来, 中央和各地方政府持续在环境空气污染治理上加大治理力度, 以 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 为主的颗粒物浓度下降尤为明显, 根据2022年生态环境部环境质量公报显示^[1], 全国339个地级以上城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度比2021年分别下降5.6%和3.3%。2022年大连市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分别为 $41\mu g/m^3$ 和 $24\mu g/m^3$, 分别比2021年改善了16.3%和14.3%^[2]。

虽然 PM_{10} 以下颗粒物治理成绩有目共睹, 但是随着近些年蒙古国生态环境持续恶化, 无节制的放牧和资源开采给本就脆弱的生态环境造成了极大的压力, 并且中国也连带受到非常大的影响^[3]。兰州大学陈思宇指出^[4], 自2023年1

月以来, 北方地区已发生12次沙尘过程, 是近10年以来同期最多, 其中, 3月19日至24日、4月9日至11日发生的沙尘事件已达到沙尘暴级别, 蒙古国对我们北方沙尘的平均贡献率约为42%。

大连市三面环海, 周围没有沙源。宋煜等^[5]研究表明, 沙尘传输主要有3条路径途经大连, 分别为北路、西路和西北路, 其中西北路径是影响大连地区沙尘天气最多的路径。大连地区2023年入春以来共受到4次沙尘天气过程影响, 均与西北方向有关。此前的沙尘研究针对理化特性关注较多, 研究结论大多为沙尘过程期间颗粒物不仅含有大量粗颗粒, 而且其中的细粒子含量也大大增加^[6-7]。

以上研究虽没有直接针对颗粒物粒径, 但也从其他方面揭示了沙尘污染过程的理化特征。

本次研究通过利用大连市大气综合观测站记录的大连地区一次典型沙尘天气全过程的数据, 分析沙尘天气对不同粒径颗粒物产生的影响, 分析和推断大连地区沙尘天气下不

【作者简介】王笑欢(1982-), 男, 中国山东潍坊人, 本科, 工程师, 从事大气自动监测研究。

同粒径颗粒物的分布特征。

2 仪器介绍

本次研究点位设置在大连市综合观测站内,该站点位于大连市沙河口区,附近建有居民生活区、小学、医院和企事业单位等,颗粒物质量浓度是利用 ThermoFisher Sharp 系列 5030 型颗粒物监测仪监测大气中 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 。该型号设备的工作原理为基于 β 射线法并动态加热和光散射模块光散射法准确地测量环境中的颗粒物浓度。粒径数浓度是利用 Grimm EDM180-E 型粒径谱仪监测大气中粒径在 $0.25\sim 32\mu m$ 之间 31 个粒径通道的颗粒物的数浓度。该粒径谱仪是利用流量控制泵持续抽进空气样品,使样品空气通过测量腔室内的一束激光,对颗粒物的测量是基于光散射的原理。

3 沙尘天气过程

2023 年 4 月 11 日—4 月 16 日大连市地区受上游沙尘影响出现持续 6 天的沙尘污染天气,此次沙尘过程开始于 4 月 11 日 6 时,结束于 16 日 9 时。因此,选取大连市大气综合观测站 2023 年 4 月 11 日至 2023 年 4 月 16 日的各小时测量的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 与粒径谱仪 Grimm EDM180-E 型测得的粒径区间为 $0.25\sim 32\mu m$ 的 31 通道颗粒物粒径分布进行分析。ThermoFisher Sharp 系列 5030 型颗粒物监测仪监测的 3 种颗粒物质量浓度。

PM_{10} 在沙尘天气前的浓度为 $100\mu g/m^3$ 左右,随后迅速攀升至 11 日 14 时 $700\mu g/m^3$ 左右,又快速回落至 12 日 1 时 $130\mu g/m^3$ 左右,而后又分别在 12 日 10 时和 13 日 1 时又分别到达 $400\mu g/m^3$ 和 $500\mu g/m^3$ 左右 2 个峰值浓度,为第一次沙尘污染过程;受第一次沙尘过程影响,14 日 PM_{10} 有小幅波动,为第二次沙尘过程;4 月 15 日凌晨出现小幅增长至 $220\mu g/m^3$ 左右略微回落,至上午 10 时左右呈现爆发式增长,小时浓度迅速增加到 $400\mu g/m^3$ 左右,后虽有回落,但基本保持在 $350\mu g/m^3$ 左右直至 16 日 10 时结束第三次沙尘过程。

反观 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 数据变化,其趋势大部分时间与 PM_{10} 保持一致,但也有许多不同的特点。在沙尘天气开始初期, $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 并未出现与 PM_{10} 同增长的趋势,反而出现小幅回落后再缓慢增长的情况。在之后的沙尘污染过程中, $PM_{2.5}$ 变化趋势与 PM_{10} 基本一致,而 $PM_{1.0}$ 却与 PM_{10} 一致性较差,只有在 PM_{10} 浓度出现较大变化时, $PM_{1.0}$ 才会有小幅度增长,在 PM_{10} 趋势保持稳定时, $PM_{1.0}$ 监测到的浓度甚至低于沙尘开始前的水平,这与操文祥等^[8]观测到的粗颗粒显著增多,而细颗粒物明显减少的观点基本一致。待沙尘天气结束后,三种颗粒物的浓度变化基本恢复到开始前的浓度。

从以上分析可以看出,由于沙尘天气时的颗粒物主要来自沙尘源区传输过来的沙尘粒子,与其他时段的颗粒物组

成不同,不同粒径的颗粒物在整个沙尘过程中变化趋势是不一样的,并且差异比较大。所以先通过对颗粒物粒径数浓度比例及变化情况开始本次研究。

通过图 1 可知,沙尘开始前 PM_{10} 颗粒物中以 $0.35\mu m$ 以下小颗粒物为主,沙尘期间小颗粒数浓度迅速减少, $0.35\mu m$ 以上粗颗粒数浓度不同程度增长,沙尘结束后,小颗粒又逐渐占据优势,见图 2。

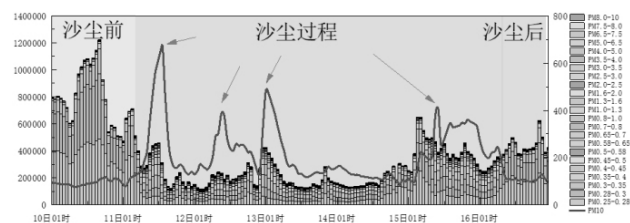


图 1 沙尘过程 PM_{10} 质量浓度及不同粒径颗粒物数浓度变化趋势

从各粒径段数浓度变化来看,沙尘前与沙尘过程中颗粒物 (PM_{10}) 中不同粒径段的浓度变化差异显著。与沙尘天气开始前相比,沙尘开始时 $0.35\mu m$ 以下各粒径段浓度变化呈下降趋势,其变化率在 $-76\%\sim -50\%$ 之间, $0.35\sim 0.5\mu m$ 粒径段化率在 $52\%\sim 226\%$,而 $0.5\sim 5\mu m$ 粒径范围内的各粒径段浓度变化非常显著,其变化率在 $226\%\sim 1072\%$ 之间,显著高于平日正常状态。

从 PM_{10} 中各粒径段浓度占比来看,沙尘天气与开始前相比,沙尘过境期间 $0.35\mu m$ 以下颗粒物数浓度占比均显著下降,由 95% 降至 58%, $0.35\sim 10\mu m$ 颗粒物数浓度占比突升由 5% 升至 42%,其中 $0.35\sim 0.4\mu m$ 和 $0.4\sim 0.45\mu m$ 粒径段的颗粒物数浓度增加尤为显著且占比非常稳定,基本保持在 15% 和 9% 左右,表明沙尘天气以粗颗粒污染为主。

清洁期 $0.35\mu m$ 以下的细小颗粒物占绝对优势,沙尘过程中,细小颗粒物数浓度急剧减少,粗颗粒物相较清洁期有较大增长,但是相对清洁期总粒子数是减少的。不同粒径的颗粒物数浓度与质量浓度是存在一定转换关系的,但是这种关系是在一定的条件和经验模型下经过不间断的实验积累的^[8]。考虑到粒径谱仪监测的是不同直径的颗粒物粒子,颗粒物体积与直径呈立方的关系,而气溶胶粒子质量等于密度乘以体积。因此基于某种假设的最简单的转换方法就被选择出来:①假定密度是一个恒定的常数;②体积直接与粒径的立方成正相关。那么质量浓度算法见式:

$$m = k \times n \times \rho \times d^3 \quad (1)$$

(1) 式中: m 是颗粒物的质量浓度, k 是比例常数, n 是颗粒物的数浓度, ρ 是颗粒物密度常数, d 是颗粒物粒径。假定 k 和 ρ 都是固定常数,该公式可以简化为:

$$m \propto n \times d^3 (\propto: \text{正比于}) \quad (2)$$

根据 (2) 可知,一个 $PM_{0.35}$ 颗粒的相对质量是 $0.35 \times 0.35 \times 0.35 = 0.042875$,而一个 $PM_{3.0}$ 颗粒的相对质量

是 $30 \times 30 \times 30 = 27000$ ，一颗 PM_{30} 是一颗 $PM_{0.35}$ 的相对质量的约 63 万倍，由此可见，大颗粒物虽然数量上不占优势，但是质量上却占据绝对主导。

根据 (2) 公式转换得到的相对质量浓度绘制三维分布图，如图 2 所示，能清晰地看到三次沙尘污染过程中不同粒径段颗粒物浓度的爆发性增长。 $2.5 \mu m$ 以上颗粒物相对质量变化最显著， $1.0 \mu m \sim 2.5 \mu m$ 之间颗粒物相对质量也有一些变化， $1.0 \mu m$ 以下变化微乎其微。结合粒径分布特征，这就可以解释沙尘发生开始时， $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 会有小幅回落是因为占颗粒物 95% 以上的 $0.35 \mu m$ 以下小颗粒数浓度快速减少，而后 $0.35 \mu m$ 以上颗粒物出现不同程度增长导致 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 变现出不同变化趋势的特征。

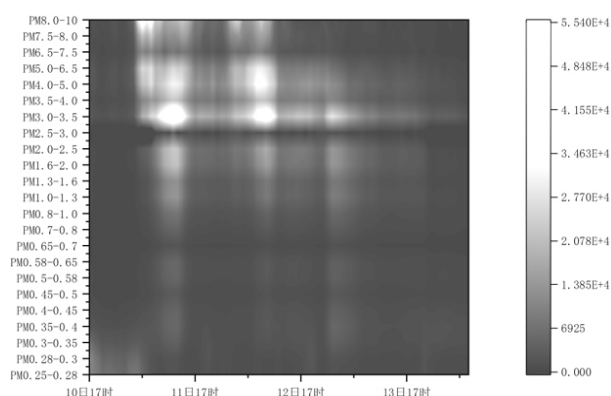


图 2 沙尘天气过程中相对质量三维分布

根据以上监测结果发现，当一次沙尘过程开始时，通过 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 设备的监测，粗颗粒显著增多，细颗粒明显减少的^[8]，在沙尘的持续过程中，粒径谱仪上几个主要粒径段的数量占比非常稳定，即使在沙尘强度减弱时也不例外。虽然粗颗粒物数量较少，但因较大的相对质量导致其对空气质量影响不可忽视。沙尘过程结束后，粒径分布情况又恢复到开始前的占比。

4 结论

①可以结合粒径谱仪对不同粒径范围内的数浓度的监

测结果，针对沙尘天气过程中 31 种通道的粒径分布情况进行分析和研究，通过本次研究表明大连地区沙尘天气前后伴随着 PM_{10} 浓度变化，颗粒物粒径分布变化特征十分显著， $0.35 \mu m$ 以上颗粒各粒径段占比稳定，因此可以利用颗粒物粒径实时监测结果来辅助判定沙尘天气，使沙尘天气判定更加客观、合理。

②尽管不同研究显示，沙尘天气过程中粗细颗粒物质量浓度都有不同程度增加，但以大连市对颗粒物浓度的观测结果表明，对 PM_{10} 影响最大， $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 影响相对较小，两者浓度变化较为平稳，甚至长时间出现浓度下降的情况。

③从各粒径段数浓度变化来看，大连市沙尘天气开始前后，不同粒径段颗粒物数浓度变化差异显著， $0.35 \sim 10 \mu m$ 粒径段浓度变化最大，沙尘天气造成的空气污染以该粒径段 $0.35 \sim 10 \mu m$ 的污染为主，而较大粒径颗粒物更易沉降，沙尘过后如遇大风、车辆等扰动便会产生二次扬尘污染，造成 PM_{10} 再次升高，因此沙尘过后应及时进行道路清扫保洁工作，同时加大扬尘管控力度，防止二次扬尘污染。

参考文献

- [1] 2022年中国生态环境状况公报
- [2] 2022年大连市生态环境状况公报
- [3] 高雅丽.兰州大学蒙古国今春对我国北方沙尘平均贡献超 40%[N].中国科学报,2023-05-18(003)
- [4] Chen, S. Y., and Coauthors, 2023: Mongolia Contributed More Than 42% of the Dust Concentrations in Northern China in March and April, 2023, Adv. Atmos. Sci., doi: 10.1007/s00376-023-3062-1.
- [5] 宋煜,黄艇,隋洪起等.大连地区沙尘特征分析[C]//中国气象学会.中国气象学会2007年年会大气成分观测、研究与预报分会场论文集.2007:686-693.
- [6] 庄国顺,郭敬华,袁蕙等.2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J].科学通报,2001(03):191-197.
- [7] 张仁健,王明星,浦一芬等.2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J].气候与环境研究,2000(03):259-266.
- [8] 操文祥,沈帆,全继宏等.武汉地区沙尘天气气溶胶粒径分布特性研究[J].中国环境监测,2015,31(6):47-52.