

哈尔滨市沙尘期大气颗粒物物化特征及传输途径分析

黄丽坤^{1,2*}, 王广智^{2*}, 王 琨² (1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150076; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了研究沙尘期大气颗粒物的物化特征及传输途径, 分别采集 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品, 分析 3 种颗粒物的分布特征、浓度变化以及离子和无机元素组成, 同时利用 HYSPLIT 逆轨迹模式对沙尘颗粒的远距离输送来源进行了分析。研究结果显示: 沙尘期, PM₁₀₋₁₀₀ 是颗粒物的主要组成, 占 TSP 的 50%~57%, PM_{2.5}/TSP 和 PM₁₀/TSP 分别达最低值 0.17 和 0.43; 在 TSP 和 PM₁₀ 中, Na、Si、Al、Ca、Fe、K、Mg 浓度变化较为明显, 在沙尘期是非沙尘期的 2~3 倍, 在 TSP 中的最高浓度分别为 7.28、1.98、19.89、25.82、18.77、4.68 和 6.49 μg/m³, 以土壤尘和扬尘为主; TSP 中 Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺ 在沙尘期的浓度是非沙尘期的 2~3 倍, 最高达 22.23、2.04 和 1.68 μg/m³, 主要来自土壤、尘埃, 与沙尘有相似的来源; 逆轨迹模型分析结果表明, 本次沙尘事件由外来沙尘输入导致, 其传输途径比较明显, 起始位置为内蒙古的西北部和中部地区, 沿途向南经过山西, 后转为东北方向, 经过河北、天津、辽宁、吉林等省份, 最后输送到哈尔滨。

关键词: 物化特征; 沙尘暴; 传输途径; 大气颗粒物

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2014)08-1920-07

Physicochemical characteristics and long-range transportation of atmospheric particulates during a dust storm episode in Harbin, China. HUANG Li-kun^{1,2*}, WANG Guang-zhi^{2*}, WANG Kun² (1. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China). *China Environmental Science*, 2014, 34(8):

Abstract: This study investigates the physicochemical characteristics of atmospheric particulates (TSP, PM₁₀ and PM_{2.5}) during a dust storms episode, including the size distribution of the particles and the chemical composition analysis in particles. In addition, long-range transportation of dust particles is estimated by the HYSPLIT trajectory model to investigate the sources of dust. The results show that PM₁₀₋₁₀₀ is the main components during the dust storms episode and PM₁₀₋₁₀₀/TSP is from 50% to 57%. PM_{2.5}/TSP and PM₁₀/TSP reach the lowest value of 0.17 and 0.43. Na, Si, Al, Ca, Fe, K, and Mg in PM₁₀ and TSP have great variation in dust period and are 2~3 times higher than that in non-dust period with the highest concentration of 7.28, 1.98, 19.89, 25.82, 18.77, 4.68, and 6.49 μg/m³ in TSP. The mass concentrations of Ca²⁺, K⁺, and Mg²⁺ in the dust period are 2~3 times greater than that in non-dust period with the highest concentration of 22.23, 2.04, and 1.68 μg/m³ in TSP, mainly from soil and dust. The model results show that dust source in dust period is very obvious which starts at the northwest of Inner Mongolia and central regions, going south through Shanxi to the northeast, passing through Hebei, Tianjin, Liaoning, Jilin and other provinces, and continuously inputting into Harbin.

Key words: physicochemical characteristics; dust storms; transportation; atmospheric particulates

沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类, 其中浮尘指尘土、细沙均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于 10km; 扬沙是地面尘沙被风吹起, 使水平能见度在 1km 至 10km 以内; 沙尘暴指强风将地面大量尘沙吹起, 使水平能见度小于 1km; 强沙尘暴则是使水平能见度小于 500m 的天气现象^[1-2]。而在以上几种沙尘天气中, 危害性较大且出现频率较多的是沙尘暴天气, 它是一种风与沙相互作用的灾害性天气现象, 它的形成

与地球温室效应、厄尔尼诺现象、森林锐减、植被破坏、物种灭绝、气候异常等因素有着不可分割的关系, 因此也得到越来越多学者的重视^[3-9]。

据统计, 20 世纪 60 年代特大沙尘暴在我国

收稿日期: 2013-11-30

基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究基金(2013RFQXJ128); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金项目(ES201417)

* 责任作者, 黄丽坤, 副教授, hlk1980@163.com; 王广智, 副教授, hitwgz@126.com

发生过 8 次,70 年代发生过 13 次,80 年代发生过 14 次,而 90 年代至今已发生过 20 多次,并且波及的范围越来越广,造成的损失越来越重。哈尔滨最近几年每年至少发生一次沙尘暴事件,基本都在每年的春季时期(4 月和 5 月),沙尘暴来临时,交通事故次数增加,呼吸系统疾病的就诊率增加,同时也加大了城市保洁工作的负担,所以有必要了解一下沙尘暴时期颗粒物的化学成分、污染源种类和贡献量以及其远距离传输途径。

1 样品采集及分析方法

1.1 样品采集

为研究沙尘暴的特点及形成原因,本课题在 2011 年 5 月 11~20 日进行了一次沙尘暴的跟踪监测,采样点位于哈尔滨商业大学校园内,处于城市的上风向,采样方式为密集型采样,3 种颗粒物同时进行,每 24h 采集一次,连续采集 10d,并对其进行质量浓度的测定和化学成分的分析。

采样仪器为武汉天虹仪表有限责任公司生产的 TH-150 型智能中流量颗粒物采样器,分别采集 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 大气颗粒物。采样流量为 100L/min,准确度为 $\pm 2.5\%$,技术参数符合国家规定标准(GB6921-86)。滤膜为美国 PALL 公司生产的石英纤维滤膜,能耐 1000℃ 的高温,具有极好的总量和结构的稳定性及低背景值。

1.2 质量浓度分析

将采样后滤膜重量减去采样前滤膜重量得到的悬浮颗粒总重量,再除以采气体积,即可得到空气中颗粒物浓度^[10]。

1.3 离子成分分析

将 1/4 膜样品剪碎后放入 50mL 的聚乙烯瓶中,加入 50mL 去离子水,然后将其放入清洗器中震荡,震荡时间为 150 分钟,静止一小时后,用 0.45 μ m 的醋酸酯纤维滤纸加以过滤。过滤后的溶液分三部分进行分析:阳离子成份(K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺)采用等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)进行分析,阴离子成份(F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻)采用离子色谱仪(IC)进行分析,NH₄⁺采用纳氏试剂分光光度法进行分析^[11-12]。

1.4 无机元素成分分析

无机元素成分均采用等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)进行分析^[13-14],分析项目包括 Al、As、Ba、Ca、Cd、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、Pb、S、Si、Sr、Ti、V 和 Zn。样品处理步骤如下:将 1/8 滤膜剪碎后放入 50mL 消化瓶中,加入 15mL 硝酸和高氯酸的混酸(HNO₃:HClO₄=1:1),放置 10h 后,在电热板上进行消解萃取,开始以高温 200℃ 进行加热,待溶液微沸至全部澄清后,取下盖在较低温度下(150℃)赶酸,当溶液蒸发近干时加入 2mL 左右 2%硝酸溶液,继续加热,重复 3 次,溶液冷却后,以 2%硝酸溶液定容至 50mL,进一步利用 ICP-AES 对其无机元素成分进行分析。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物质量浓度变化及粒径分布特征

沙尘暴起因与特殊的环境特征有关,同时也会影响到当地的天气状况。表 1 为采样期间气温、露点、湿度、大气压、能见度和风速的变化。从表中可以看出,5 月 14~16 日风速相对较高,此时能见度大幅度降低,另外整个采样期气温均高于露点,湿度均小于 80%,同时在能见度较低的几天内天空呈暗黄色,室外物体表面有黄色浮沉,说明导致能见度降低的原因不是霾或雾,而是沙尘所致^[15-16]。

为进一步确认沙尘天气,TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 同时进行采集,并分析其质量浓度变化,结果见表 2。从表 2 可见在能见度较低的 14~16 日,颗粒物浓度也达到了峰值,这正说明由于这几天风速的加大,导致外来风沙不断涌入到哈尔滨市内造成颗粒物浓度的盘升,最高浓度出现在 5 月 15 日,此时风速最大,能见度最低,说明三者之间有明显的相关性。16 日由于降雨所致,颗粒物浓度开始降低,沙尘开始消退,到 17 日,沙尘天气结束,恢复到正常颗粒物污染水平。因此,将 5 月 14~16 日作为沙尘期,其余采样时期作为非沙尘期进行分析。此次沙尘天气虽然维持时间较短,但采样捕捉到了整个沙尘天气的形成、持续与消退过程,对探讨沙尘天气颗粒物的污染特征与危害起到一定的作用。

表 1 采样期间大气环境特征

Table 1 Characteristics of atmospheric environment during the sampling period

日期	气温 (℃)	露点 (℃)	湿度 (%)	大气压 (hPa)	能见度 (km)	风速 (km/h)	天气
05-11	13	1	44	1001	10	5	
05-12	12	-5	28	1003	10	13	
05-13	10	-6	26	1006	10	10	
05-14	8	-7	28	997	6	11	
05-15	16	2	41	999	5	21	
05-16	14	11	73	1002	7	18	阵雨
05-17	13	0	41	1008	9	14	阵雨
05-18	15	-1	32	1005	9	6	
05-19	13	0	41	1001	10	17	
05-20	22	6	32	1006	10	14	

表 2 颗粒物质量浓度及相对比例

Table 2 Mass concentration and relative proportion of particulate matters

日期	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM ₁₀ /TSP	PM ₁₀₋₁₀₀ /TSP
05-11	235.26	129.61	62.47	0.27	0.48	0.55	0.45
05-12	321.56	148.61	71.88	0.22	0.48	0.46	0.54
05-13	268.06	121.81	58.04	0.22	0.48	0.45	0.55
05-14	386.67	192.28	79.18	0.20	0.41	0.50	0.50
05-15	497.61	215.83	83.21	0.17	0.39	0.43	0.57
05-16	436.44	189.72	72.43	0.17	0.38	0.43	0.57
05-17	326.81	152.08	60.28	0.18	0.40	0.47	0.53
05-18	220.61	159.17	70.53	0.32	0.44	0.72	0.28
05-19	180.67	158.06	75.83	0.42	0.48	0.87	0.13
05-20	151.12	130.13	66.21	0.44	0.51	0.86	0.14

由于沙尘期大部分颗粒物由外来源引入,其颗粒物分布、化学成分与本地源有着本质的区别.表 2 同时给出了各种颗粒物的相对比例,从 $\text{PM}_{2.5}/\text{TSP}$ 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$ 的变化来看都呈现了先减小后增加的趋势,且在沙尘期比值均降到最低值,这说明导致颗粒物浓度升高的主要粒子为 PM_{10-100} ,这种粒子虽然不能在空气中长期漂浮,但在风速较大时可维持一定的浓度.另外 3 个比值在 17 日沙尘结束后开始回升, $\text{PM}_{2.5}/\text{TSP}$ 和 $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$ 回升较快,分别从最低点的 0.17 和 0.43 到最高点的 0.44 和 0.87,再次说明沙尘期 PM_{10-100} 占主导,沙尘结束后,风速减小,大部分 PM_{10-100} 开始沉降,颗粒

物恢复正常水平, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的升高是由于 16 日和 17 日的连续降雨,对粗颗粒的沉降能力更强一些.

2.2 颗粒物离子成分变化特征

表 3 和表 4 为沙尘期和非沙尘期 TSP 和 PM_{10} 中离子成分的变化特征.由于沙尘天气对 PM_{10-100} 有更大的影响,因此沙尘期离子成分的变化更应体现在 TSP 中^[16].

从表 3 可以看出,在 TSP 中, Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 在沙尘期的浓度是非沙尘期的 2~3 倍,主要来自土壤、尘埃,与沙尘有相似的来源,因此其浓度也随沙尘的加重而升高; Na^{+} 和 Cl^{-} 大部分来自海水飞沫,或化工行业及燃料燃烧产生的含氯污染物,在本研究中,海水的贡献微乎其微,因此其来源基本来自哈市及沙尘沿途城市的离子排放; NH_4^{+} 来自燃料燃烧以及有机物质腐化产生, NO_3^{-} 及 SO_4^{2-} 主要来自人为排放以及燃料燃烧产生的 NO_x 和 SO_2 经空气中的二次转化产生,直接排放相对较少,在沙尘期没有表现出较高的浓度变化; F^{-} 浓度相对较少,主要污染源为高热的冶金工业,因此在这个采样期浓度变化不明显,且主要分布在 PM_{10} 中.从离子总质量百分比来看, Σ 离子/ TSP 在整个采样期没有明显的变化,这说明离子成分分布较为平衡.而 Σ 离子/ PM_{10} 在沙尘期表现出较高的水平,这说明外来沙源以 PM_{10-100} 为主,其离子成分以地壳元素为主,因此该粒径的颗粒物贡献的离子成分质量较低,而城市排放源以 PM_{10} 为主,其离子成分主要来源于二次颗粒,且占有较大的比重.另外,在沙尘期间,外来沙源贡献的 PM_{10} 主要是小颗粒在传输过程中,受到途径城市空气的影响,经过不断的二次转化反应而形成,可以认为沙尘期对 PM_{10} 的贡献主要为二次颗粒,而此颗粒对离子重量的贡献较为突出,因此在沙尘期 Σ/PM_{10} 有明显的增加,而在非沙尘期表现出正常的水平.

2.3 颗粒物无机元素成分变化特征

除了颗粒物浓度和粒度分布发生明显变化之外,受污染源特性影响颗粒物中的个别化学成分也随之变化^[17].由于沙尘期是粗颗粒占主导优势,所以本研究只针对 TSP 和 PM_{10} 进行了化学元

素的分析.表 5 和表 6 分别给出了 TSP 和 PM₁₀ 中 16 种无机元素在整个采样期的变化特征.

表 3 采样期 TSP 中离子成分浓度变化(μg/m³)
Table 3 Concentration variation of ions in TSP during sampling period (μg/m³)

离子	05-11	05-12	05-13	05-14	05-15	05-16	05-17	05-18	05-19	05-20
Ca ²⁺	6.94	12.56	11.96	10.13	22.23	12.67	10.50	13.08	11.53	6.94
K ⁺	0.42	0.79	1.94	1.09	2.04	0.98	0.42	1.08	1.04	0.42
Mg ²⁺	0.30	0.47	0.40	0.65	1.68	0.59	0.43	0.51	0.44	0.30
Na ⁺	1.40	1.17	1.35	1.11	4.33	0.98	1.81	1.44	1.87	1.40
NH ₄ ⁺	28.32	39.59	36.65	43.11	45.21	42.81	40.52	30.11	25.68	26.97
F ⁻	0.13	0.18	0.28	0.20	0.27	0.25	0.20	0.28	0.16	0.10
Cl ⁻	1.62	3.25	4.12	5.65	4.63	3.11	1.90	2.80	2.67	2.62
SO ₄ ²⁻	28.94	34.50	32.73	34.13	43.54	42.63	32.52	20.17	15.62	11.83
NO ₃ ⁻	26.10	33.50	23.72	31.76	46.31	44.74	36.13	28.34	18.41	13.31
Σ离子/TSP	0.40	0.39	0.42	0.40	0.36	0.38	0.38	0.44	0.43	0.42

表 4 采样期 PM₁₀ 中离子成分浓度变化(μg/m³)
Table 4 Concentration variation of ions in PM₁₀during sampling period (μg/m³)

离子	05-11	05-12	05-13	05-14	05-15	05-16	05-17	05-18	05-19	05-20
Ca ²⁺	3.19	5.46	3.40	3.99	8.14	6.38	6.17	9.89	5.19	3.19
K ⁺	0.30	0.68	1.59	0.77	0.44	0.30	0.23	0.94	0.69	0.30
Mg ²⁺	0.16	0.24	0.21	0.35	0.47	0.41	0.30	0.37	0.23	0.16
Na ⁺	0.78	0.79	1.30	0.97	1.19	0.83	1.44	1.35	1.25	0.78
NH ₄ ⁺	24.91	27.79	25.18	33.93	34.53	28.06	27.25	22.04	23.33	24.73
F ⁻	0.10	0.09	0.17	0.11	0.18	0.16	0.14	0.11	0.07	0.07
Cl ⁻	0.98	1.77	2.31	4.63	2.66	1.54	1.17	2.10	2.30	1.98
SO ₄ ²⁻	15.58	16.89	13.89	21.99	30.06	30.31	21.65	14.47	13.02	11.03
NO ₃ ⁻	12.24	14.68	12.58	20.41	34.58	32.96	22.71	13.16	16.62	12.72
Σ离子/PM ₁₀	0.45	0.46	0.50	0.57	0.57	0.59	0.53	0.40	0.40	0.42

表 5 采样期 TSP 中元素成分浓度变化特征(μg/m³)
Table 5 Concentration variation of elements in TSP during sampling period (μg/m³)

元素	05-11	05-12	05-13	05-14	05-15	05-16	05-17	05-18	05-19	05-20
Mn	0.208	0.272	0.261	0.349	0.339	0.401	0.188	0.424	0.277	0.208
Na	3.356	2.771	5.994	6.478	7.278	6.175	3.700	2.344	3.600	3.356
Pb	0.053	0.079	0.150	0.264	0.048	0.207	0.059	0.150	0.097	0.053
S	2.914	3.036	4.111	4.141	2.328	6.700	3.069	5.222	4.150	2.914
Si	0.353	0.428	0.811	1.173	1.983	1.421	0.351	0.646	0.638	0.353
Sr	0.002	0.000	0.003	0.009	0.146	0.105	0.121	0.050	0.080	0.003
Ti	0.511	0.621	0.971	0.876	0.724	0.783	3.300	1.021	0.832	0.511
Zn	0.559	0.386	0.675	0.799	0.396	0.573	0.272	1.037	0.474	0.559
Al	6.736	9.094	7.717	11.919	19.897	13.111	5.553	9.394	6.617	6.736
Ba	0.144	0.157	0.211	0.233	0.171	0.255	0.116	0.231	0.179	0.144
Ca	17.825	18.425	18.811	23.844	25.817	22.194	16.942	13.328	13.167	9.825
Cr	0.079	0.073	0.252	0.109	0.089	0.087	0.064	0.125	0.149	0.079
Cu	0.127	0.405	0.200	0.390	0.098	0.408	0.107	0.209	0.175	0.127
Fe	6.469	8.547	7.722	10.800	18.769	16.956	5.881	11.100	6.917	4.469
K	1.766	2.225	3.432	4.287	4.677	4.722	2.694	3.534	2.839	1.766
Mg	2.792	3.078	3.204	5.744	6.478	5.103	3.772	4.706	3.741	2.792

表 6 采样期 PM₁₀ 中元素成分浓度变化特征(μg/m³)
Table 6 Concentration variation of elements in PM₁₀ during sampling period (μg/m³)

元素	05-11	05-12	05-13	05-14	05-15	05-16	05-17	05-18	05-19	05-20
Mn	0.107	0.110	0.102	0.159	0.131	0.157	0.073	0.297	0.226	0.143
Na	1.841	1.270	2.693	3.234	3.124	2.650	1.734	1.683	1.737	2.545
Pb	0.024	0.031	0.062	0.127	0.016	0.084	0.023	0.103	0.079	0.036
S	1.598	1.392	1.845	2.066	0.996	2.876	1.438	3.755	3.606	2.210
Si	0.189	0.192	0.360	0.582	0.848	0.606	0.160	0.460	0.550	0.263
Sr	0.001	0.000	0.001	0.004	0.053	0.035	0.047	0.026	0.062	0.001
Ti	0.276	0.281	0.432	0.433	0.306	0.332	1.546	0.730	0.719	0.383
Zn	0.303	0.173	0.299	0.394	0.165	0.241	0.123	0.742	0.407	0.420
Al	3.605	4.083	3.373	5.860	8.456	5.538	2.510	6.664	5.657	5.019
Ba	0.074	0.067	0.090	0.112	0.069	0.105	0.050	0.161	0.151	0.105
Ca	9.704	8.376	8.365	11.822	11.001	9.444	7.863	9.496	11.355	7.367
Cr	0.038	0.029	0.109	0.050	0.033	0.032	0.025	0.085	0.124	0.055
Cu	0.065	0.181	0.085	0.190	0.037	0.170	0.045	0.145	0.148	0.092
Fe	3.508	3.882	3.425	5.350	8.021	7.241	2.714	7.942	5.968	3.347
K	0.966	1.019	1.540	2.138	2.006	2.026	1.261	2.539	2.465	1.337
Mg	1.530	1.411	1.437	2.867	2.780	2.189	1.768	3.383	3.250	2.117

两种颗粒物中元素含量在沙尘期和非沙尘期有明显差异的是 Na、Si、Al、Ca、Fe、K、Mg,且在沙尘期含量是非沙尘期的 2~3 倍,也是颗粒物的重要组成部分,在沙尘期的增加主要由于这些元素均属于地壳元素,而沙尘天气输入到大气中的颗粒物大部分属于较粗颗粒的土壤尘、扬尘中的天然尘等,因此含量升高。

另外,Sr、Ti、Ba 等微量元素也有不同程度增加,特别是 TSP 中的 Sr 虽然浓度较低,但是增加幅度最大,这与 Sr 的存在形式及来源位置有关,内蒙古沙源地中广泛存在着锶矿物,约 10 余种,另外在沙尘传输过程中会受到沿途的 Sr 污染,从而导致 Sr 含量的增加,而 PM₁₀ 中的 Sr 相对于 TSP 变化程度稍弱,主要原因是含 Sr 矿物质多属于粗颗粒;Ti 虽然浓度低,但在地壳元素含量排序中仅次于 Mg,所以在沙尘期表现较高的浓度;Ba 升高幅度不明显,主要由外来人为源所致.其他元素多来自于工业污染源,在各区域浓度受污染源特性影响,所以在沙尘期没有表现突出的浓度特征.另外,相比非沙尘期,在沙尘期表现出较高浓度元素在 TSP 中增幅均大于 PM₁₀.

2.4 采样期大气颗粒物传输途径分析

我国沙尘天气来源地一般分为境外和境

内 2 种,其中 2/3 起源于蒙古国南部,1/3 来自于境内内蒙古地区.另外,发生在中亚的沙尘天气,一般不会影响到我国内陆,新疆南部的塔克拉玛干沙漠虽然是我国沙尘天气高发区,但不会涉及到西北、华北和东北地区.所以蒙古国南部、内蒙古中部和西部是我国沙尘天气的最可能来源^[18].

为探讨哈尔滨市沙尘天气的起源,利用美国空气资源实验室研发的 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)后向轨迹模式.该模型采用拉格朗日方法以可变网格定义污染源,分别进行平流和扩散计算.该模型以采样点 (126.6042062°E,45.7385775°N)为逆推起点,根据当时的气象条件选择 3 个不同高程,局部浓度最高的时间为起始时间,以此倒推 48h 或 72h,可得到该气团的三维传输路径,模拟结果见图 1.其中 5 月 14~16 日为沙尘期,5 月 17~18 日为非沙期,分别倒推 72h 和 48h 得 5 月 14 日 16:00、15 日 4:00 和 20:00、16 日 22:00、17 日 2:00 和 18 日 16:00 的沙尘输送轨迹.

5 月 14 日和 15 日的沙尘来源非常明显,起始于内蒙古西北部及中部地区,南下经山西折转向东北方向传输,途经河北、天津、辽宁、吉林等

省市,持续输入到哈尔滨境内,此过程风速较大, 所以相同时间内颗粒物的传输路径也相对较长。

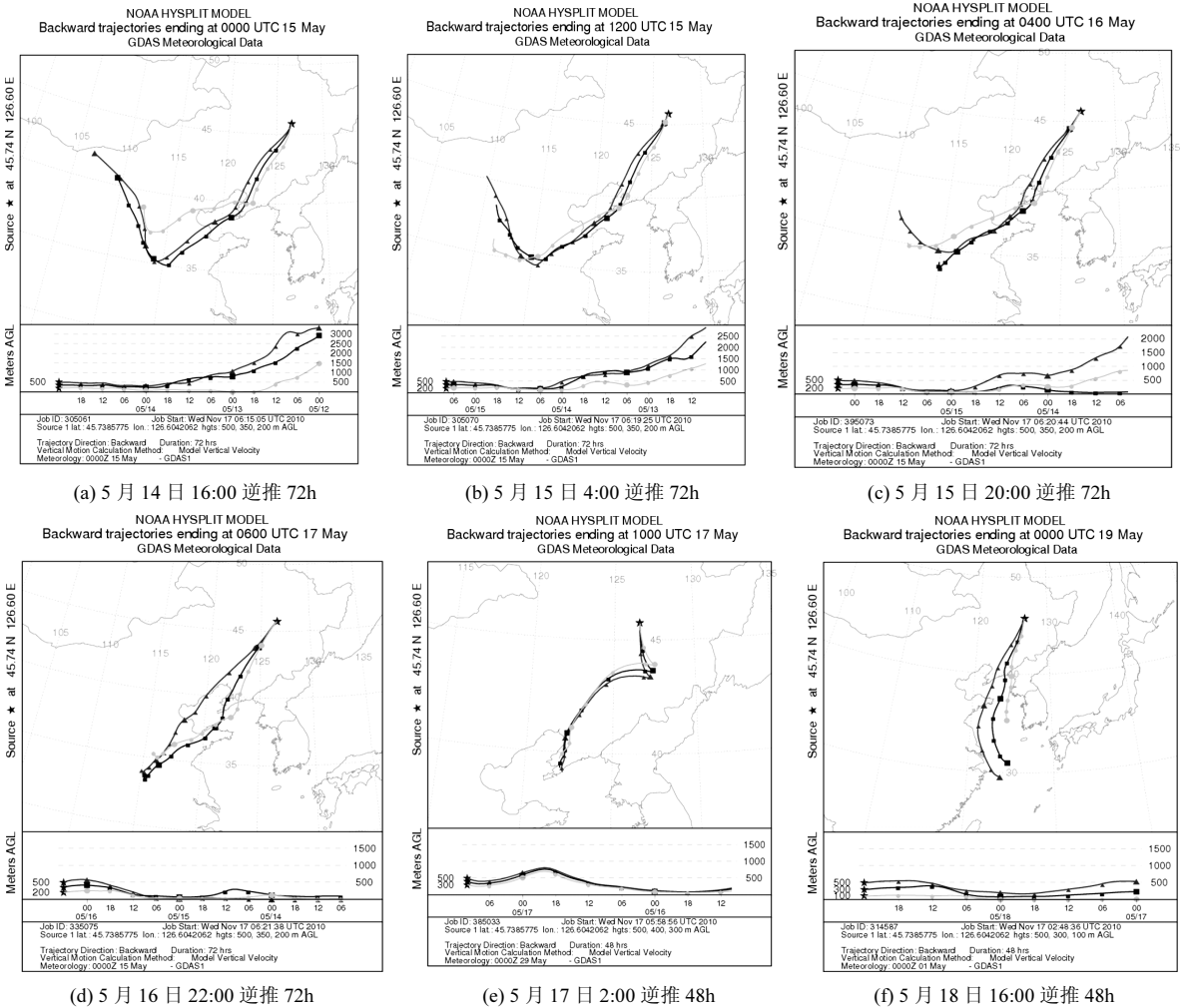


图1 逆轨迹模式分析结果
Fig.1 Trajectory model results

★标志为逆推起点,即沙尘采样点.由于美国和中国之间存在8h的时间差,实际模拟时间应为图中时间减去8h

到5月15日20:00,风速开始减小,颗粒物传输来源有所偏移,始于内蒙古北部及西北部,途经陕西、河南、山东、辽宁、吉林,继续北上到哈尔滨,此时颗粒物浓度居高不下,原因是沿途中颗粒物不断涌入到哈市境内.到5月16日,风速进一步减小,传输路径已经完全改变,风源起始于河南,经山东越过渤海一直北上途经辽宁、吉林进入哈尔滨,此时颗粒物浓度开始下降.到5月17日,逆推48h后,风源起始点变为大连黄海附近,经辽宁、吉林到达哈尔滨,风速降到最低,传输路径已

经发生实质性变化.到5月18日,48h逆推后的起点已经完全变为黄海上,然后持续北上到哈尔滨,此时风向和路径与哈市该季节的常规天气特性吻合,颗粒物恢复到正常水平,沙尘天气彻底结束.由此可见,5月14日、15日和16日颗粒物浓度的升高为沙尘所致,且沙源来自内蒙古北部、西北部或中部.

3 结论

3.1 颗粒物浓度分析结果表明,PM_{2.5}/TSP、

PM_{2.5}/PM₁₀ 和 PM₁₀/TSP 都呈现先减小后增加的趋势,沙尘结束后,PM_{2.5}/TSP 和 PM₁₀/TSP 迅速回升,由此判断导致颗粒物浓度升高的主要粒子为 PM_{10~100}.

3.2 根据化学成分分析,在 TSP 中,Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺在沙尘期的浓度是非沙尘期的 2~3 倍,由于其主要来自土壤、尘埃,与沙尘有相似来源; Σ /PM₁₀ 在沙尘期表现出较高的水平,主要为二次颗粒所致;Na、Si、Al、Ca、Fe、K、Mg 在沙尘期含量是非沙尘期的 2~3 倍,这些元素均属于地壳元素,以较粗颗粒的土壤尘和天然尘为主;Sr、Ti、Ba 等有不同程度的增加,由于内蒙古沙源地锆矿物较多,所以 Sr 增加幅度最大。

3.3 逆轨迹模式解析结果说明 5 月 14 日、15 日和 16 日颗粒物浓度的升高为沙尘所致,其传输路径起始位置为内蒙古西北部和中部地区,沿途向南经过山西,后转为东北方向,经过河北、天津、辽宁、吉林等省份,最后输入到哈尔滨。

参考文献:

- [1] Fu P, Huang J, Li C, et al. The properties of dust aerosol and reducing tendency of the dust storms in northwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(23):5896-5904.
- [2] Vanderstraeten P, Lénelle Y, Meurrens A, et al. Dust storm originate from Sahara covering Western Europe: A case study [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(21):5489-5493.
- [3] 李贵玲,周 敏.2011 年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 [J]. *环境科学*, 2014,35(5):1644-1653.
- [4] 刘新春,钟玉婷,何 清,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘气溶胶质量浓度的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(10):1609-1617.
- [5] Kaskaoutis D G, Kambezidis H D, Nastos P T, et al. Study on an intense dust storm over Greece [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(29):6884-6896.
- [6] 李金香,李 峰.北京市一次沙尘过程中降水化学组分的监测分析 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(12):2149-2154.
- [7] Jayaratne E R, Johnson G R, McGarry P, et al. Characteristics of airborne ultrafine and coarse particles during the Australian dust storm of 23 September 2009 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(24):3996-4001.
- [8] 钱 鹏,郑祥民.沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 [J]. *环境科学*, 2013,34(5):2010-2017.
- [9] Lee Y C, Yang X, Wenig M. Transport of dusts from East Asian and non-East Asian sources to Hong Kong during dust storm related events 1996-2007 [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(30):3728-3738.
- [10] GB6921-86 大气飘尘浓度测定方法 [S].
- [11] 刘 臻,祁建华,王 琳,等.青岛大气气溶胶水溶性无机离子的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(8):1422-1432.
- [12] 耿彦红,刘 卫,单 健,等.上海市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2010,30(12):1585-1589.
- [13] 姬洪亮,赵 宏,孔少飞,等.天津近岸海域大气颗粒物无机组分季节变化及源析 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(2):177-185.
- [14] 钟宇红,房春生,邱立民.典型城市大气颗粒物无机组分源解析 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2008,40(1):136-140.
- [15] 王明洁,朱小雅,陈申鹏.1981~2010 年深圳市不同等级霾天气特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(9):1563-1568.
- [16] 李玉霖,拓万全,崔建垣.兰州市沙尘和非沙尘天气沉降物的化学特性比较 [J]. *中国沙漠*, 2006,04:648-651.
- [17] 崔文岭.沙尘气溶胶自北向南长途传输过程中化学特征的演化及其与污染气溶胶的混合机理 [D]. 上海:复旦大学, 2009.
- [18] 袁中新,海春兴,赵 明,等.长距离传送过程中沙尘指纹特征辨识探讨 [R]. 第四届海峡两岸沙尘暴与环境治理研讨会, 2005.

作者简介: 黄丽坤(1980-),女,吉林辉南人,副教授,博士,主要从事大气环境污染分析控制研究.发表论文 40 余篇。