

文章编号:1004-4574(2013)04-0135-10

沙尘天气过程对太湖北岸城市空气质量的影响

刘端阳,曹登峰,陈纾杨,周彬,夏健,钱昊钟

(江苏省无锡市气象局,江苏 无锡 214101)

摘要:2011年5月1-2日的沙尘天气过程影响了黄海海区、山东、江苏、安徽等地,太湖北岸空气质量恶化。利用卫星监测图像、污染气体、污染颗粒物、能见度及气象探空资料分析了这次沙尘天气过程对太湖北岸城市不同粒径颗粒物和空气质量的影响,并讨论了这次沙尘天气过程产生的原因。结果显示,沙尘影响期间太湖北岸城市污染气体及污染颗粒物都出现了较大变化,PM₁₀、PM_{2.5-10}和PM_{2.5}的最大值分别为505.6 μg/m³、139.2 μg/m³、和367.3 μg/m³,比沙尘影响前增大了10倍、25倍和12倍;除NO₂的变化趋势与污染颗粒物基本一致外,NO、SO₂、O₃、CO的变化则呈相反趋势。沙尘天气影响后,降雨pH值从4.9增大为6.42,由中度酸性转为中性,降雨电导率由87.5 us/cm增大为162.7 us/cm,说明空气污染使雨水变脏。

关键词:沙尘;空气污染;PM_{2.5};PM₁₀;太湖北岸

中图分类号:X51

文献标志码:A

Effects of sand dust weather on air quality of cities in north bank of Taihu Lake

LIU Duanyang, CAO Dengfeng, CHEN Shuyang, ZHOU Bin, XIA Jian, QIAN Haozhong

(Wuxi Meteorological Observatory of Jiangsu Province, Wuxi 214101, China)

Abstract:Dust storm at 1-2 May, 2011 influenced the Yellow Sea area, Shandong Province, Anhui Province, and Jiangsu Province, and worsened the air quality of cities on the north bank of Taihu Lake. In this research, using satellite monitoring images, air pollutant gas, pollutant particle visibilities and meteorological sounding data, the impacts of the sand dust weather on particles with different sizes and the air quality were analyzed, and the cause of this dust weather process was discussed as well. The results show that, the maximum concentrations of PM₁₀, PM_{2.5-10} and PM_{2.5} are 505.6 μg/m³, 139.2 μg/m³, and 367.3 μg/m³ respectively, and increased by 11 times, 26 times and 13 times, respectively compared to the situation before the dust storm. NO₂ mass concentration has the similar variation tendency with that of pollutant particles, but NO, SO₂, O₃, and CO show opposite tendencies. The pH values of precipitation changed from 4.9 before dust storm to 6.42 after the storm, suggesting the rainwater changed from moderately acid to neutral. The electrical conductivity of precipitation varied from 87.5 us/cm to 162.7 us/cm, illustrating that the air pollution made the rainwater dirty.

Key words:dust storm; air pollution; PM_{2.5}; PM₁₀; north bank of Taihu Lake

收稿日期:2012-10-31; 修回日期:2012-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41005089);江苏省气象局预报员专项(201212,201204);江苏省科技支撑计划社会发展重大项目(BE2012771);公益性行业专项(GYHY201206011-04)

作者简介:刘端阳(1981-),男,博士,主要从事雾霾物理化学特征及气候特征研究. E-mail:liuduanyang2001@126.com

沙尘天气(包括沙尘暴、扬沙、浮尘)是我国北方春季最常发生的天气现象^[1-5],它不仅对生态环境造成严重破坏,降低城市空气质量^[6-14],还会引起呼吸系统及心血管疾病^[15-19],对人体健康造成严重影响,因此对沙尘天气的研究越来越引起国内外学者的广泛重视^[20-36]。我国对沙尘天气的研究主要在西北及华北地区,而鉴于影响频次较少的缘故,对于华东尤其是长三角一带的沙尘天气研究比较少,俞剑蔚等^[1]对江苏地区沙尘天气的时空特征进行了统计分析,发现江苏沙尘天气在空间上呈北多南少、西多东少的分布。师育新等^[41]、崔文岭等^[42]则对沙尘远距离传输对上海地区大气颗粒物组分影响进行了研究,丁铭等^[43]对 2010 年影响江苏的沙尘天气中可吸入颗粒物浓度做了分析。虽然沙尘每年影响长三角地区的频次较少,但每次影响期间对城市空气质量造成的影响是值得重视的。

2011 年 4 月 28 日至 5 月 4 日,我国西北、华北、东北以及华东地区出现了一次浮尘及扬沙天气过程,此次过程对长三角地区的城市空气质量造成了严重的影响。本文基于这次沙尘天气过程影响无锡时的各种监测资料,分析大气颗粒物粗细粒子及大气能见度随沙尘发生过程的变化特征及其对无锡城市空气质量的影响,对沙尘影响期间的天气形势和边界层特征进行了分析,并讨论了沙尘粒子的传输路径和潜在源区,对今后更好的预报此类天气过程的空气质量具有重要的借鉴作用。

1 资料概况及天气过程简述

1.1 资料概况

本文所用的沙尘暴卫星监测图像来自于中国气象局国家卫星气象中心资料;地面资料来自于常规气象资料;污染气体(SO₂,NO,NO₂,NO_x,CO,O₃)资料来自于无锡市环境监测站,观测点位于无锡市环保局楼顶;污染颗粒物资料来自于无锡市气象局灰霾观测点 PM2.5,PM10 逐时资料,观测点位于无锡市国家基本气象观测站楼顶;能见度及风向、风速、气温、气压、相对湿度、雨量(1 h)及酸雨资料来自无锡市国家基本气象观测站逐小时资料;探空资料来自于南京、上海和杭州气象高空站。

本文还应用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)研制的 HYSPLIT4.8 轨迹模式^[24],计算了 2011 年 5 月 1 日 18 时及 2011 年 5 月 2 日 18 时污染物浓度最高时近地层和边界层中上部 72h 后向轨迹,轨迹起始点分别设在离地面 100 m,500 m,1 000 m 和 2 000 m,对应于该地区边界层中上部。

1.2 天气过程简介

从 2011 年 4 月 28 日至 5 月 4 日,受东移的蒙古气旋影响,新疆南部、内蒙古西部和中部、西北地区中部和东部、华北以及内蒙古东部和东北地区自西向东陆续出现了沙尘天气,部分地区出现了沙尘暴。5 月 1 日上午气象卫星监测到本次天气过程造成的沙尘影响区域已移至我国东北地区南部、山东半岛东部、黄海海区以及朝鲜半岛和日本海海域,经估算,卫星可视的沙尘影响面积约 39.9 万 km²。

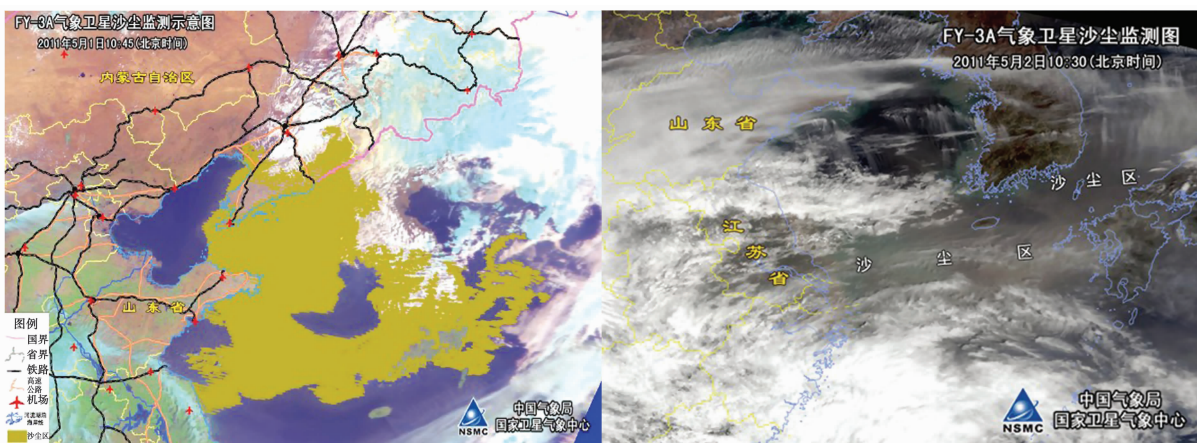


图 1 国家卫星气象中心 2011 年 5 月 2 日 FY-3A 气象卫星沙尘监测图像

Fig. 1 Dust storm-monitoring image from meteorological satellite FY-3A of China National Satellite Meteorological Center on May 2, 2011

受高空槽后偏北大风影响,5 月 2 日上午 10:30 的 FY-3A 气象卫星监测到,连续两天来先后影响我国

东北、黄淮和黄海海区的沙尘天气,5月2日继续影响黄海海区、朝鲜半岛和日本海海域,另外,山东、江苏、安徽等地的局部地区也受到尘霾的影响,但部分尘霾区被云系覆盖。从卫星云图上看,研究地点无锡受到沙尘影响(图1)。

2 结果分析

2.1 沙尘天气过程颗粒物质量浓度的变化及污染物的对比分析

2.1.1 颗粒物质量浓度的变化

表1 2011年5月1-3日沙尘影响期间不同阶段颗粒物质量浓度参数
Table 1 Concentration of air particulates at different stages during May 1-3, 2011

		时间段	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}	PM ₁₀
平均值	1	2011-05-01T09至2011-05-02T09	228.9	86.5	315.4
	2	2011-05-02T10至2011-05-03T06	225.4	84.7	310.0
	总	2011-04-30T00至2011-05-04T23	113.8	35.6	149.3
最小值	1	2011-05-01T09至2011-05-02T09	100.3	28.6	128.8
	2	2011-05-02T10至2011-05-03T06	85.8	40.5	126.2
	总	2011-04-30T00至2011-05-04T23	36.7	5.5	42.4
中间值	1	2011-05-01T09至2011-05-02T09	211.9	86.5	293.9
	2	2011-05-02T10至2011-05-03T06	202.7	83.1	285.8
	总	2011-04-30T00至2011-05-04T23	80.5	15.6	93.4
最大值	1	2011-05-01T09至2011-05-02T09	367.3	139.2	505.6
	2	2011-05-02T10至2011-05-03T06	345.2	127.4	447.7
	总	2011-04-30T00至2011-05-04T23	367.3	139.2	505.6

表1为这次沙尘影响前后(2011年4月30日00时至2011年5月4日23时)无锡不同粒径颗粒物质量浓度的基本特征,沙尘影响期间PM₁₀、PM_{2.5-10}、PM_{2.5}的最大值分别,505.6 μg/m³,139.2 μg/m³,和367.3 μg/m³,平均分别为149.3 μg/m³,35.6 μg/m³和113.8 μg/m³,最小值都出现在沙尘影响以前,分别为42.4 μg/m³,5.5 μg/m³和36.7 μg/m³。这次沙尘天气过程又分为两个阶段(2011-05-01T09至2011-05-02T09和2011-05-02T10至2011-05-03T06),下面对这两个阶段的颗粒物浓度的变化进行详细分析。

图2为沙尘天气过程前后无锡市人工能见度以及PM₁₀、PM_{2.5}质量浓度随时间的变化曲线,图中PM₁₀与PM_{2.5}的质量浓度的差值为粗粒子PM_{2.5-10}的质量浓度。沙尘影响过程中,颗粒物质量浓度出现了两个峰值,PM_{2.5-10}粒子在沙尘影响期间虽然所占比较高,但PM₁₀内仍以PM_{2.5}所占比较大。沙尘影响之前,无锡出现短暂降水,受其影响,能见度从4月30日20时的18000 m下降到5月1日02时的5000 m,这时PM_{2.5}为过程中最低36.7 μg/m³,粗粒子也仅5.5 μg/m³,PM₁₀仅42.4 μg/m³。之后沙尘天气开始影响无锡,颗粒物质量浓度随之升高,沙尘影响期间,无锡市能见度基本在12000 m以下,其中最低能见度出现在沙尘影响最强时段,为6000~7000 m。

从图2可以看出,在第1个阶段中5月1日08时之前各种颗粒物的质量浓度都比较小,其中PM_{2.5}基本都在100 μg/m³以下,PM_{2.5-10}在20 μg/m³以下,PM₁₀在120 μg/m³左右,PM_{2.5}占PM₁₀的比例在80%以上。5月1日08时以后各粒径颗粒物质量浓度增长很快,PM_{2.5}从08时的86.7 μg/m³增大到21时的367.3 μg/m³,PM_{2.5-10}则从08时的18.8 μg/m³增大到21时的137.9 μg/m³,PM₁₀则从08时的105.5 μg/m³增大到21时的505.6 μg/m³,都达到了第1阶段的最大值,分别比沙尘影响前增大了10倍、25倍和12倍,而这一阶段中PM_{2.5}占PM₁₀的比例下降到75%以下。之后沙尘天气略有减弱,PM_{2.5}于2日09时下降到141.3 μg/m³,PM_{2.5-10}下降到40.6 μg/m³,PM₁₀在181.9 μg/m³。

在沙尘暴的第2个阶段中,各粒径的颗粒物浓度再次增大,2日18时PM_{2.5}增大到345.2 μg/m³,PM_{2.5-10}增大到127.4 μg/m³,PM₁₀达447.7 μg/m³,分别比沙尘影响前增大了9.4倍、23倍和10.6倍。3日01时之后各类颗粒物浓度急剧下降,PM_{2.5}下降到80 μg/m³,PM_{2.5-10}下降到50 μg/m³,但仍然高于沙尘之前

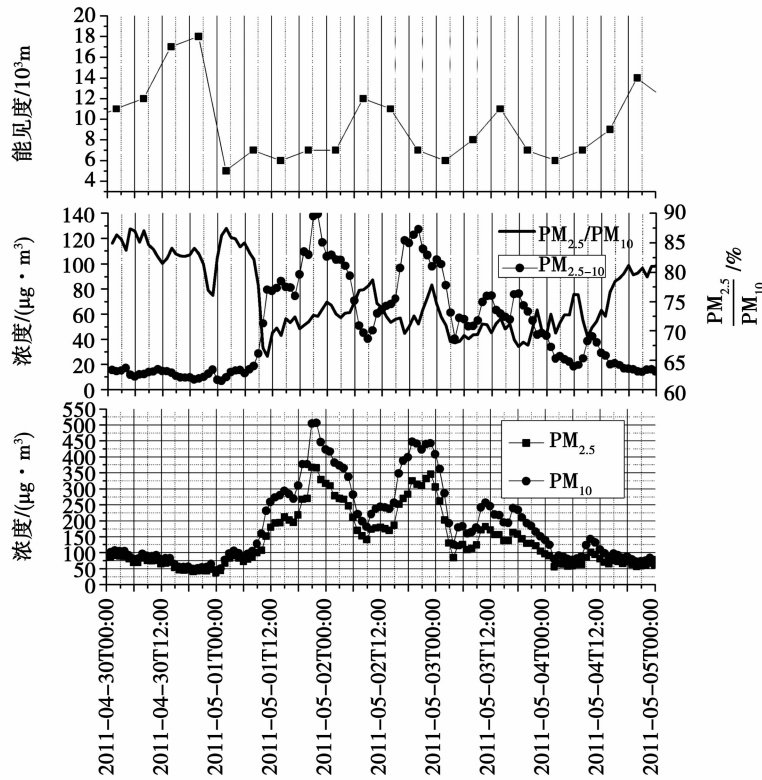


图2 2011年5月1-3日沙尘暴前后污染颗粒物的质量浓度及人工能见度随时间的变化

Fig.2 Mass concentration distribution of particulates and visibilities during the dust storm from May 1st to 3ed 2011

的浓度。一直到4日00时以后,颗粒物浓度才与沙尘前持平。

2.1.2 相关污染物的变化特征

沙尘影响期间不仅颗粒物质量浓度出现了显著的起伏变化,各种污染气体受其影响也出现了不同程度的变化。图3中给出了污染气体在沙尘暴前后的质量浓度的变化特征。从图可以看出,NO₂的质量浓度在沙尘暴前后的变化趋势与污染颗粒物基本一致,即在沙尘来临前质量浓度很小,在0.1~0.18 µg/m³,沙尘暴影响期间,质量浓度增大到0.50 µg/m³,在第2次沙尘暴过程中则达到了0.60 µg/m³;而NO及NO_x占NO_x的比例则呈现相反的趋势,沙尘暴影响前NO的质量浓度比较高,在0.04~0.09 µg/m³,占NO_x比例在40%以上,受到沙尘暴影响以后,其质量浓度下降到0.02~0.30 µg/m³,且所占比例下降到20%以下。第2次过程中质量浓度以及所占比例也略有下降。

沙尘天气过程中其他的污染气体SO₂,O₃,CO的变化与NO基本一致,受沙尘天气过程影响,其质量浓度呈现下降趋势,而在沙尘影响结束后,这几种污染气体浓度再次增大。整个过程中,SO₂最大达到0.19 µg/m³,平均为0.05 µg/m³,O₃最大达到0.14 µg/m³,平均为0.05 µg/m³,CO最大达到2.00 µg/m³,平均为0.54 µg/m³。

表2 沙尘影响前后无锡市降雨pH值及电导率(K值)的变化

Table 2 pH values and K values before and after dust storm in Wuxi

日期	降水时段	降水量/mm	pH值	K值/(us·cm ⁻¹)	风向	风速/(m·s ⁻¹)
2011-04-30	22:10-23:00	1.4	4.9	87.5	NNE	2.5
2011-05-03	01:20-03:00	1.3	6.42	162.7	ESE	4.5

沙尘影响前后,无锡市降雨的pH值及电导率(K值)也出现了非常大的变化(表2)。2011年4月30日沙尘影响前无锡出现约1h降雨,降水量1.4mm,降水pH值为4.9,呈中度酸性,K值为87.5us/cm,而在沙尘天气影响之后,5月3日凌晨出现了约2h的降雨,降水量为1.3mm,降水pH值为6.42,呈中性,K值为162.7us/cm,受沙尘天气影响以后,降雨由中度酸性转为中性,降雨中离子浓度增大较多,电导率较沙尘天气前增大了一倍。

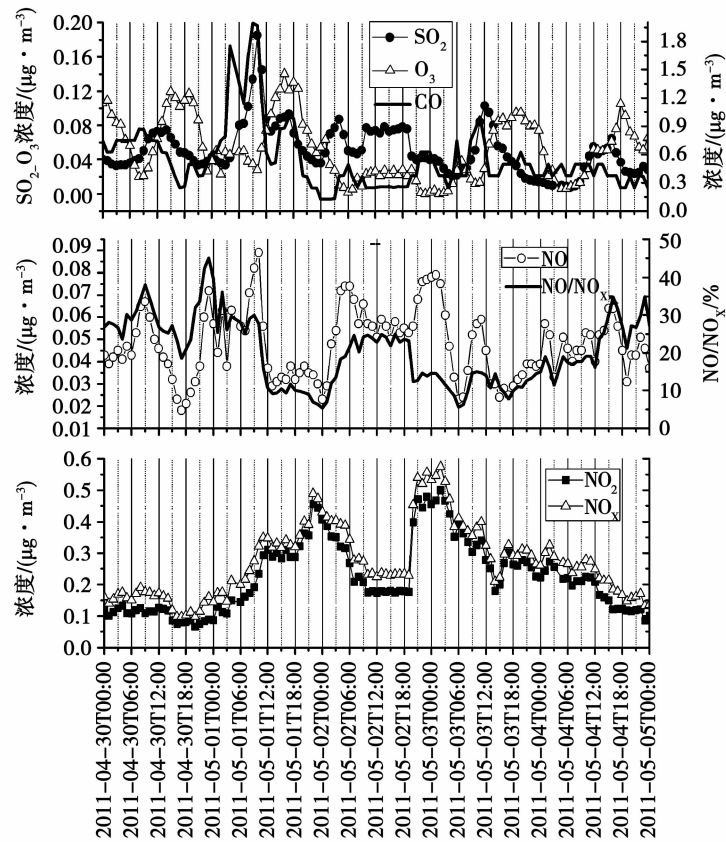


图3 2011年5月1-3日沙尘暴前后污染气体的质量浓度随时间的变化

Fig. 3 Change of pollutant gas quantitative concentration with time before and after duststorm during May 1-3, 2011

2.2 天气形势分析

从4月29日至5月3日夜里有明显冷空气影响我国中东部地区,5月1日以后500 hPa、700 hPa 高空受沿海槽后一致西北气流控制,850 hPa 为偏北气流,沙尘天气第一阶段开始;2日08时500 hPa、700 hPa 转为西南气流,850 转为东北气流,第1阶段减弱,下午以后500 hPa 转受偏西气流控制,700 hPa 切变处在江淮之间转受偏南气流东北气流影响控制,850hPa 东北气流控制,第2阶段继续影响,3日500 hPa 又受西北气流影响,700 和 850 hPa 东北气流影响,沙尘天气结束。

而从地面图上可以看出,5月1日以后地面受西北气流影响,沙尘天气第1阶段开始影响安徽中部及江苏南部的南京、无锡和苏州,1日20时苏南及浙江北部的城市都观测到沙尘天气,2日08时则受人海高压影响,第一阶段减弱,下午以后沿江一带有一弱高压带,第2阶段继续影响,3日又受高压均压场控制,沙尘天气结束(图4)。

2.3 边界层特征

从无锡周边的南京、上海和杭州3个高空站的探空资料可以看出(图5),在5月1-3日沙尘天气影响期间,3站的探空曲线的温度廓线中都出现了逆温层结。其中南京站在1日08时沙尘开始影响时未出现逆温层结,20时750~700 hPa 高度出现逆温层结,2日08时在950 hPa 以下出现逆温层,2日20时底层逆温消失,700 hPa 附近逆温强度加强,3日20时逆温消失。上海站1日08时仅在750 hPa 附近有弱逆温,20时继续维持,2日08时除了在700~750 hPa 附近有逆温存在外,950 hPa 以下也出现了逆温层结,且强度较大,之后底层逆温减弱消失,700 hPa 逆温持续到3日20时;杭州站的逆温结构比南京和上海出现较晚,且仅为单层结构在2日08时至20时在900~750 hPa 出现了深厚的逆温结构。这种逆温结构有利于污染物的堆积,加剧了空气污染。

2.4 地面气象要素的变化

在沙尘影响期间,无锡市的空气相对湿度都比较低,从1日03时90%下降到08时的40%左右,而一直到2日21时,相对湿度都在50%以下。在沙尘影响期间,沙尘影响期间风速在3 m/s左右,颗粒物质量浓度随着风速的增大而增大;近地面主要以东北风和偏东风为主;受高压均压场影响,气压在沙尘期间都比较高,

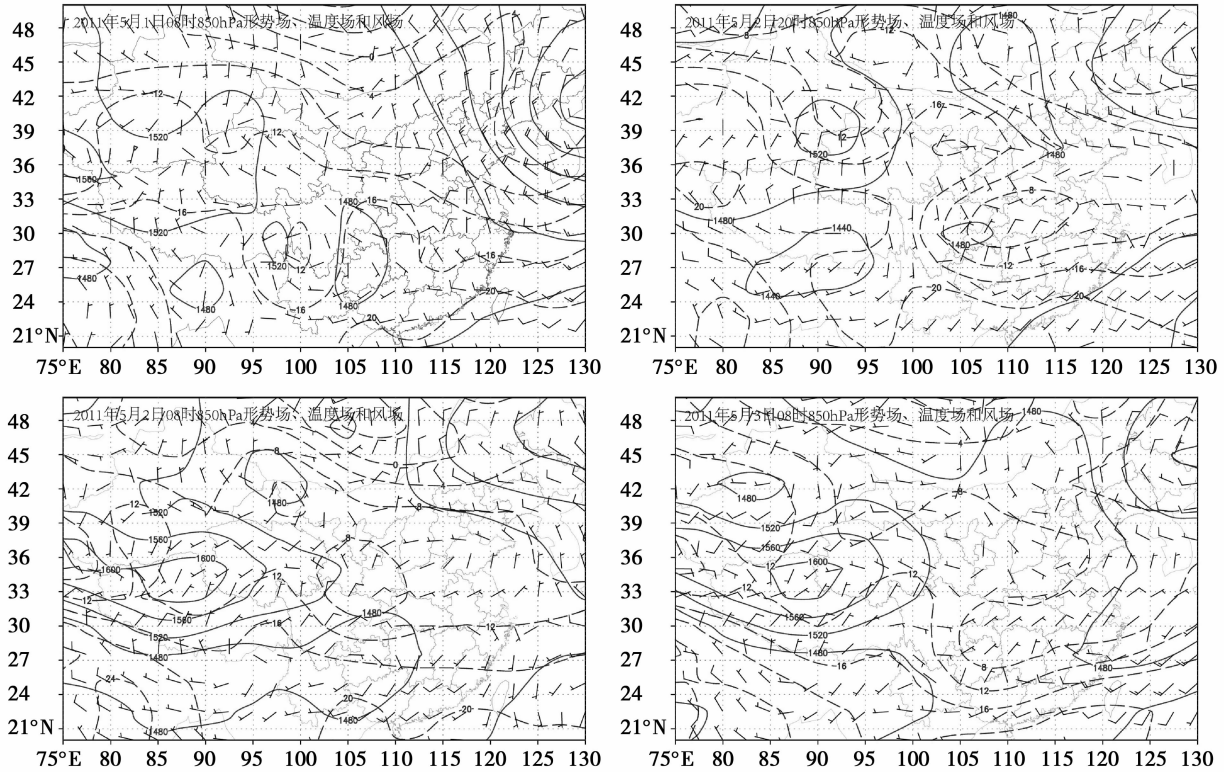


图 4 2011 年 5 月 1 - 3 日沙尘影响期间 850hPa 高度场及风场 (图中实线为等高线,虚线为等温线)

Fig.4 Altitude field and wind field of 850 hPa during dust storm period of May 1 - 3,2011

(real lines: isohgight, broken lines: isothermal line)

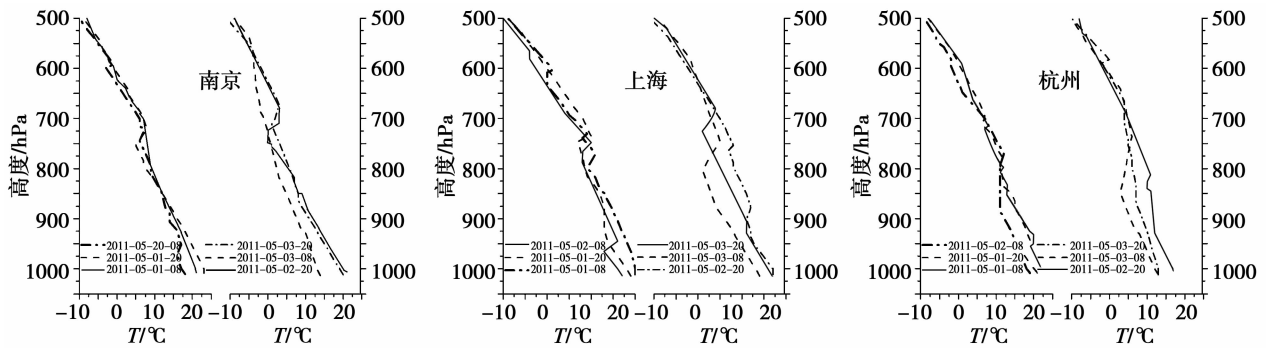


图 5 2011 年 5 月 1 - 3 日沙尘影响期间南京、上海及杭州 08 时及 20 时气温廓线

Fig.5 Air temperature profiles of Nanjing, Shanghai and Hangzhou at 8:00:00 and 12:00:00

during dust storm period of May 1 - 3,2011

在转受北风影响以后,出现降雨;气温则存在显著的日变化特征,正午前后最高,午夜最低,而 2 日夜里受降雨以及偏北风影响,气温下降较快。3 日 01 时无锡出现了降雨过程,图 6 中给出了每 h 降雨量,受降雨影响,空气中颗粒物质量浓度出现较大下降,沙尘天气结束。

2.5 污染物后向轨迹分析

为了分析沙尘影响期间污染物的来源,用后向轨迹分析了不同高度(100 m, 500 m,1 000 m,2 000 m)气团的 72 h 后向轨迹,本研究中选择了 1 日 18 时和 2 日 18 时两个污染物浓度最高的时刻作为后向轨迹的时间点。从图 7 可以看出,1 日 18 时各高度层的 72 h 前气团均来自蒙古国和我国内蒙古中部地区,即沙尘暴的沙源地,在气团到达无锡 24 h 前,上面 3 层气团均出现了显著的气团下沉运动,而 100 m 气团也在 40 h 前也出现了下沉运动;而对于这次沙尘天气过程的第 2 个阶段,不同高度气团则是来自不同区域且与前 1 个阶段的来源不同,2 000 m 高度气团 72 h 前来自于我国蒙古中部河套地区,直接到达无锡,而以下 3 层则来自蒙古国东部到我国蒙古东部地区,在过了山东半岛后沿海岸线到长江口附近,在 24 h 前转受东北气流影响

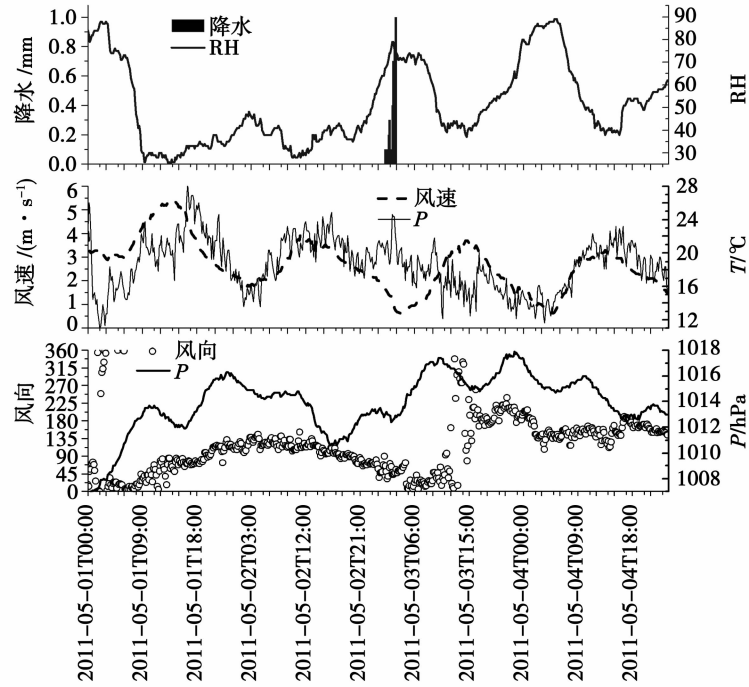


图 6 2011 年 5 月 1 - 3 日沙尘影响期间无锡站风向、风速、气压、气温、相对湿度及降雨量(1h 雨量)时间变化
 Fig.6 Variability of meteorological elements (wind directions, wind speeds, pressure, temperature, RH and 1 hour precipitation) during May 1st and 3rd 2011 in Wuxi

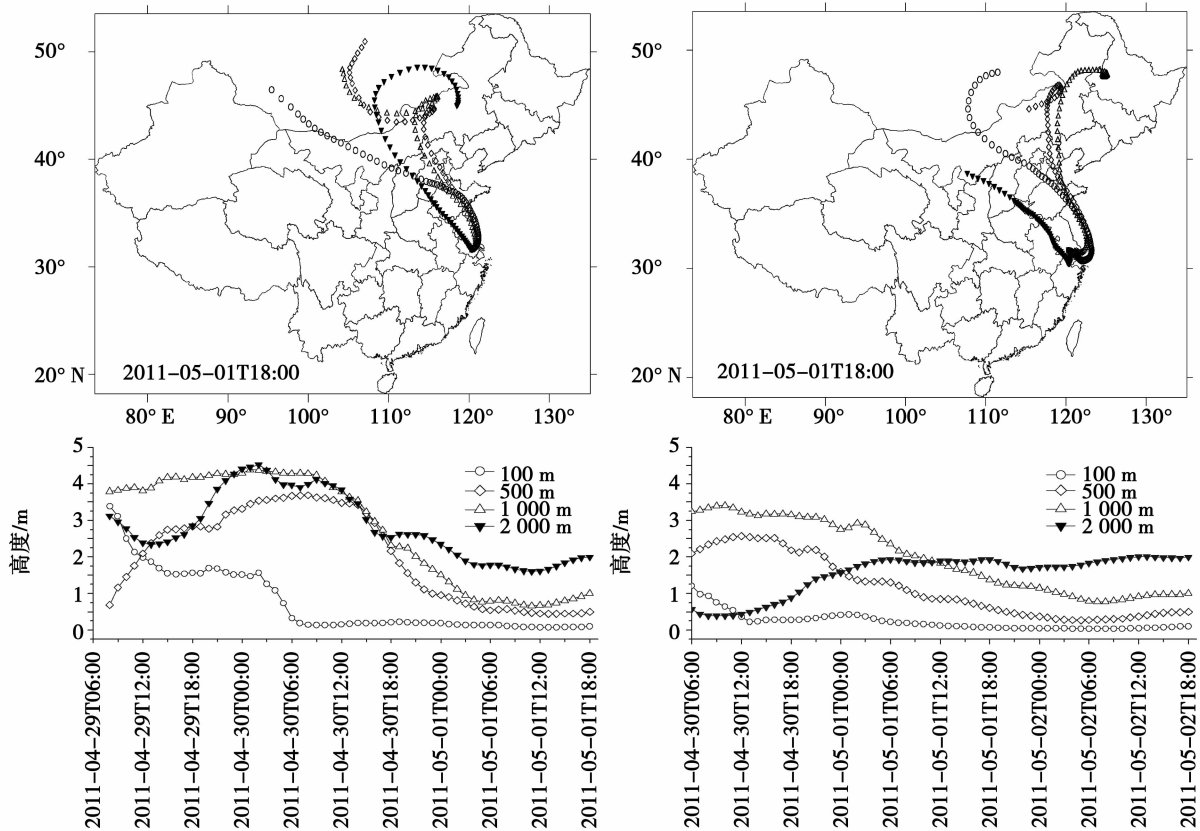


图 7 沙尘影响期间无锡站不同高度气团后向轨迹模拟
 (5 月 1 日 18 时及 2 日 18 时,北京时;气团高度:100 m, 500 m,1 000 m,2 000 m)
 Fig.7 Simulation of back -trajectories of air mass with different altitude at Wuxi Station during dust storm influenced period

折向陆地影响无锡。而气团高度中,2 000 m 高度气团在其运行轨迹上出现了上升和下沉过程,以下 3 层气团则都为下沉气团。

3 结 论

(1)2011 年 5 月 1-2 日沙尘天气影响期间,无锡市大气 PM_{10} 、 $PM_{2.5-10}$ 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度最大值分别, $505.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $139.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 和 $367.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均分别为 $149.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $35.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $113.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 最小值都出现在沙尘影响以前,分别为 $42.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $36.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。颗粒物质量浓度出现了两个峰值, $PM_{2.5-10}$ 在沙尘影响期间虽然所占比较高,但整个过程中 PM_{10} 内仍以 $PM_{2.5}$ 所占比较大。

(2)整个沙尘天气过程中, NO_2 的质量浓度达到了 $0.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$; SO_2 最大达到 $0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, O_3 最大达到 $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CO 最大达到 $2.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 $0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(3) NO_2 的变化趋势与污染颗粒物基本一致,沙尘天气影响前质量浓度较低,沙尘影响期间质量浓度增大。而 NO , SO_2 , O_3 , CO 的变化则呈相反趋势,受沙尘天气过程影响,其质量浓度呈现下降趋势,沙尘影响结束后,这几种污染气体浓度再次增大。

(4)沙尘天气影响后,降雨由中度酸性转为中性,降雨电导率增大了一倍。2011 年 5 月 1-3 日沙尘影响期间,南京、上海和杭州 3 站的探空曲线的温度廓线中都出现了逆温层结,逆温层结不利于污染物的扩散,加重了空气污染。

(5)沙尘影响期间风速在 $3\text{m}/\text{s}$ 左右,颗粒物质量浓度随着风速的增大而增大;近地面主要以东北风和偏东风为主;受高压均压场影响,气压在沙尘期间都比较高,在转受北风影响以后,出现降雨;气温则存在显著的日变化特征,正午前后最高,午夜最低,而 2 日夜里受降雨以及偏北风影响,气温下降较快。3 日 01 时无锡出现了降雨过程,图 6 中给出了每 h 降雨量,受降雨影响,空气中颗粒物质量浓度出现较大下降,沙尘天气结束。

(6)1 日 18 时各高度层的 72 h 气团均来自蒙古国和我国的蒙古中部地区,即沙尘暴的沙源地,在气团到达无锡 24 h 前,上面 3 层气团均出现了显著的气团下沉运动,而 100 m 气团也在 40 h 前也出现了下沉运动;沙尘过程第 2 个阶段,2 000 m 高度气团 72h 前来自于我国蒙古中部河套地区,直接到达无锡,以下 3 层则来自蒙古国东部到我国蒙古东部地区,在过了山东半岛后沿海岸线到长江口附近,在 24h 前转受东北气流影响折向陆地影响无锡。

参 考 文 献:

- [1] 俞剑蔚,王元,沈树勤,等. 江苏地区沙尘天气时空特征及气候变化分析[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 45-49.
YU Jianwei, WANG Yuan, SHEN Shuqin, et al. Analysis on the climate change characteristics of sand/dust days as well as its temporal and spatial features over Jiangsu region[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(1): 45-49. (in Chinese)
- [2] 王存忠,牛生杰,王兰宇. 中国 50a 来沙尘暴变化特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 933-939.
WANG Cunzhong, NIU Shengjie, WANG Lanning. Spatial and temporal pattern of sand-dust storms in China during 1958-2007 [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 933-939. (in Chinese)
- [3] Escudero M, Querol X, Pey J, et al. A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41 (26): 5516-5524.
- [4] QIU Xinfa, ZENG Y, MIAO Qilong. Sand-dust storms in China: temporal-spatial distribution and tracks of source lands [J]. Journal of Geographical Sciences, 2001(3): 316-322.
- [5] SUN J M, ZHANG M Y, LIU T S. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate [J]. J Geophys Res, 2001, 106: 10325-10334.
- [6] 马雁军,刘宁微,洪也,等. 2011 年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(05): 1160-1167.
MA Yanjun, LIU Ningwei, HONG Ye, et al. The impacts on various particle sizes and the air quality caused by a dust weather process in Spring 2011 in Liaoning [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(5): 1160-1167. (in Chinese)
- [7] 陈辉,赵琳娜,赵鲁强,等. 沙尘天气过程对北京空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 609-614.
CHEN Hui, ZHAO Linna, ZHAO Luqiang, et al. Effects of sand dust weather on the air quality of Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(6): 609-614. (in Chinese)
- [8] 宁海文,王式功,杜继稳. 西安沙尘天气特征及其对空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 886-890.

- NING Haiwen, WANG Shigong, DU Jiwen. Characteristics of sand - dust events and their Influence on air quality of Xi'an City [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25 (6) : 886 - 890. (in Chinese)
- [9] Zhang Q, Laurent B, Velay Lasry F, et al. An air quality forecasting system in Beijing - Application to the study of dust storm events in China in May 2008 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24 (1) : 102 - 111.
- [10] Ganor E, Stupp A, Alpert P. A method to determine the effect of mineral dust aerosols on air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43 (34) : 5463 - 5468.
- [11] Lai L W, Cheng W L. The impact of air quality on respiratory admissions during Asian dust storm periods [J]. *International Journal Of Environmental Health Research*, 2008, 18 (6) : 429 - 450.
- [12] Ozer P, Laghdaf M, Lemine S, et al. Estimation of air quality degradation due to Saharan dust at Nouakchott, Mauritania, from horizontal visibility data [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2007, 178 (1/2 / 3/4) : 79 - 87.
- [13] Liu C M, Young C Y, Lee Y C. Influence of Asian dust storms on air quality in Taiwan [J]. *The Science of The Total Environment*, 2006, 368 (2/3) : 884 - 897.
- [14] YiuChung C, McTainsh G, Leys J, et al. Influence of the 23 October 2002 Dust Storm on the Air Quality of Four Australian Cities [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2005, 164 (1/2 / 3/4) : 329 - 348.
- [15] 赵效国, 周晶, 王旗, 等. 新疆南部两城市沙尘天气对成人健康的影响 [J]. *环境与健康杂志*, 2011, 28 (10) : 887 - 889.
ZHAO Xiaoguo, ZHOU Jing, WANG Qi, et al. Effects of dust event on adults health in Southern Xinjiang [J]. *J Environ Health*, 2011, 28 (10) : 887 - 889. (in Chinese)
- [16] 冯鑫媛, 王式功, 杨德保, 等. 近几年沙尘天气对中国北方环保重点城市可吸入颗粒物污染的影响 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31 (3) : 735 - 740.
FENG Xinyuan, WANG Shigong, YANG Debao, et al. Influence of dust events on PM10 pollution in key environmental protection cities of Northern China during recent years [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31 (3) : 735 - 740. (in Chinese)
- [17] 孟紫强, 张全喜. 沙尘暴 PM2.5 对大鼠肺、心、肝组织的氧化损伤效应 [J]. *卫生研究*, 2006, 35 (6) : 690 - 693.
Meng Ziqiang, Zhang Quanxi. Effects of dust storm fine particles instillation on oxidative damage in hearts, livers, lungs of rats [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2006, 35 (6) : 690 - 693. (in Chinese)
- [18] 耿红, 孟紫强, 张全喜. 沙尘暴 PM2.5 水溶和有机成分对巨噬细胞的损伤 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26 (1) : 20 - 24.
GENG Hong, MENG Ziqiang, ZHANG Quanxi. Damage of water - soluble and organic compositions of dust storm PM2.5 on macrophages [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26 (1) : 20 - 24. (in Chinese)
- [19] De Longueville F, Hountondji Y. - C, Henry S, et al. What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions [J]. *The Science of the Total Environment*, 2010, 409 (1) : 1 - 8.
- [20] Xie Yuanyun, Zhang Yan, He Kui, et al. Features of Sand - dust Deposits in Harbin City, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2006, 16 (4) : 327 - 333.
- [21] Li Wei, Zhai Panmao. Variability in occurrence of China's Spring sand/dust storm and its relationship with atmospheric general circulation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(4) : 17 - 26.
- [22] Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming, et al. Observational studies on sand/dust storm in Helan Mountainous area [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15(4) : 106 - 118.
- [23] Liu Chuntao, Cheng Linsheng. Parameterization of mobilization and transport of sand/dust during black storm and mesoscale numerical experiments [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 13(3) : 64 - 78.
- [24] Draxler R P, Hess G D. An overview of the HYSPLIT - 4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. *Aust Meteor Mag*, 1998, 47 : 295 - 308.
- [25] Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long - range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability [J]. *Science*, 1980, 209 : 1522 - 1524.
- [26] Gong D Y, Mao R, Shi P J, et al. Correlation between East Asian dust storm frequency and PNA [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L14710.
- [27] Husur R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. Asian dust events of April 1998 [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106 : 18317 - 18330.
- [28] Tratt D M, Frouin R J, Westphal D L. April 1998 Asia dust event: A southern California perspective [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106 : 18731 - 18739.
- [29] Uematsu M, Duce R A, Prospero J M, et al. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean [J]. *J Geophys Res*, 1983, 88 : 5342 - 5352.
- [30] Wang S G, Wang J Y, Zhou Z J, et al. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China [J]. *Atmos Environ.*, 2005, 39 (3) : 509 - 520.
- [31] Wang S G, Yuan W, Shang K Z. The impacts of different kinds of dust events on PM10 pollution in northern China [J]. *Atmos Environ*, 2006, 40(40) : 7975 - 7982.
- [32] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loading at Xi'an, China during Spring [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368 : 875 - 883.
- [33] Yu J Y, Wang Y W, Chang C W. Asian dust storm activity and its association with atmospheric circulation from 1995 to 2006 [J]. *TAO*, 2010,

- 21(2): 375 – 391.
- [34] 贾晓鹏, 陈开锋. 沙尘事件对兰州河谷大气环境 PM10 的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31 (06): 1573 – 1578.
JIA Xiaopeng, CHEN Kaifeng. Impact of dust events on air PM10 concentration in the Lanzhou Valley [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31 (06): 1573 – 1578. (in Chinese)
- [35] 陶健红, 黄玉霞, 陆登荣. 河西走廊沙尘活动对兰州 PM10 浓度的影响及其评估[J]. 中国沙漠, 2007, 27 (4): 672 – 676.
TAO Jianhong, HUANG Yuxia, LU Dengrong. Influence of sand – dust activities in Hexi Corridor on PM10 concentration in Lanzhou and its assessment [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27 (4): 672 – 676. (in Chinese)
- [36] 任晰, 胡非, 胡欢陵, 等. 2000—2002 年沙尘现象对北京大气中 PM10 质量浓度的影响评估[J]. 环境科学研究, 2004, 17 (1): 51 – 55.
REN Xi, HU Fei, HU Huanling, et al. Effect of sand – dust on the concentration of atmospheric PM10 in Beijing during 2000 to 2002 [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17 (1): 51 – 55. (in Chinese)
- [37] 王存忠, 牛生杰, 王兰宁. 沙尘暴变化的时空特征——基于站日和站时数据的对比分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 199 – 203.
WANG Cunzhong, NIU Shengjie, WANG Lanning. Spatiotemporal characteristics of sand – dust storm change: a contract study based on station – day and station – hour data [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(5): 199 – 203. (in Chinese)
- [38] 王静, 牛生杰, 沈建国. 锡盟沙尘暴的时空分布及其与气候因子的关系[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 209 – 216.
WANG Jing, NIU Shengjie, SHEN Jianguo. Spatiotemporal distribution of sand – dust storm in Xilingol League and its correlation with climate factors [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 209 – 216. (in Chinese)
- [39] 邱玉珺, 牛生杰, 岳平, 等. 内蒙古沙尘气溶胶浓度及其输送特性——朱日和春季情形的个例研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 44 – 51.
QIU Yujun, NIU Shengjie, YUE Ping, et al. Dust aerosol concentration and its transportation characteristics in Inner Mongolia: a case study of Zhurihe in spring [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6): 44 – 51. (in Chinese)
- [40] 邱玉珺, 牛生杰, 邹学勇, 等. 北京沙尘天气成因概率研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 93 – 98.
QIU Yujun, NIU Shengjie, ZOU Xueyong, et al. Probability study on causes of dust events in Beijing [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 93 – 98. (in Chinese)
- [41] 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 等. 上海春季沙尘与非沙尘天气大气颗粒物粒度组成与矿物成分[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (5): 780 – 785.
SHI Yuxin, DAI Xuerong, SONG Zhiguang, et al. Particle size distribution and mineral components of atmospheric particles collected in Spring of Shanghai [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26 (5): 780 – 785. (in Chinese)
- [42] 崔文岭, 郭瑞, 张浩. 亚洲沙尘由蒙古戈壁向长江三角洲的传输及其与污染气溶胶的混合特征[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2009, 48 (5): 585 – 592.
CUI Wenling, GUO Rui, ZHANG Hao. The long – range transport of dust from Mongolia Gobi to the Yangtze river basin and its mixing with pollutant aerosols [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2009, 48 (5): 585 – 592. (in Chinese)
- [43] 丁铭, 李健军, 郁建桥, 等. 北方沙尘对江苏环境中可吸入颗粒物浓度的影响[J]. 干旱环境监测, 2010, 24 (4): 218 – 221.
DING Ming, LI Jianjun, YU Jianqiao, et al. Effect of northern dust for respirable particulate matter concentration environmental in the air in Jiangsu Province [J]. Arid Environmental Monitoring, 2010, 24 (4): 218 – 221. (in Chinese)