灰霾不同阶段含碳颗粒物的污染特征及湿清除

高 嵩¹,张雯淇²,张园园²,鲍孟盈²,刘晓妍²,汤天然³,章炎麟²,曹 芳² (1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘 要:为了研究南京市北郊冬季灰霾不同阶段中的含碳颗粒物化学组分变化及湿清除作用,采用 DRI Model2001A 热/光碳分 析仪对 2015 年 1 月南京市北郊采集的大气 $PM_{2.5}$ 样品中的有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elementary carbon, EC)的质量 浓度进行分析。结果表明,南京市北郊冬季 $PM_{2.5}$ 、OC 和 EC 的平均质量浓度分别为 279.64、18.58 和 6.29 μ g/m³,属于国内较 高水平,并存在一定程度的二次污染。与清洁日相比,灰霾日 $PM_{2.5}$ 、总碳(total carbon, TC)、OC 和 EC 的质量浓度更高、变化 范围更大,灰霾期间的二次污染作用强于清洁日期间,含碳颗粒物对 $PM_{2.5}$ 的贡献率在灰霾的生成和消除阶段都较为稳定;降水 过程对含碳颗粒物的湿清除作用显著,清除效果与降水强度有关,且降水对于 OC、EC 的清除效率大于二次有机物(secondary organic carbon, SOC)。

关键词:应用气象学;灰霾;含碳颗粒物;湿清除作用 中图分类号:P402 文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2017)15-1796-09

Characteristics of carbonaceous particulate matter and its wet deposition during different stages of haze

GAO Song¹, ZHANG Wenqi², ZHANG Yuanyuan², BAO Mengying², LIU Xiaoyan², TANG Tianran³, ZHANG Yanlin², CAO Fang²

(1. Electric Power Science Research Institute, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211103, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To characterize the chemical composition and wet deposition of carbonaceous particulate matter during different stages of haze events in winter, suburban of Nanjing, organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in $PM_{2.5}$ samples were analyzed by the DRI OC/EC analyzer during January in 2015, northern suburb of Nanjing. The results show that the average concentrations of $PM_{2.5}$, OC and EC were 279. 64, 18, 58 and 6, 29 g/m³, respectively. They are comparably higher than those reported in other urban sites of China and secondary pollutions existed. Compared with the clean days, $PM_{2.5}$, OC and EC show higher concentration and larger range in haze days. In addition, the effect of photochemistry in haze days are higher than that in clean days, but the contribution of carbonaceous particles to $PM_{2.5}$ stays stable in both formation and elimination stages. Concentrations of carbonaceous particles are substantially decreased due to the wet scavenging processes and their effects are associated with the intensity of precipitation. It should be noted that the wet scavenging efficiency of OC and EC is higher than that of SOC(secondary organic carbon).

Keywords: applied meteorology; haze; carbonaceous particulate matter; wet deposition

灰霾(又称霾)是悬浮在大气中的大量微小尘 粒、烟粒或盐粒的集合体,灰霾天气是空气浑浊,水 平能见度降低到 10 km 以下的 1 种天气现象^[1]。近 年来,随着经济的发展和城市化进程的加快,人类活 动向大气中排放的污染物大量增加,空气质量随之 下降,灰霾日急剧增多^[2],越来越引起各国政府和公 众的广泛关注。

我国的大气灰霾现象以京津冀、长三角、珠三角 等大城市群、地区尤为严重。南京市是长三角城市 群的三大中心城市之一,受灰霾的严重影响,已成为 长江三角洲地区灰霾事件集中的城市之一^[3]。汤 蕾^[4]的研究发现,苏南三市中,南京市的大气颗粒物 污染天数最多、程度最重,污染以细粒子为主,主要 受到生物质燃烧、地表扬尘和柴油燃烧等影响。近 年来,南京市的颗粒物浓度与边界层气象要素、能见 度、城市热导强度和水溶性离子消光作用等^[59],日 渐受到了学者们的广泛关注。童尧青等^[10]的研究表 明,近半个世纪以来,南京地区霾日数呈现出明显的 上升趋势,尤以冬季最为严重,且颗粒物浓度呈现冬 季>春季>秋季>夏季的特征^[11]。

细颗粒物是指大气中空气动力学直径小于 2.5 μ m 的颗粒物($PM_{2.5}$),环境空气中细颗粒物粒子的 增加是导致南京灰霾产生、能见度降低的主要原 因^[12-14]。含碳颗粒物是灰霾天气条件下细颗粒物的 重要组成部分^[12-14],对全球气候变化、大气能见度、 空气质量、人类健康等都能产生重要影响。含碳颗

收稿日期: 2016-11-17

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20150895)

第一作者: 高嵩(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为外绝缘与防污技术

通信作者:曹芳,讲师,主要研究方向为环境科学和大气化学,caofangle@163.com

粒物按其化学成分可分为有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elementary carbon, EC), 两者总和对 PM_{25} 的平均贡献大小为 20%~60%^[15]。OC、EC 在不同地域尺度对人类健康、灰霾与大气能见度、大 气棕色云、辐射平衡与气候变化都有重要影响。OC、 EC 的来源不同,是辨识大气污染来源的重要参 数^[16],因而OC、EC已成为大气环境研究领域的国 际前沿和热点^[17]。OC 主要来源于生物排放、生物 质燃烧和化石燃料燃烧直接排放的一次有机物(primary organic carbon, POC), 以及 POC 在大气中发 生物理化学反应生成的二次有机物(secondary organic carbon, SOC); 而 EC 则只存在于化石燃料或 生物质不完全燃烧直接排放的一次气溶胶中。因 此,EC 可以作为 POC 的示踪物,且颗粒物中含碳物 质的来源可以根据 OC、EC 质量浓度的相关性来进 行判断^[17]。目前,国内对于 OC、EC 的研究主要是 从污染水平、时空分布及化学成分(如有机酸、多环 芳烃及离子成分)等的角度来进行分析,对灰霾的不 同阶段进行划分,并对各阶段大气气溶胶中 OC、EC 的组分和来源变化进行分析的研究少有报道。相比 于国外,我国对于灰霾的研究仍处于初期阶段^[18],对 灰霾中颗粒物的研究主要集中在颗粒物的浓度水 平、时空分布、粒径组成和化学成分,以及结合天气 形势分析来源等几个方面,鲜有将灰霾过程拆解来 研究其中的某一个阶段。研究灰霾生成和消除阶段 中颗粒物浓度和化学成分的变化,有利于灰霾形成 机制和污染物来源的研究。

在颗粒物的自然清除过程中,湿沉降发挥了十 分重要的作用,对大气环境质量的改善具有重要的 积极意义^[19-20]。其中,降水对大气颗粒物较强的清 除效应是显而易见的^[21]。魏玉香等^[21]比较了 2007 年南京市各季节降水日与非降水日的 PM_{2.5}浓度发现,降水能有效减少空气中可吸入颗粒物的浓度,并能 使降水结束后一段时间内空气中可吸入颗粒物的浓度 保持在较低水平,降水日的污染物浓度始终低于非降 水日。湿沉降对不同含碳颗粒物成分清除效率的差异 性也值得关注,有利于揭示含碳颗粒物的清除机制,并 加深人们对大气含碳气溶胶源汇关系的理解。

2015 年 1 月 14 日—2015 年 1 月 28 日,南京信息工程大学农业气象重点实验站捕获了 1 次灰霾过程。捕获过程中,采用大流量 PM_{2.5}颗粒物采样器每 3 h 进行 1 次高频次采样。根据南京市北郊采集的颗粒物样品,分析了整个灰霾过程中细颗粒物浓度水平和成分(主要是 OC 和 EC)的变化,以及可能受到的气象要素的影响,并将相对清洁天气和灰霾天气时灰霾生成阶段和消除阶段的污染水平和颗粒物成分变化进行对比,分析 2 次湿沉降过程中含碳颗粒物的成分变化,探究南京市冬季灰霾天气的生成过程、消除过程及含碳颗粒物的成分变化。

1 实验与数据来源

1.1 样品采集

本次捕获实验的采样点设置在长三角城市群中 的南京市浦口区,位于南京信息工程大学的农业气象 重点实验站。南京信息工程大学校园紧靠交通主干路 六合大道及江北大道快速路,采样点距离市中心大约 17 km,周围较为空旷,偏东方向有1个集中的大型工 业园区,区内企业以南钢等钢铁加工厂、南化等化工厂 和热电厂为主,可以代表受高污染工业园区影响的郊 区环境。采样点位置图如图1所示。



图 1 采样点位置

2015 年 1 月 14 日—2015 年 1 月 28 日,本文捕 获实验采用青岛崂山电子仪器总厂 KC 1000 大流量 采样器和石英滤膜(PALL)在地面进行每 3 h 或 6 h 采集 1 次样品的高频率的 $PM_{2.5}$ 颗粒物样品采集。 仪器 所 处 高 度 约 为 1.3 m,采 样 流 量 为 1.05 m³/min,采集的样品置于干燥皿中(恒温恒湿环境) 平衡 48 h,用万级电子天平(Sartorius,BSA124S)进 行称重,通过采样膜前后重量的差值和仪器记录的 标准采样体积计算大气中 $PM_{2.5}$ 浓度。

1.2 气象数据来源

本文实验所用到的能见度数据是实时记录的南 京市浦口区官方数据; 气压、降水、温度、湿度等气象 要素数据来自南京信息工程大学农业气象重点实验 站的德国 envis 自动气象站; 空气质量指数 (air quality index, AQI)来自南京市浦口区官方数据; $PM_{2.5}$ 的浓度数据为 2015 年 1 月 14 日—2015 年 1 月 28 日本文捕获实验所述方法称量计算所得。

1.3 OC/EC 分析方法

颗粒物样品的 OC 和 EC 浓度由美国沙漠所研 究所研制 DRI Model 2001A 型热光碳分析仪测定所 得。该热光碳分析仪利用 OC 和 EC 热化学稳定性 和吸光性的差异,将样品逐级升温氧化分离,并利用 激光光强的变化来确定 OC、EC 的分割点。在热光 炉中通入氦气,样品在无氧的情况下逐级升温,样品 中的有机碳首先氧化,而后通入 2%氧、98%氦混合 气,样品在有氧的情况下继续加热,使得剩余的元素 碳燃烧。OC、EC 的氧化产物经 MnO₂ 催化氧化成 CO₂,而后在还原炉中被还原成甲烷 CH₄,最终由火 焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)定 量检测。无氧加热阶段产生的部分裂解碳可通过检 测 633 nm 激光的反射光强进行校正,以确定 OC、 EC 的分割点。

1.4 质量保证与控制

采样前将样品膜在 450 ℃的高温煅烧 6 h,去除 膜上的有机成分,以降低空白值。称重前将样品膜 置于室温条件下的干燥皿中平衡 48 h。样品膜的称 重在恒温恒湿的环境中进行,以减小样品膜吸水所 导致的质量误差。设置现场空白、标准滤膜对比、重 复检测等方法,以尽量减小操作和称量误差。

OC、EC 样品分析的标准流程如下。

流程1:测样前进行三峰检测和仪器空跑,保证 仪器运行正常,并去除其中可能存在的污染。

流程 2:实验期间,定期用蔗糖标准溶液(0.428 g/100 mL,DRI)和标准滤膜对仪器进行标定,以检 测仪器运行是否正常,确保检测误差在 5%以内。标 准滤膜是由采样器在室内分别进行 3、6、12 和 24 h 的 $PM_{2.5}$ 采样所得,在热光碳分析仪运行稳定的情况 下,重复 3 次检测 OC、EC 的质量浓度,并求得平均 值作为标准滤膜的质量浓度值。 流程³:对不同批次测试的样品设置重复实验, 以确保数据的一致性。

2 结果与讨论

2.1 实验期间的基本天气状况

采样期间气温和相对湿度的变化范围分别为 (1.12 ℃~12.83 ℃和 19.2%~83.96%;主导风向 为偏北风,以微风为主,最大风速不超过 4 m/s,整个 采样期间能见度低于 10 km,其中 70%以上能见度 低于 5 km;空气质量指数(AQI)在 29.67~313.67 区间变化,65%以上的 AQI 大于 100;采样期间经历 了 2 次降水事件,分别发生在 1 月 25 日、1 月 26 日 和 1 月 27 日,但降水量较小,累计降水量分别为 1.0 mm 和 2.7 mm。采样期间的气象要素时间序列图 如图 2 所示。

图 2 中展现了 1 个大气从清洁到污染又逐渐恢 复清洁的过程,即灰霾生成、消除的全过程。整个观 测期间大气压与 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势相反,这与边 界层高度变化有关^[22]。能见度与 AQI 呈现负相关 关系,以 1 月 14 日—1 月 15 日和 1 月 23 日—1 月 26 日尤为显著,而二者与 $PM_{2.5}$ 的相关关系均不明 显。温度和湿度之间呈现较好的负相关关系均不明 显。温度和湿度之间呈现较好的负相关关系,1 月 24 日—1 月 28 日,出现了一段持续的气温降低、湿 度升高的过程。总体来看,1 月 14 日—1 月 15 日大 气处于雨后较为清洁的状态,1 月 19 日和 1 月 24 日 这 2 天污染最为严重,1 月 25 日发生降水以后,大气 又逐渐恢复清洁。

2.2 南京市北郊 OC/EC 的污染状况

通过计算整个采样期间大气当中 PM_{2.5}和 OC、 EC 质量浓度的平均值,并与国内其他城市进行比较,结果如表1 所示。

从全国范围来看,南京市北郊冬季的 OC、EC 质 量浓度均处于较高水平,尤其是 EC,其质量浓度仅 次于西安。Turpin 等^[23]认为,通过研究 OC 与 EC 的相关性可以识别含碳颗粒物的来源,并且 OC 与 EC 质量浓度的比值可以在一定程度上指示含碳组 分的来源^[24]。本文研究中,所有样品 OC 与 EC 质量 浓度无显著性相关关系(相关系数 r=0.29),表明 OC 与 EC 的同源性较差; $\rho(OC)/\rho(EC)$ 差异表明不 同城市间颗粒物成分和来源的差异性,当 $\rho(OC)/$ $\rho(EC)大于 2.0 时,说明存在二次污染^[25]。整个采$ $样过程当中,<math>\rho(OC)/\rho(EC)$ 的平均值为 3.04,这说明 本文研究的此次灰霾过程当中,污染源并非来自单 一的一次排放源,而是存在二次污染,与文献[26]中 2014 年的研究结果一致。

2.3 灰霾不同过程中 OC、EC 的变化

2.3.1 观测期间灰霾不同阶段的定义

按照《霾的观测和预报等级》^[27]中的标准,排除 降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟雾、吹雪、雪暴等天气现



表1 国内不同地区颗粒物和 OC、EC 质量浓度水平

研究区域	颗粒物	采样时间	PM _{2.5} 质量浓度/	OC 质量浓度/	EC 质量浓度/	研究来源
			$(\mu g \cdot m^{-3})$	$(\mu g \cdot m^{-3})$	$(\mu g \cdot m^{-3})$	
南京北郊	PM _{2.5}	2015 年冬季	279.64	18.58	6.29	本研究
北京	$PM_{2.1}$	2011 年冬季		24.7	2.8	文献 [28]
上海	PM _{2.5}	2010 年冬季		13.3	3.8	文献 [29]
广州	PM _{2.5}	2007 年冬季		8.5	4.8	文献 [30]
西安	$\mathrm{PM}_{2.5}$	2013 年冬季	175.57	51.58	9.87	文献 [31]

象造成的视程障碍,当能见度低于 10 km、相对湿度 小于 95%时,就可判断为灰霾天气现象。南京地区 冬季的污染状况较为严重,根据该标准,不能够清晰 地体现出采样期间的天气变化,从而达到对比不同 灰霾阶段污染物成分的目的。本文根据 PM2.5 质量 浓度和 AQI 指数的变化趋势,将灰霾过程进行如下 划分。

1) PM_{2.5}质量浓度和 AQI 持续较低,大气清洁 度相对较高的一段时间,即1月14日14:00—1月16 日 8:00。

2)PM_{2.5}质量浓度和 AQI 居高不下、能见度持续 很低,大气污染较严重的一段时间,即 1 月 24 日 2:00—1 月 27 日 2:00。

为了对比研究南京市北郊冬季典型灰霾日中含碳颗粒物的化学组成,本研究将1月14日14:00— 1月16日8:00和1月24日2:00—1月27日2:00 这2段时间分别定义为本文实验采样期间的相对清 洁日(简称清洁日)和严重灰霾日(简称灰霾日)。采 样期间 PM2:5和 OC、EC 的质量浓度变化时间序列如





图 3 采样期间 PM_{2.5}和 OC、EC 的质量浓度变化时间序列

迄今为止,对于灰霾的生成和消除过程还没有1 个确定的标准或定义。灰霾天气过程主要是由大气 中细颗粒物浓度的增高引起的^[32-34],其带来的最直 接的效应就是大气能见度和空气质量的下降。因此,本文将大气能见度显著降低,并且 $PM_{2.5}$ 质量浓 度和空气质量指数显著增高的过程(即 1 月 24 日 2:00—23:00)定义为灰霾生成阶段的污染物积累过 程;将大气能见度显著升高,并且 $PM_{2.5}$ 浓度和空气质 量指数显著降低的过程(即 1 月 26 日 14:00—27 日 23:00)定义为灰霾消除阶段的污染物清除过程。采样 期间 $PM_{2.5}$ 、AQI 和能见度的时间序列如图 4 所示。



虚线矩形框和实线矩形框阴影分别表示污染物积累过程和 污染物清除过程。

图 4 采样期间 PM2.5、AQI 和能见度的时间序列

2.3.2 清洁日和灰霾日

清洁日和灰霾日的污染物浓度时间序列如图5 所示。



電 5 中,图 5(a)和图 5(b)分别表示清洁口和次 霾日的污染物质量浓度变化;另外,图 5(b)中的阴影 部分表示发生降水。清洁日和灰霾日 PM_{2.5}、TC、OC 和 EC 的变化趋势比较一致,灰霾日中污染物浓度明显高 于清洁日,清洁日和灰霾日时 PM_{2.5}、OC、EC 的平均质 量浓度分别为 153. 63、9. 82、3. 72 μ g/m³ 和 347. 60、 26 19、9. 98 μ g/m³,灰霾日中 PM_{2.5}、OC、EC 的平均质 量浓度均为清洁日的 2 倍以上。清洁日中 4 种污染物 质量浓度的日变化不明显,24 h内 PM_{2.5}、OC、EC 的极 差最大值分别可达 121. 44、3 31、2. 27 μ g/m³,最大值出 现在 14:00—17:00 之间;与清洁日相比,灰霾日的污染 物浓度表现出更明显的日变化,24 h内 PM_{2.5}、OC、EC 的极差最大值分别可达 282. 51、32. 75、15. 04 μ g/m³,分 别为清洁日的 2. 33 倍、9. 89 倍和 6. 63 倍。可见含碳颗 粒物,尤其是 OC 在 PM_{2.5}质量浓度升高、污染加重时明 显升高。根据 Turpin 等^[27]提出的方法对二次有机污染 物 SOC 进行估算,即:

 $ρ(SOC) = ρ(OC) - ρ(EC)(ρ(OC)/ρ(EC))_{min}$ 式中(ρ(OC)/ρ(EC))_min表示采样期间 ρ(OC)/ρ(EC) 比值的最小值。计算可得,清洁日和灰霾日中 SOC 的平均质量浓度分别为 3.61 和 9.17 μg/m³。灰霾 期间二次有机污染物明显高于清洁日,即灰霾期间 的光化学作用强于清洁期间。

2.3.3 积累过程和清除过程

污染物积累过程和清除过程中污染物浓度和比 值的变化分别如图 6 和图 7 所示。





图 7 积累过程和清除过程污染物比值时间序列

从图 6、图 7 中可以看出,在污染物的积累过程 和清除过程中,TC、OC 和 EC 质量浓度及其与 $PM_{2.5}$ 的比值变化趋势均一致。在积累过程中,随着 $PM_{2.5}$ 质量浓度的增加,TC、OC 和 EC 与 $PM_{2.5}$ 的比 值也增加,表明随着灰霾的加重,大气中含碳颗粒物 对 $PM_{2.5}$ 的贡献率也在增加。在清除过程中,含碳颗 粒物的质量浓度及其与 $PM_{2.5}$ 的比值同时下降,但当 污染物质量浓度下降到一定程度时,其与 $PM_{2.5}$ 的质 量浓度比值趋于稳定。另外,不同灰霾阶段中,TC、 OC 和 EC 与 $PM_{2.5}$ 的比值变化在 0.56%~2.40%, 表明含碳颗粒物对 $PM_{2.5}$ 的贡献率在灰霾的生成和 消除阶段虽有变化,但总体来讲较为稳定。

2.4 降水对 OC、EC 的清除作用

从图 2 所示的采样期间 PM_{2.5}和 OC、EC 的质量 浓度变化时间序列可以看出,这 2 次降水过程之后, 大气中的 PM_{2.5}和 OC、EC 质量浓度都会降低,并在 一段时间内都保持相对较低的水平,这一现象与前 人结论一致^[18]。本文实验采样期间共经历了 2 次完 整的降水过程,分别发生在 1 月 24 日—日 25 日和 26 日—27 日,本文截取 2 段降水时间前、后的时间, 即 1 月 24 日 20:00—25 日 23:00 和 1 月 26 日 14: 00—1 月 27 日 23:00 这 2 段过程来对比湿沉降前、



图 8 2 个降水事件清除过程中的污染物质量浓度时间序列

从图 8 中可以发现,采样期间,累积降水量 1.0 mm 的第1次降水事件后, PM_{25} , TC, OC 和 EC 的 质量浓度大幅度降低, $PM_{2.5}$ 、OC、EC的质量浓度分 别下降了 31.6%、52.88%、63.73%;累积降水量 2.7 mm的第2次降水事件后, $PM_{2.5}$ 、 OC、 EC的质量浓 度分别下降了 66.2%, 67.78%, 81.96%。根据 $\rho(\text{SOC}) = \rho(\text{OC}) - \rho(\text{EC}) \left(\rho(\text{OC}) / \rho(\text{EC})\right)_{\min} \ddagger \mathbf{\hat{\mu}} \mathbf{\hat{\mu}} \mathbf{\hat{\mu}}$ 水前、后的 SOC 质量浓度,发现这 2 次降水事件后, SOC 的质量浓度分别下降了 30.33%和 33.83%,可 见降水量较大时,清除效果更为明显。污染物质量 浓度下降到一定程度时趋于稳定,并在一定时间内 保持较低的水平,与徐宝平[35]的研究结果一致。降 水前、后 PM₂₅、OC、EC 和 SOC 质量浓度下降的幅 度各有不同,说明不同污染物的降水清除效率不同, 降水对于 OC 和 EC 的清除效率明显大于 SOC。2 个降水事件清除过程中的污染物比值时间序列如图 9 所示。

从图 9 中可以发现,降水事件清除过程中 $\rho(TC)/\rho(PM_{2.5}), \rho(OC)/\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(EC)/\rho$ $(PM_{2.5})$ 随时间的变化不一致,可能是因为降水强弱 对不同含碳组分的清除效率不同,需要大量的实验 数据与其他的研究方法相结合来共同验证。



3 结 论

实验研究表明,南京市北郊地区的 PM_{2.5}、OC 和 EC 的平均质量浓度分别为 279.64、18.58 和 6.29 μ g/m³,与全国其他几个主要城市相比,污染水平较 高,整个灰霾过程中 ρ (OC)/ ρ (EC) 的平均值为 3.04,存在二次污染;灰霾日中 PM_{2.5}、TC、OC 和 EC 等污染物的质量浓度都明显高于清洁日,并且表现 出更明显的日变化,24 h内 OC、EC 的质量浓度变化 是清洁日的 9.89 倍和 6.63 倍,灰霾期间的二次污染 作用强于清洁日期间。含碳颗粒物对 PM_{2.5}的贡献 率在灰霾的生成和消除阶段都较为稳定;降水量较 大时,降水过程对含碳颗粒物的清除作用更为显著, 但不同污染物的降水清除效率不同,降水对于 OC 和 EC 的清除效率明显大于 SOC。

(由于印刷关系,查阅本文电子版请登录 http://www.paper.edu.cn//journal/display_journal _detail/20.html)

[参考文献] (References)

[1] 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等.珠江三角洲大气灰霾导致

能见度下降问题研究[J]. 气象学报,2006,64(4): 510-517.

WU Dui, BI Xueyan, DENG Xuejiao, et al. Study on the decrease of visibility caused by atmospheric haze in the Pearl River [J]. Acta Meterorologica Sinica, 2006, 64(4); 510-517. (in Chinese)

- [2] 刘爱君,杜尧东,王惠英.广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象,2004,30(12):68-71.
 LIU Aijun, DU Yaodong, WANG Huiying. Climatic characteristics of haze in Guangzhou [J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(12):68-71. (in Chinese)
- [3] 刘晓慧. 长江三角洲地区霾的时空变化及其影响因子研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2014.
 LIU Xiaohui. Haze variations and connecting factors over the Yangtze River delta region [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 汤蕾.苏南三市大气颗粒物污染特征研究[D].南京: 南京信息工程大学,2013.

TANG Lei. Characteristics of atmospheric particle pollution in three cities of Southern Jiangsu [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013. (in Chinese)

[5] 薛国强,朱彬,王红磊.南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J].环境科学,2014,35
 (5):1633-1643.
 XUE Guogiang, ZHU Bin, WANG Honglei. Size dis-

tributions and source apportionment of soluble ions in aerosol in Nanjing [J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1633-1643. (in Chinese)

[6] 沈铁迪,王体健,陈璞珑,等. 南京城区夏秋季能见度
 与 PM_{2.5}化学成分的关系[J]. 中国环境科学,2015,35
 (3): 652-658.

SHEN Tiedi, WANG Tijian, CHEN Pulong, et al. Relationship between atmospheric visibility and chemical composition of $PM_{2.5}$ in the summer and autumn of Nanjing [J]. China Environmental Science. 2015, 35 (3): 652-658. (in Chinese)

- [7] 陆晓波,喻义勇,傅寅,等. 秸秆焚烧对空气质量影响 特征及判别方法的研究[J].环境监测管理与技术, 2014,26(4):17-21.
 LU Xiaobo, YU Yiyong, FU Yin, et al. Characterization and identification method of ambient air quality influenced by straw burning [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014, 26(4): 17-21. (in Chinese)
- [8] 吴昊,王体健,方欢,等. 南京细颗粒物对城市热岛强度的影响[J]. 大气科学学报,2014,37(4):425-431
 WU Hao, WANG Tijian, FANG Huan, et al. Impacts of aerosol on the urban heat island intensity in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37 (4):425-431. (in Chinese)
- [9] 周瑶瑶,马嫣,郑军,等.南京北郊冬季霾天 PM_{2.5}水溶
 性离子的污染特征与消光作用研究[J].环境科学, 2015,36(6):1926-1934.
 ZHOU Yaoyao, MA Yan, ZHENG Jun, et al. Pollu-

tion characteristics and light extinction effects of watersoluble ions in $PM_{2.5}$ during winter hazy days at north suburban Nanjing [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 1926-1934. (in Chinese)

高

- [10] 童尧青,银燕,钱凌,等. 南京地区霾天气特征分析
 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 584-588.
 TONG Yaoqing, YIN Yan, QIAN Ling, et al. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area [J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 584-588. (in Chinese)
- [11] 王荟,王格慧,黄鹂鸣,等.南京市大气中 PM₁₀、PM_{2.5}
 日污染特征[J]. 重庆环境科学,2003,25(5):54-56.
 WANG Hui, WANG Gehui, HUANG Liming, et al. Characteristics of diurnal PM₁₀ and PM_{2.5} in Nanjing
 [J]. Chongqing Environmental Sciences, 2003, 25(5): 54-56. (in Chinese)
- [12] HUANG Rujin, ZHANG Yanlin, BOZZETTI C, et al. High secondary aerosol contribution to particulatepollution during haze events in China [J]. Nature, 2014, 514(7521): 218-222.
- [13] WANG Yuesi, ZHANG Junke, WANG Lili, et al. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3); 388-396.
- [14] 贺泓,王新明,王跃思,等. 大气灰霾追因与控制[J].
 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 344-352.
 HE Hong, WANG Xinming, WANG Yuesi, et al.
 Formation mechanism and control strategies of haze in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 344-352. (in Chinese)
- [15] POESCHL U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. Chem-Inform, 2006, 37(7): 7520-7540.
- [16] 郑玫,闫才青,李小滢,等.二次有机气溶胶估算方法 研究进展[J].中国环境科学,2014,34(3):555-564.
 ZHENG Mei, YAN Caiqing, LI Xiaoying, et al. A review of methods for quantifying secondary organic aerosol [J]. China Environmental Science, 2014, 34(3):555-564. (in Chinese)
- [17] 程远.含碳气溶胶采样与分析方法研究[D]. 北京:清 华大学, 2011.
 CHENG Yuan. Study on the sampling and analysis methods of carbonaceous aerosol [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [18] 周刚,夏慧. 我国灰霾天气的成因分析及研究进展综述[J]. 广州化工,2013,41(12):168-170.
 ZHOU Gang, XIA Hui. Cause analysis and research development of haze [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013,41(12):168-170. (in Chinese)
- [19] ZHANG Yanlin, CERQUEIRA M, SALAZAR G, et al. Wet deposition of fossil and non-fossil derived particulate carbon: insights from radiocarbon measurement [J]. Atmospheric Environment, 2015, 115: 257-262.
- [20] 韩燕,徐虹,毕晓辉,等.降水对颗粒物的冲刷作用及 其对雨水化学的影响[J].中国环境科学,2013,33

(2): 193-200.

HAN Yan, XU Hong, BI Xiaohui, et al. Changes of particulate matters during rain process and influence of that on chemical composition of precipitation in Hangzhou, China [J]. China Environmental Science, 2013, 33(2): 193-200. (in Chinese)

[21] 魏玉香,银燕,杨卫芬,等. 南京地区 PM_{2.5} 污染特征 及其影响因素分析[J]. 环境科学与管理,2009,34 (9):29-34.

WEI Yuxiang, YIN Yan, YANG Weifen, et al. Analysis of the pollution characteristics and influence factors of PM_{2.5} in Nanjing area [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(9): 29-34. (in Chinese)

- [22] 杜川利, 唐晓, 李星敏, 等. 城市边界层高度变化特征
 与颗粒物浓度影响分析[J]. 高原气象, 2014, 33(5):
 1383-1392.
 DU Chuanli, TANG Xiao, LI Xingmin, et al. Calcula
 - bu Chuanii, TANG Xiao, LI Xingmin, et al. Calculations of planetary boundary layer height and its relationship with particle size concentration in Xi'an city [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(5): 1383-1392. (in Chinese)
- [23] TURPIN B J, CARY R A, HUNTZICKER J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elementalcarbon [J]. Aerosol Science & Technology, 2007, 12(1): 161–171.
- [24] CHU S. Stable estimate of primary OC/EC ratios in the EC tracer method [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(8): 1383-1392.
- [25] MCDOW S R, HUNTZICKER J J. Vapor adsorption artifact in the sampling of organic aerosol: face velocity effects [J]. Atmospheric Environment(Part A: General Topics), 1990, 24(10): 2563-2571.
- [26] 吴梦龙.南京地区大气气溶胶中含碳物质特征及同位 素示踪[D].南京:南京信息工程大学,2014.
 WU Menglong. Characteristics of carbonaceous components and stable isotope tracing in aerosols in Nanjing
 [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [27] 吴兑,唐仕文,邓雪娇,等.QXT-113—2010,霾的观测和预报等级[S].北京:气象出版社,2010.
 WU Dui, TANG Shiwen, DENG Xuejiao, et al.QXT-113-2010. Haze observation and forecast level [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2010. (in Chinese)
- [28] 樊晓燕,温天雪,徐仲均,等.北京大气颗粒物碳质组 分粒径分布的季节变化特征[J].环境化学,2013,32
 (5):742-747.
 FAN Xiaoyan, WEN Tianxue, XU Zhongjun, et al.

Characteristics and size distributions of organic and element carbon of atmospheric particulate matters in Beijing, China [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32 (5): 742-747. (in Chinese)

 [29] 李曼. 上海市 PM_{2.5} 中水溶性有机组分的组成特征、季 节变化及来源解析[D]. 上海:上海大学,2013.
 LI Man. Chemical composition, seasonal variation and source of water-soluble organic components in PM_{2.5} in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013. (in Chinese)

- [30] 黄虹,曹军骥,曾宝强,等.广州大气细粒子中有机碳、元素碳和水溶性有机碳的分布特征[J].分析科学学报,2010,26(3):255-260.
 HUANG Hong, CAO Junji, ZENG Baoqiang, et al. Characterization of organic carbon, elemental carbon and water-soluble organic carbon in PM_{2.5} of Guangzhou city [J]. Journal of Analytical Science, 2010, 26(3): 255-260. (in Chinese)
- [31] 王帆,韩婧,张俊,等. 西安城区大气 PM_{2.5}中有机碳 与元素碳的污染特征[J]. 环境保护科学,2015,41 (2):80-85.

WANG Fan, HAN Jing, ZHANG Jun, et al. Simple analysis of pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in $PM_{2.5}$ in the atmosphere of Xi'an city [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41 (2): 80-85. (in Chinese)

 [32] 于凤莲,刘东贤,胡英. 有关气溶胶细粒子对城市能见 度影响的研究[J]. 气象科技,2002,30(6):379-383.
 YU Fenglian, LIU Dongxian, HU Ying. Study on the influence of aerosol fine particles on urban visibility
 [J]. Meteorological Science and Technology, 2002, 30 (6): 379-383. (in Chinese)

[33] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市能见度下降与颗粒物
 污染的关系[J].环境科学学报,2003,23(4):
 468-471.
 SONG Yu, TANG Xiaoyan, FANG Chen, et al. Rela-

tionship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(4): 468-471. (in Chinese)

- [34] 段卿,安俊琳,王红磊,等.南京北郊夏季大气颗粒物 中有机碳和元素碳的污染特征[J].环境科学,2014, 35(7):2460-2467.
 DUAN Qing, AN Junlin, WANG Honglei, et al. Pollutioncharacteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric particulates in the northern suburb of Nanjing [J]. Environmental Science, 2014, 35 (7): 2460-2467. (in Chinese)
- [35] 徐宝平. 南昌市黑碳气溶胶的降雨清除效率及影响因 素分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.

XU Baoping. The rain removal efficiency and influencing factors analysis of black carbon aerosol in Nanchang [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. (in Chinese)