

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
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	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

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

李贵玲^{1,2}, 周敏^{2,3}, 陈长虹^{2,3*}, 王红丽^{2,3}, 王倩^{2,3}, 楼晟荣^{2,3}, 乔利平^{2,3}, 唐喜斌^{1,2}, 李莉^{2,3}, 黄海英², 陈明华², 黄成^{2,3}, 张钢锋²

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 2. 上海市环境科学研究院国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室(筹), 上海 200233; 3. 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室, 上海 200433)

摘要: 于 2011 年 4 月 28 日~5 月 18 日对上海大气中颗粒物的质量浓度及细粒子中的化学组分进行了连续观测, 获得了上海受春季沙尘天气影响下大气颗粒物质量浓度和主要化学组分特征。结果表明, 沙尘天气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的质量浓度显著高于非沙尘天, 最高日均浓度分别达到 $787.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $139.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的均值为 $(32.9 \pm 14.6)\%$ ($15.6\% \sim 85.1\%$); 总水溶性无机离子(TWSII)占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 $(27.2 \pm 19.2)\%$ ($4.8\% \sim 80.8\%$), 二次组分 SNA (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+) 占 TWSII 的 $(76.9 \pm 13.9)\%$ ($41.9\% \sim 94.2\%$), TWSII 和 SNA 对 $PM_{2.5}$ 的贡献均小于非沙尘天, 而 Ca^{2+} 的含量比却有明显上升。非沙尘天测得的 OC/EC 值高于强沙尘天, 但低于弱沙尘天。此外分析还得到, 沙尘中的高矿尘粒子具有酸性缓冲作用, 使得沙尘天颗粒的碱性强于沙尘发生前。非沙尘天 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 主要以 NH_4HSO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在, 沙尘天还会与其他矿物离子结合。

关键词: 沙尘; 颗粒物; 化学组分; 水溶性离子; 离子形态

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1644-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.003

Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011

LI Gui-ling^{1,2}, ZHOU Min^{2,3}, CHEN Chang-hong^{2,3}, WANG Hong-li^{2,3}, WANG Qian^{2,3}, LOU Sheng-rong^{2,3}, QIAO Li-ping^{2,3}, TANG Xi-bin^{1,2}, LI Li^{2,3}, HUANG Hai-ying², CHEN Ming-hua², HUANG Cheng^{2,3}, ZHANG Gang-feng²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution Prevention, Shanghai 200433, China)

Abstract: A continuous air quality observation was conducted in the urban area of Shanghai from April 28 to May 18 in 2011. The mass concentration of particle matters and main chemical compositions of fine particle were measured and analyzed. The mass concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ during the dust episode were much higher than those in non-dust episode, with the maximum daily mass concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ reaching $787.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $139.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The average $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio was $(32.9 \pm 14.6)\%$ ($15.6\% \sim 85.1\%$). The total water soluble inorganic ions(TWSII) contributed $(27.2 \pm 19.2)\%$ ($4.8\% \sim 80.8\%$) of total $PM_{2.5}$, and the secondary water soluble ions (SNA), including SO_4^{2-} , NO_3^- and NH_4^+ , were $(76.9 \pm 13.9)\%$ ($41.9\% \sim 94.2\%$) in TWSII. The concentrations of TWSII and SNA in $PM_{2.5}$ during dust days became lower than those in non-dust days while the trend of the ratio of Ca^{2+} to $PM_{2.5}$ increased. The mean OC/EC value in non-dust days was higher than that in the heavy dust pollution episode, but lower than that in weak dust days. In addition, mineral-rich particle in dust period had an acid-buffer effect, making particle alkaline in dust days stronger. In non-dust days, SO_4^{2-} and NO_3^- mainly existed in the form of NH_4HSO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4NO_3 , and combined with other mineral ions during dust days.

Key words: dust; particulate matter; chemical composition; water-soluble ions; ionic form

春季是我国沙尘天气频发的季节, 其影响范围从沙源地经高空长距离传输至我国东部、韩国、日本, 甚至跨越太平洋到达北美大陆^[1,2]。沙尘气溶胶可通过对太阳辐射的吸收和散射作用影响气候、降低能见度; 同时因其对大气颗粒物理化性质及其对

收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-09-16

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409008, 201209007, 201209001); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB020300); 上海市科委项目(11231200500); 上海市重大科技专项(沪环科 2013-03)

作者简介: 李贵玲(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气化学, E-mail: liguiling-2007@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chenchen@saes.sh.cn

健康和生态环境造成影响,从而引起人们的广泛关注^[3-7].

我国的沙尘传输路径主要包括:①自蒙古国向我国黑龙江呼伦贝尔盟移动;②经内蒙古自治区锡林郭勒盟西部沿东北平原、松花江下游移动;③经中国华北、渤海区域,绕长白山经朝鲜移去^[8]. 抵达上海的沙尘传输路径主要有:①始于蒙古经内蒙古东部经渤海、黄海抵达东海;②始于新疆经蒙古、内蒙古、黄土高原再经渤海、黄海抵达东海^[9]. 在传输过程中,沙尘气溶胶不断发生沉降、碰并及化学转化等过程,同时还与沿途的大气成分发生复杂的物理化学反应,使得气溶胶的化学组成和粒径发生变化^[10-12]. 有研究认为,沙尘天气时气溶胶中硫酸盐、硝酸盐等组分被稀释,质量浓度较低^[13], Nie 等^[10]通过分析沙尘期间衡山和华山的气溶胶样品,发现沙尘经华山传输到衡山时发生了明显变化,衡山气溶胶二次离子组分(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)较上风向的华山更丰富. Lee 等^[14]发现沙尘期间 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 仅为 0.1,而非沙尘期间为 0.46. 王玮等^[15]通过研究证明,沙尘暴期间气溶胶的质量浓度极高,而酸度相对较低. Fang 等^[16]和王琼真^[17]发现沙尘期间颗粒物中 Al、Fe、Ca、S、Cl 显著上升. 魏星等^[18]研究发现,沙尘暴期间沙尘气溶胶在长途传输中可将沿途的煤尘颗粒携带至下游城市.

综上所述,我国许多学者从多个角度对沙尘天气开展了深入研究,并取得了大量有意义的研究成果. 然而,有关沙尘向东输送入海之前,途经上海时大气颗粒物的物理化学特性的研究目前还较少. 本研究在收集全国主要城市大气 PM_{10} 质量浓度的基础上,利用在线高分辨率观测手段在上海开展沙尘期间颗粒物及其化学组分观测,对比分析沙尘天与非沙尘天大气颗粒物质量浓度、主要化学组分及其离子形态的差异,旨在为上海市颗粒物污染控制提

供科学依据.

1 材料与方法

观测时段为 2011 年 4 月 28 日~5 月 28 日. 观测地点位于上海市环境科学研究院(31°17'N, 121°43'E)培训楼 5 楼楼顶空气质量观测超级站(Shanghai Air Quality Research Supersite, ShAirQuaS at SAES),该测点离地高度约 15 m. 测点地处上海市徐汇区商业和居民混合区. 测点以东 500 m 是交通干道沪闵高架路,以南 150 m 为漕宝路,测点与西南方向的上海市空气质量监测国控点(上师大)相距 1 500 m,下垫面状况与上海市城区类似,观测点周围除机动车外无明显局地污染源^[19,20].

颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.0}$)的质量浓度采用 Thermo Fisher 公司生产的 C14 BETA 颗粒物监测仪测量,时间分辨率为 5 min. $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性组分采用瑞士万通公司生产的 MARGA ADI 2080 测量,时间分辨率为 60 min,检测组分包括 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,最低检测限分别为 0.01、0.05、0.04、0.05、0.05、0.09、0.10、0.06 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{2.5}$ 中的有机碳(OC)和元素碳(EC)浓度采用 Sunset Laboratory Inc 的碳分析仪测量,该仪器采用热光吸收原理,时间分辨率为 60 min^[19,21]. 观测参数还包括 SO_2 、 NO_2 、湿度、温度、风速等因子. 观测期间,重点城市空气质量数据取自环境保护部数据中心网站(http://data.center.mep.gov.cn/report/air_daily/air_dairy.jsp),各城市 PM_{10} 质量浓度由当地空气污染指数(API)按下列公式换算获得:

$$c = c_{\text{low}} + [(I - I_{\text{low}}) / [(I_{\text{high}} - I_{\text{low}})] \times (c_{\text{high}} - c_{\text{low}})] \quad (1)$$

其中, c 表示 PM_{10} 的质量浓度, I 表示空气污染指数. I_{high} 和 I_{low} 表示 API 分级限值表 1 中最贴近 I 值的上下限; c_{high} 和 c_{low} 表示与 I_{high} 和 I_{low} 对应的浓度.

表 1 空气污染指数对应的 PM_{10} 浓度限值

Table 1 PM_{10} mass concentrations corresponding to air pollution index						
API (I)	50	100	200	300	400	500
PM_{10} 日均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	50	150	350	420	500	600

2 结果与讨论

观测期间(2011 年 4 月 28 日~5 月 28 日)上海共发生了两次沙尘天气过程. 其中,4 月 28~30 日为非沙尘天气且空气质量优良,记为 NDS1;5 月 1~4 日为第一次沙尘过程,记为 DS1;之后上海持续

了 7 d 的优良天气,因 5 月 10 日雷阵雨,故选 6~9 日为非沙尘日,记为 NDS2;5 月 12 日 20:00~15 日 07:00 出现第二次沙尘过程,记为 DS2.

2.1 沙尘过程基本描述

2.1.1 沙尘源

由图 1(a)可见,受锋面气旋云系的影响,4 月

28 日下午至 30 日,新疆、内蒙古中西部、西北地区中部和东部出现大范围的沙尘天气. 卫星可视的沙尘面积约 $40.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ (<http://www.nsmc.cma.gov.cn/newsite/NSMC/Contents/100525.html>), 先后影响我国东北、黄淮和黄海海区,以及朝鲜半岛、日本海海域,这是我国 2011 年影响范围最广、持续时间最长的一次沙尘暴. 5 月 11 日蒙古国中东部和

我国内蒙古地区再次出现强沙尘天气,局部地区发生沙尘暴 (http://www.mep.gov.cn/ztbd/rdzl/wxyg/ygyy/201210/t20121010_237317.htm). 气象卫星的连续监测(图略)显示,大部分沙尘来自蒙古国中部,在进入我国境内后沙尘得到加强,在锋面气旋的裹挟下,继续东移南下,扩散到我国东北地区中东部、朝鲜半岛、渤海和黄海北部海域,见图 1(b).

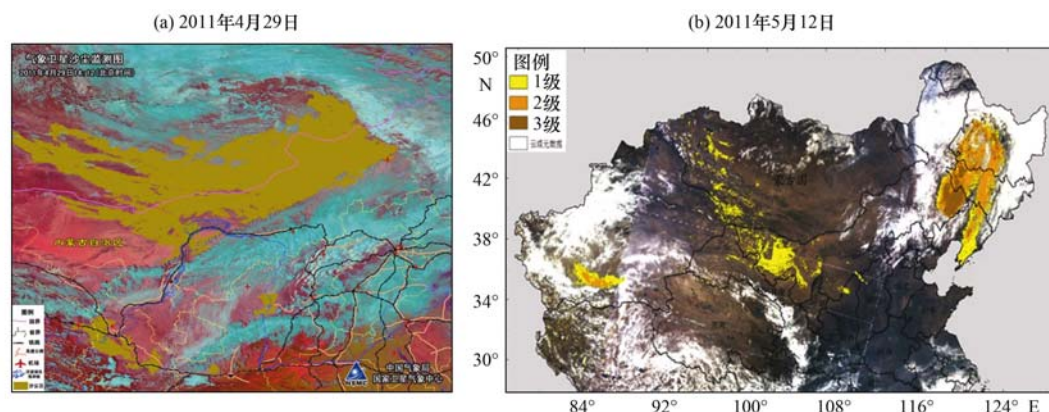


图 1 气象卫星的沙尘监测

Fig. 1 Dust storm observed by meteorological satellite

2.1.2 沙尘移动路径

图 2 和图 3 分别为利用 HYSPLIT 模型^[22]获得的沙尘输送轨迹和基于 API 资料反演得到的沙尘期间全国主要城市的 PM_{10} 日均质量浓度.

由图 2(a)可见,DS1(5 月 1~4 日)的沙尘源于蒙古国中南部、内蒙古以及华北地区,波及范围较广. 沙尘在源地被气旋扬起最高抬升至 4 km,之后向东南部延伸,经呼和浩特、北京、天津、通过海面,于 5 月 1 日抵达上海. 如图 3 所示,受 DS1 影

响,各地大气颗粒物浓度明显上升,其中呼和浩特、赤峰、北京、上海等城市大气 PM_{10} 最大日均质量浓度均大于 $600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,天津、青岛、南通 PM_{10} 最大日均质量浓度分别达到 419、346、513 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,见图 3.

由图 2(b)可见,DS2(5 月 12 日 20:00~5 月 15 日 07:00)的沙尘源于蒙古国等地,经呼和浩特、北京、天津和江苏等地,从陆地低空(小于 1 km)抵达上海. 由于人为排放的大气污染物主要集中在离地

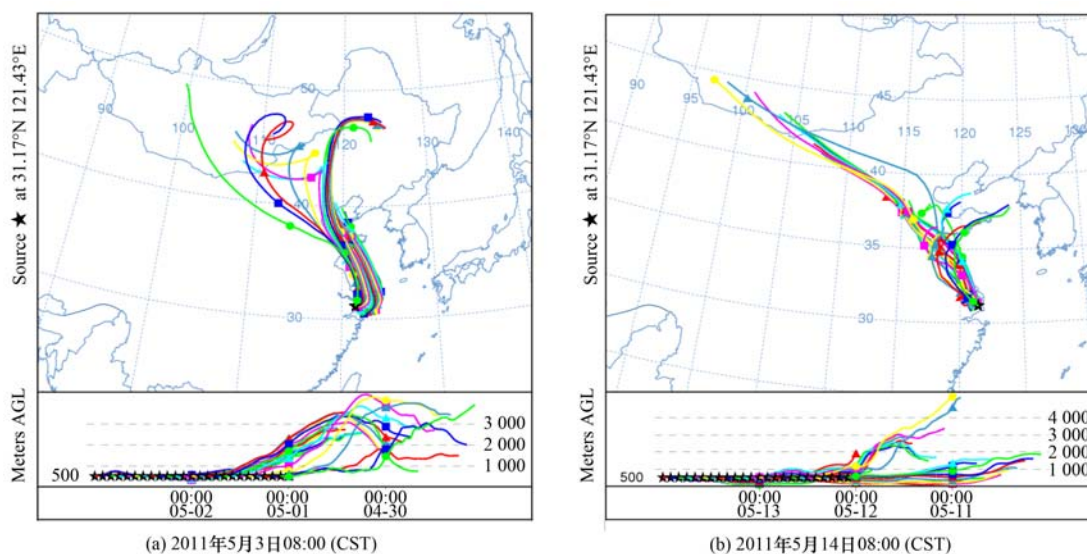


图 2 沙尘期间上海 48 h 后向轨迹

Fig. 2 The 48-hour backward air trajectories during the dust episode in Shanghai

面 1 km 左右的行星边界层内^[23,24],因此此次沙尘也将途经地区的大气污染物裹挟并传输至上海地区。期间,呼和浩特、北京、天津、赤峰、沈阳、哈尔滨和连云港等城市大气 PM₁₀ 最大日均质量浓度

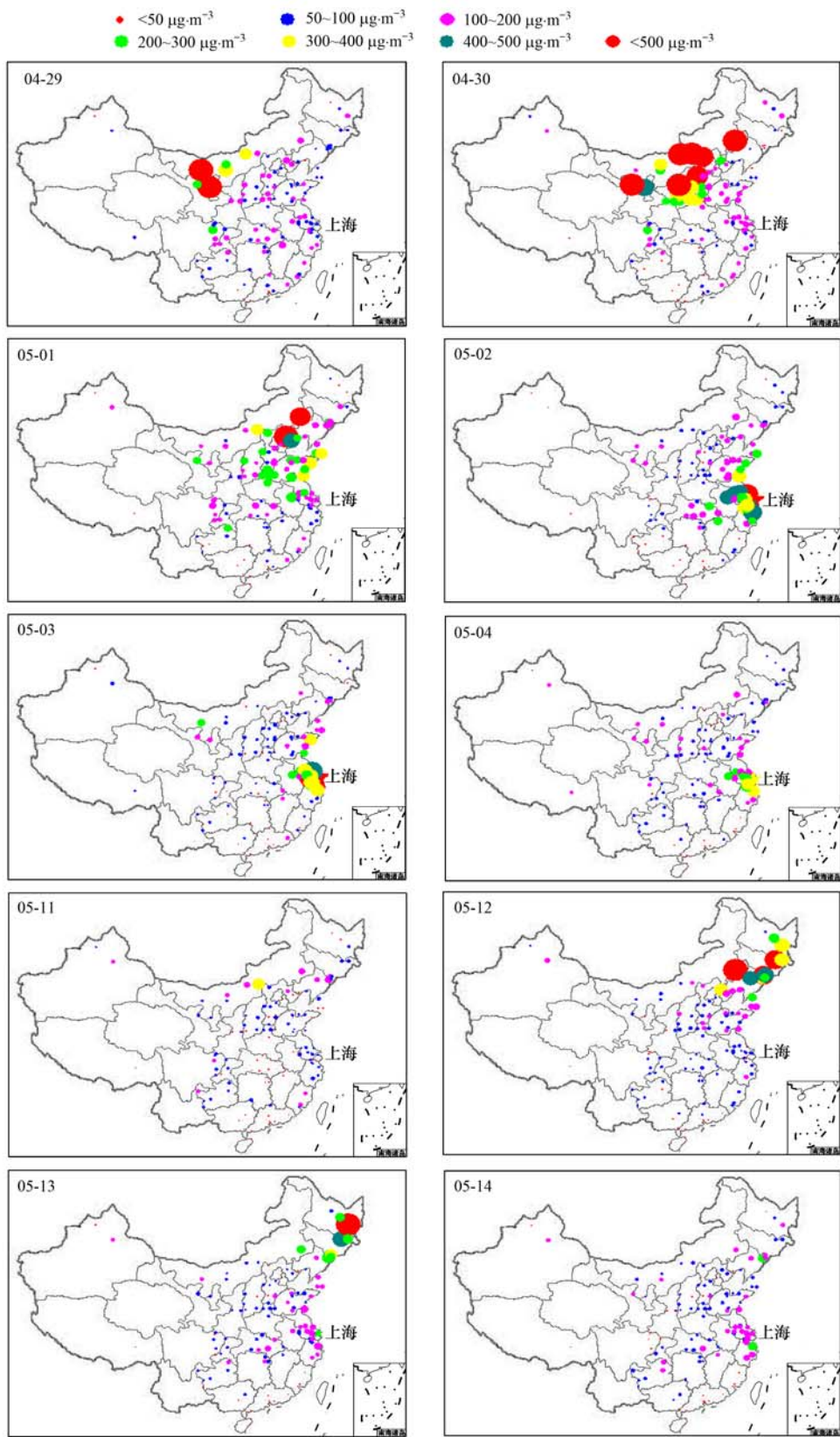


图 3 沙尘期间国内各地的 PM₁₀ 日均质量浓度变化趋势

Fig. 3 Variation of daily mass concentrations of PM₁₀ during the dust episode in China

分别为 318、344、188、> 600、514、> 600 和 196 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 见图 3。

2.2 沙尘期间上海大气颗粒物的浓度变化

图 4 是观测期间本测点气象条件与颗粒物质量浓度变化。从中可见, 沙尘前(NDS1: 2011 年 4 月 28 ~ 30 日)颗粒物质量浓度整体水平较低, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 平均浓度为 (91.6 ± 30.1) 、 (47.3 ± 17.0) 和 (32.7 ± 11.0) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{1.0}/\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值分别为 $(69.7 \pm 8.2)\%$ 和 $(51.6 \pm 7.1)\%$ 。

受强沙尘影响, DS1 期间(2011 年 5 月 1 ~ 4 日)上海大气颗粒物质量浓度陡然升高, PM_{10} 的质量浓度由 5 月 1 日 00:00 时的 $74.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 激增至 09:00 的 $528.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度增幅不大, $\text{PM}_{1.0}$ 的变化亦不显著。5 月 2 日 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 最高小时浓度超过 $900.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $185.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 日均浓度分别达到 $787.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $139.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别是我国环境空气质量二级标准(GB 3095-2012) ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 5.3 倍和 1.9 倍。DS1 期间, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的平均浓度分别为

(513.0 ± 268.8) 、 (117.1 ± 41.3) 和 (23.7 ± 8.8) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别是 NDS1 的 5.6、2.5 和 0.7 倍; 其中 $\text{PM}_{1.0}/\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值分别为 $(24.3 \pm 15.4)\%$ 和 $(26.8 \pm 9.7)\%$, 说明粗颗粒污染突出。

强沙尘过后, 大气颗粒物的质量浓度迅速下降。NDS2 期间(2011 年 5 月 6 ~ 9 日), PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的平均浓度降低至 (82.9 ± 31.4) 、 (40.1 ± 17.8) 和 (31.3 ± 16.7) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{1.0}/\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值分别上升至 $(77.4 \pm 21.2)\%$ 和 $(48.0 \pm 8.4)\%$ 。

DS2 期间(5 月 12 日 20:00 ~ 5 月 15 日 07:00)沙尘再次袭击上海。 PM_{10} 质量浓度再次升高, 尽管低于 DS1, 但相比 NDS2 明显升高。 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的平均质量浓度分别上升至 (200.3 ± 58.5) 、 (79.9 ± 25.9) 和 (46.7 ± 23.2) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别是 NDS2 时期的 2.4、2.0 和 1.6 倍, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 $(42.6 \pm 15.9)\%$ 。与 DS1 和 NDS2 相比, DS2 期间 $\text{PM}_{1.0}$ 的质量浓度相对较高, 这可能与当地污染有关^[25]。

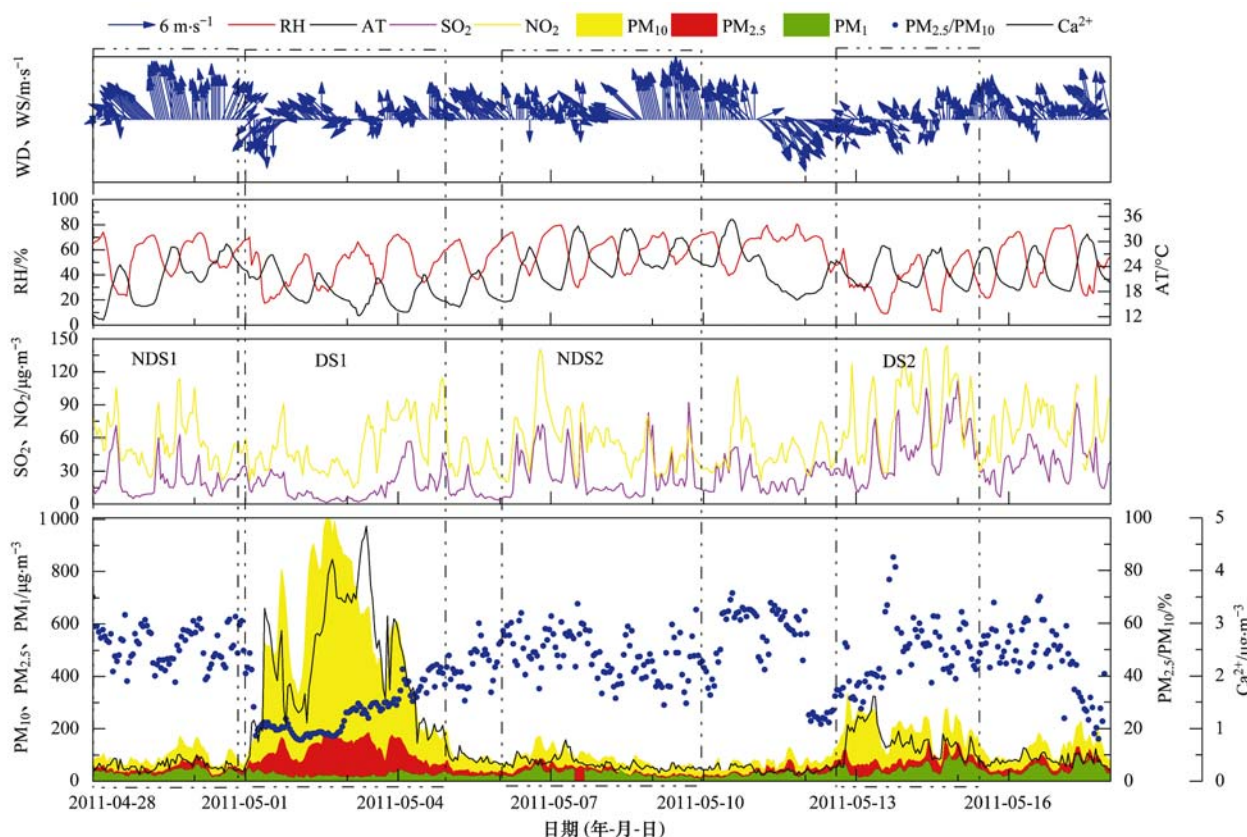


图 4 观测期间气象条件、气体、颗粒物及 Ca^{2+} 质量浓度和 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的时间变化序列

Fig. 4 Time series of the meteorological condition, gas, mass concentrations of PM and Ca^{2+} and the ratio of $\text{PM}_{2.5}$ in PM_{10}

2.3 沙尘期间上海大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成变化及特征

2.3.1 水溶性离子组分变化

图 5 是观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组成的变化。从中可见, 沙尘前 NDS1 期间, $\text{PM}_{2.5}$ 中总水溶性离子

(TWSII) 平均浓度为 $(29.1 \pm 12.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 61.5%; 二次离子组分 SNA (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+) 的质量浓度为 $(26.5 \pm 11.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 56.1%. $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子质量浓度大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$.

受强沙尘影响, DS1 期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中 TWSII 平均浓度为 $(17.3 \pm 8.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 14.8%; SNA 的平均浓度为 $(13.1 \pm 8.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 11.2%, SNA/ $\text{PM}_{2.5}$ 的比值较 NDS1 明显降低, 说明 DS1 期间上海地区的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 受一次污染的影响较明显^[26]. DS1 期间, 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子质量浓度的大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$, 尽管 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 仍是 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量最高的离子组分, 但 Ca^{2+} 的质量浓度达 $2.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 是 NDS1 期间的 9.4 倍, 占 TWSII 的 13.1%. 沙尘期间 Ca^{2+} 质量浓度显著上升, 这与 Shen 等的研究结果基本一致^[27,28]. 由图 5 可以发现, DS1 期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中存在大量未知组分, 有研究显示, 未测得的矿物成分主要包括碳酸盐^[29]、硅酸盐^[30] 及地壳元素等^[7,8].

强沙尘过后, NDS2 期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中 TWSII 和 SNA 的平均浓度分别上升至 $(23.7 \pm 12.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(21.4 \pm 11.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 58.6% 和 52.9%, 明显高于 DS1, 与 NDS1 接近. $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子质量浓度大小顺序与 NDS1 一致.

DS2 期间, 沙尘再次袭击上海, $\text{PM}_{2.5}$ 中 TWSII 和 SNA 的质量浓度分别高达 $(35.2 \pm 19.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和

$(31.7 \pm 18.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, Ca^{2+} 的质量浓度占 TWSII 的 2.3%, 是 NDS2 的 2.7 倍, 但与 DS1 相比小.

对比 DS2 与 DS1, 两者对上海的影响有明显的区别. DS2 期间, TWSII 和 SNA 的质量浓度与其他时期相比较, 这一方面与此次沙尘强度较弱且经陆地低空将大量沿途大气污染物裹挟至上海地区有关^[7]; 另一方面, SNA 质量浓度大幅上涨且 NO_3^- 的质量浓度高于 SO_4^{2-} 表明与本地二次生成有关^[31,32].

从图 4 还可以看到, 随着 DS1 抵达上海, 上海的气体污染物 SO_2 和 NO_2 的浓度都明显下降, 被沙尘稀释^[17], 而 DS2 期间上海的气体污染物 SO_2 和 NO_2 的浓度较其他时期高, 有利于本地污染的二次生成. 可见 DS1 期间上海主要受到沙尘影响, 而 DS2 期间上海则受到沙尘、外来输送和本地污染的共同影响.

2.3.2 沙尘前后及过程中大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成的变化

$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 是判断 PM_{10} 中粗细粒子含量的简易方法之一, 同时也是判断一个地区是否受到沙尘影响的重要指标^[33]. 图 6 是不同 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值下 $\text{PM}_{2.5}$ 中各种化学组分质量浓度的百分比. 从中可见, 当 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} \leq 29\%$ 时, TWSII 与 OC、EC 之和仅占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 15% ~ 30%, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 中的碳酸盐和硅酸盐及地壳元素等未检出的化学组分显著增加, 约占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 70% ~ 85%, $\text{Ca}^{2+}/\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度比为 2% 左右, 这一现象出现在受沙尘影响较严重的 DS1 天气过程; 当 $29\% < \text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} \leq 45\%$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 中未检出组分变化较为剧烈, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 70% ~ 30%, TWSII 与 OC、EC 之和占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 30% ~ 70%, $\text{Ca}^{2+}/\text{PM}_{2.5}$ 比值为 1.0% ~ 2.0%, 这一现象发生在沙尘污染与非沙尘污染相混合的

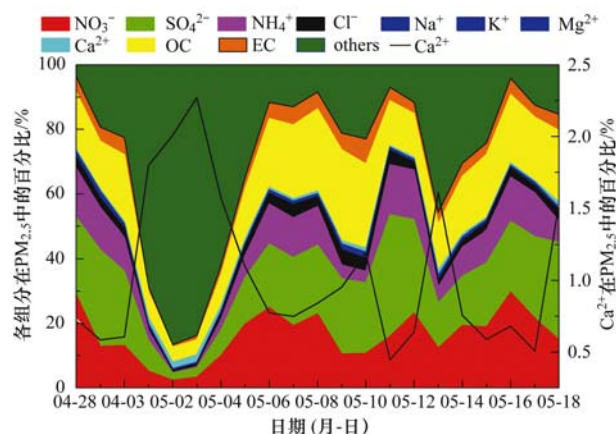


图 5 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分百分比的时间变化序列

Fig. 5 Time series of percentage of the chemical compositions in $\text{PM}_{2.5}$

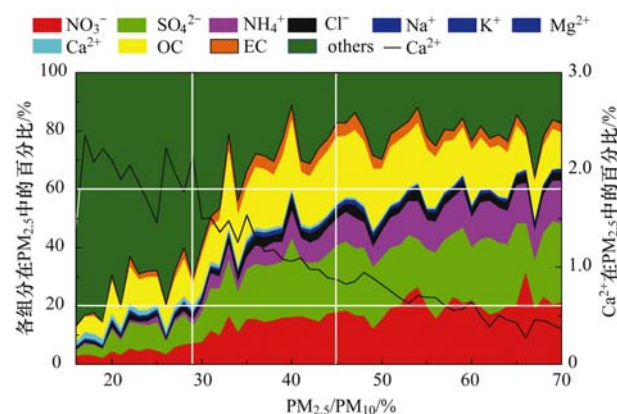


图 6 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分与 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的关系

Fig. 6 Relationship between the chemical compositions of $\text{PM}_{2.5}$ and the ratio of $\text{PM}_{2.5}$ with PM_{10}

DS2 期间; 当 $PM_{2.5}/PM_{10} > 45\%$ 时, $PM_{2.5}$ 的化学组成相对较为稳定, TWS II 与 OC、EC 之和占 $PM_{2.5}$ 的 80% 左右, 与非沙尘天 $PM_{2.5}$ 的化学组成基本一致^[21,34], $Ca^{2+}/PM_{2.5}$ 的比值在 0.4% ~ 1.0% 之间, 平均值为 0.6% 左右。

2.3.3 元素碳(OC)和有机碳(EC)

沙尘前(NDS1 期间)OC 和 EC 质量浓度分别为 $(8.4 \pm 2.6) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(2.3 \pm 0.8) \mu g \cdot m^{-3}$, 占 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 17.8% 和 4.8%; 受强沙尘影响, DS1 期间 OC 和 EC 质量浓度分别为 $(7.4 \pm 1.7) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(1.7 \pm 0.9) \mu g \cdot m^{-3}$, 其在 $PM_{2.5}$ 中的占比分别迅速降低至 6.3% 和 1.4%; 强沙尘影响过后, NDS2 期间 OC 和 EC 质量浓度分别为 $(9.6 \pm 4.1) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(2.1 \pm 1.2) \mu g \cdot m^{-3}$, 其在 $PM_{2.5}$ 中的占比分别上升至 20.4% 和 4.5%; 当沙尘再次袭击上海时, DS2 期间的 OC 和 EC 质量浓度分别为 $(13.2 \pm 6.0) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(3.0 \pm 1.5) \mu g \cdot m^{-3}$, 在 $PM_{2.5}$ 中的比值分别降低至 16.2% 和 3.7%。图 7 为不同天气过程 OC 和 EC 的对应关系。从中可见, NDS1、DS1、NDS2 和 DS2 的 OC/EC 分别为 2.4、1.5、3.0 和 3.5, 说明强沙尘期间(DS1)二次污染弱于非沙尘天气, 而 DS2 二次污染高于 NDS2, 可能与沙尘低空经过工业发达地区携带了更多有机成分有关。

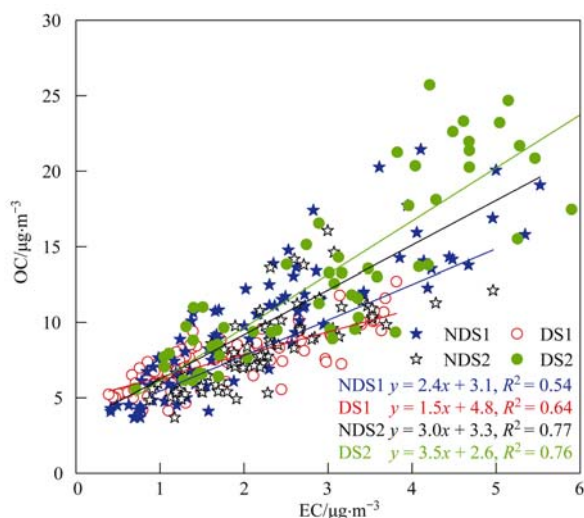


图 7 观测期间 EC 与 OC 的相关性

Fig. 7 Correlation between EC and OC

2.3.4 沙尘期间大气 $PM_{2.5}$ 的酸碱性

沙尘中含有丰富的碱性组分, 它们可以中和 $PM_{2.5}$ 中的酸性物质^[35], 影响 S 和 N 的循环, 并改变颗粒物的形成方式^[36], 因而研究颗粒物的酸碱性对掌握沙尘气溶胶的特性具有重要意义。为此, 人们常用如下离子平衡方程来研究气溶胶颗粒物的酸碱

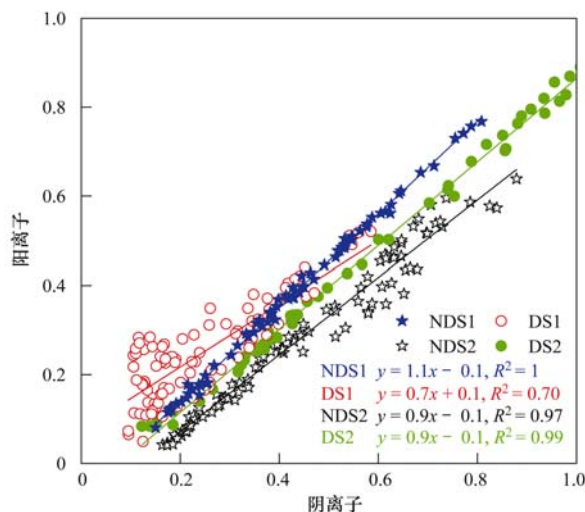


图 8 观测期间的阴阳离子相关性

Fig. 8 Correlation between total anions and cations

性^[28]:

$$AE = \frac{[SO_4^{2-}]}{48} + \frac{[NO_3^-]}{62} + \frac{[Cl^-]}{35.5} \quad (2)$$

$$CE = \frac{[Na^+]}{23} + \frac{[NH_4^+]}{18} + \frac{[Mg^{2+}]}{12} + \frac{[K^+]}{39} + \frac{[Ca^{2+}]}{20} \quad (3)$$

式中, AE 和 CE 分别为阴阳离子当量; $[SO_4^{2-}]$ 、 $[NO_3^-]$ 、 $[Cl^-]$ 、 $[Na^+]$ 、 $[NH_4^+]$ 、 $[Mg^{2+}]$ 、 $[K^+]$ 、 $[Ca^{2+}]$ 分别为 $PM_{2.5}$ 中各离子的浓度。由图 8 可知, 除 DS1 外, 其他时期阴阳离子的相关性都很好, 计算得到 NDS1、DS1、NDS2 和 DS2 的 CE/AE 均值分别为 (0.85 ± 0.1) 、 (1.13 ± 0.42) 、 (0.73 ± 0.15) 和 (0.77 ± 0.09) 。说明高矿尘含量的沙尘颗粒具有酸性缓冲作用^[37]。

中和因子(NF)常用来评价 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 等阳离子对 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等主要阴离子的中和度, NF 越大说明该阳离子对阴离子的中和度越大^[38]。中和因子计算公式如下:

$$NF_{X_i} = \frac{n[X_i^{n+}]}{2[SO_4^{2-}] + [NO_3^-]} \quad (4)$$

式中, $[X_i^{n+}]$ 表示 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 等阳离子浓度, n 表示阳离子所带的电荷数。计算结果如表 2。可见无论是非沙尘天还是沙尘天, NH_4^+ 都是主要的中和物质, 而沙尘天 Ca^{2+} 的中和作用明显高于非沙尘天, 其他阳离子的中和作用也有加强。

2.3.5 主要离子种类的形态

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是颗粒物的主要组分, 许多学者对颗粒物中硫酸盐、硝酸盐的形成机制做了

深入细致的研究^[39,40]. 研究发现, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要由 SO_2 和 NO_x 在大气中的二次反应而生成,并与 NH_4^+ 结合生成 NH_4HSO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 , 但有关主要离子存在形态的相关研究较少, 沙尘气溶胶离子形态的研究则更少.

表 2 观测期间各阳离子对主要酸性离子的中和因子

项目	NH_4^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+
NDS1	0.86	0.04	0.02	0.01	0.04
DS1	0.51	0.5	0.05	0.10	0.04
NDS2	0.81	0.05	0.01	0.01	0.03
DS2	0.71	0.10	0.02	0.02	0.04

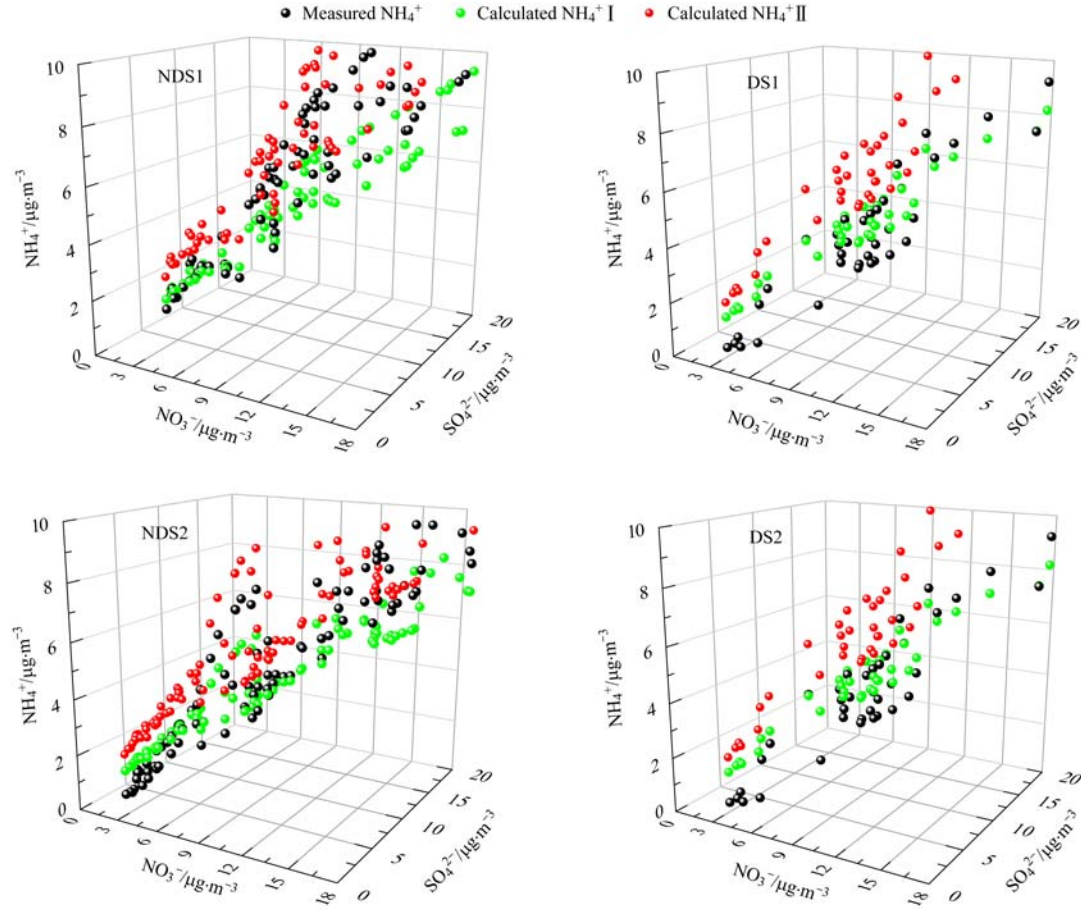
公式 (5) 和公式 (6) 分别表示 NH_4^+ 以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 形态存在和以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 形态存在的质量平衡方程^[37]. 其中

$[\text{NH}_4^+]$ 、 $[\text{NO}_3^-]$ 、 $[\text{SO}_4^{2-}]$ 表示各离子的质量浓度.

$$[\text{NH}_4^+] = 0.29 [\text{NO}_3^-] + 0.19 [\text{SO}_4^{2-}] \quad (5)$$

$$[\text{NH}_4^+] = 0.29 [\text{NO}_3^-] + 0.38 [\text{SO}_4^{2-}] \quad (6)$$

图 9 为分别采用公式 (5) 和 (6) 计算的 NDS1、DS1、NDS2、DS2 时期 NH_4^+ 的质量浓度与实测浓度的比较. 从中可知, 非沙尘期间估算的 NH_4^+ 的质量浓度与实测值一致性较好. 在 NH_4^+ 的浓度较小时, 实测值与用公式 (5) 计算获得的 NH_4^+ 浓度更一致, 说明 NH_4^+ 主要以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 形态存在; 在 NH_4^+ 的浓度较大时, 实测值与用公式 (6) 计算值更吻合, NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 形态存在. 而沙尘期间估算的 NH_4^+ 质量浓度较实测大, 可以认为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 除了以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 形态存在外, 还与其他矿物离子结合.



其中 Calculated NH_4^+ I 和 Calculated NH_4^+ II 分别为采用公式 (5) 和公式 (6) 计算得到的 NH_4^+ 浓度

图 9 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 的计算值与实测值比较

Fig. 9 Comparison between calculated and measured ammonium in $\text{PM}_{2.5}$

3 结论

(1) 2011 年 4 月末至 5 月期间上海地区受北方

强沙尘暴天气影响, 地面先后 2 次出现沙尘污染, 大气颗粒物浓度明显高于非沙尘. 期间, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 最高小时浓度达到 $900.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $185.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

最高日均浓度分别达到 $787.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $139.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别是我国环境空气质量二级标准的 5.3 倍和 1.9 倍。

(2) 非沙尘 (NDS1) 期间, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 $(51.6 \pm 7.1)\%$, SNA 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中所占比例大于 50%; 受强沙尘影响, DS1 的 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值仅为 $(26.8 \pm 9.7)\%$, SNA/ $\text{PM}_{2.5}$ 的比值下降至 11.2%, Ca^{2+} 的浓度比明显增大; 弱沙尘影响时, DS2 的 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 $(42.6 \pm 15.9)\%$, SNA/ $\text{PM}_{2.5}$ 的比值下降至 39.7%, Ca^{2+} 的浓度比同样有所上升, 但增幅低于 DS1。

(3) 当 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} \leq 29\%$ 时, TWSII 与 OC、EC 之和仅占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 15% ~ 30%, 而未检出的化学组分显著增加, 约占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 70% ~ 85%, $\text{Ca}^{2+}/\text{PM}_{2.5}$ 比值为 2% 左右, 这一现象出现在强沙尘天气; 当 $29\% < \text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} \leq 45\%$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 中未检出组分占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 70% ~ 30%, TWSII 与 OC、EC 之和占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 30% ~ 70%, $\text{Ca}^{2+}/\text{PM}_{2.5}$ 比值为 1.0% ~ 2.0%, 这一现象主要发生在沙尘污染与非沙尘污染相混合时期; 当 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} > 45\%$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成相对较为稳定。

(4) NDS1、DS1、NDS2 和 DS2 的 OC/EC 分别为 2.4、1.5、3.0 和 3.5, 说明强沙尘天气期间 (DS1) 二次污染弱于非沙尘天; 而 DS2 二次污染高于 NDS2, 可能与沙尘低空经过工业发达地区携带了更多的有机碳成分抵达上海地区有关。

(5) 沙尘颗粒中高矿尘组分具有酸性缓冲作用, DS1 的颗粒显碱性; DS2 的颗粒显酸性, 但较 NDS2 弱。中和因子分析显示, 无论是非沙尘天还是沙尘天, NH_4^+ 都是主要的中和物质, 而沙尘期间 Ca^{2+} 的中和作用明显高于非沙尘天, 其他金属阳离子的中和作用也有加强。同时发现在非沙尘期间 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 主要以 NH_4HSO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在, 而沙尘期间它们还会与其他矿物离子结合。

参考文献:

- [1] 闫涵, 高会旺, 姚小红, 等. 沙尘传输路径上气溶胶浓度与干沉降通量的粒径分布特征[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(2): 205-214.
- [2] Iwasaka Y, Shi G Y, Yamada M, *et al.* Mixture of Kosa (Asian dust) and bioaerosols detected in the atmosphere over the Kosa particles source regions with balloon-borne measurements: possibility of long-range transport[J]. Air Quality Atmosphere and Health, 2009, 2(1): 29-38.
- [3] Cwintny D M, Young M A, Grassian V H. Chemistry and photochemistry of mineral dust aerosol[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2008, 59(1): 27-51.
- [4] Rückerl R, Schneider A, Breitner S, *et al.* Health effects of particulate air pollution: a review of epidemiological evidence[J]. Inhalation Toxicology, 2011, 23(10): 555-592.
- [5] Prospero J M, Bullard J E, Hodgkins R. High-latitude dust over the north Atlantic: inputs from Icelandic Proglacial dust storms[J]. Science, 2012, 335(6072): 1078-1082.
- [6] 韩兰英, 张强, 郭锐, 等. 中国西北地区沙尘天气的时空位移特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 454-457.
- [7] 钱鹏, 郑祥民, 周立旻. 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.
- [8] 申冲, 李园, 王雪梅, 等. 北方强沙尘暴天气过程对广州空气质量影响的个例分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1725-1735.
- [9] 李娟. 中亚地区沙尘气溶胶的理化特性、来源、长途传输及其对全球变化的可能影响[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [10] Nie W, Wang T, Xue L K, *et al.* Asian dust storm observed at a rural mountain site in southern China: chemical evolution and heterogeneous photochemistry[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(8): 11985-11995.
- [11] Sun Y L, Zhuang G S, Wang Y, *et al.* The air-borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(35): 5991-6004.
- [12] 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, 46(3): 191-197.
- [13] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 $\text{PM}_{2.5}$ 化学物种的质量平衡特征[J]. 环境化学, 2004, 23(3): 326-333.
- [14] Lee B K, Jun N Y, Lee H K, *et al.* Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(11): 1535-1545.
- [15] 王玮, 王英, 苏红梅, 等. 北京市沙尘暴天气大气气溶胶酸度和酸化缓冲能力[J]. 环境科学, 2001, 22(5): 25-28.
- [16] Fang G C, Chang C N, Wu Y S, *et al.* Characterization of chemical species in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 1999, 234(1): 203-212.
- [17] 王琼真. 亚洲沙尘长途传输中与典型大气污染物的混合和相互作用及其对城市空气质量的影响[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [18] 魏星, 张蓉, 庄国顺. 煤炭污染物经由沙尘长途传输对大气质量的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011, 50(5): 547-555.
- [19] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季典型大气高污染过程中颗粒物的化学组成变化特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 81-92.
- [20] 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 等. 利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J]. 环境科学,

- 2013, **34**(6): 2071-2080.
- [21] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 181-188.
- [22] Draxler R R, Rolph G D. 2013. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- [23] Xue L K, Ding A J, Gao J, *et al.* Aircraft measurements of the vertical distribution of sulfur dioxide and aerosol scattering coefficient in China[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(2): 278-282.
- [24] Meng Z Y, Ding G A, Xu X B, *et al.* Vertical distributions of SO₂ and NO₂ in the lower atmosphere in Beijing urban areas, China[J]. Science of the Total Environment, 2008, **390**(2-3): 456-465.
- [25] 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**(5): 1160-1167.
- [26] Wang Q Y, Cao J J, Shen Z X, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during dust storms and air pollution events in Chengdu, China[J]. Particulology, 2013, **11**(1): 70-77.
- [27] Shen Z X, Cao J J, Arimoto R, *et al.* Chemical composition and source characterization of spring aerosol over Horqin sand land in northeastern China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**(D14): 1-15.
- [28] Shen Z X, Wang X, Zhang R J, *et al.* Chemical composition of water-soluble ions and carbonate estimation in spring aerosol at a semi-arid site of Tongyu, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011, **11**(4): 360-368.
- [29] 刘咸德, 董树屏, 李冰, 等. 沙尘暴事件中大气颗粒物化学组分的浓度变化和硫酸盐的形成[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(6): 12-17.
- [30] 张兴赢, 庄国顺, 陈建民, 等. 沙尘暴颗粒物表面的元素存在形态和组成[J]. 科学通报, 2004, **49**(24): 2544-2550.
- [31] Hu M, Wu Z J, Slanina J, *et al.* Acidic gases, ammonia and water-soluble ions in PM_{2.5} at a coastal site in the Pearl River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6310-6320.
- [32] Safai P D, Budhavant K B, Rao P S P, *et al.* Source characterization for aerosol constituents and changing roles of calcium and ammonium aerosols in the neutralization of aerosol acidity at a semi-urban site in SW India[J]. Atmospheric Research, 2010, **98**(1): 78-88.
- [33] 吴兑, 吴晟, 李海燕, 等. 穗港晴沙两重天——2010 年 3 月 17-23 日珠三角典型灰霾过程分析[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(4): 695-703.
- [34] 周敏. 上海市秋季典型大气高污染过程中细粒子的化学组成变化[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [35] Zhang X Y, Cao J J, Li L M, *et al.* Characterization of atmospheric aerosol over Xian in the South Margin of the loess Plateau, China[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(26): 4189-4199.
- [36] Kim B G, Park S U. Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(18): 3191-3201.
- [37] Shen Z X, Arimoto R, Cao J J, *et al.* Seasonal variations and evidence for the effectiveness of pollution controls on water-soluble inorganic species in total suspended particulates and fine particulate matter from Xi'an, China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, **58**(12): 1560-1570.
- [38] Possanzini M, Buttini P, Palo V. Characterization of a rural area in terms of dry and wet deposition[J]. Science of the Total Environment, 1998, **74**(1): 111-120.
- [39] Guo J H, Rahn K A, Zhuang G S. A mechanism for the increase of pollution elements in dust storms in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(36): 855-862.
- [40] Baek B H, Aneja V P. Measurement and analysis of the relationship between ammonia, acid gases, and fine particles in Eastern North Carolina [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, **54**(5): 623-633.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人