

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小微 (817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷 (826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔 (835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明 (842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋 (849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永 (857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文 (864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼 (874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品 (882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成 (892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙 (900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影 (907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍 (914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽 (919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲 (927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华 (933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉 (943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军 (950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛 (955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可 (962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴 (968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军 (974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥 (979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹 (986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广 (993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广 (998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广 (1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔 (1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇 (1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利 (1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强 (1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威 (1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波 (1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶 (1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏 (1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光 (1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲 (1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水 (1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉 (1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西 (1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强 (1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花 (1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆 (1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍 (1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明 (1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强 (1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶 (1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛 (1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰 (1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强 (1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川 (1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明 (1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲 (1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明 (1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙 (1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究

林海峰^{1,2,3}, 辛金元^{2*}, 张文煜¹, 王跃思², 刘子锐², 陈传雷³

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 3. 辽宁省气象局沈阳中心气象台, 沈阳 110001)

摘要: 利用2009年北京市大气颗粒物质量浓度和气溶胶光学特性的同步观测研究发现, 北京市城区颗粒物污染严重. $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 年平均浓度分别为 (65 ± 14) 、 $(117 \pm 31) \mu g \cdot m^{-3}$, 均超出国家2016年拟执行环境空气质量二级标准, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 日均值超标率分别为35%、26%. 细粒子 $PM_{2.5}$ 污染与可吸入颗粒物 PM_{10} 污染呈显著性相关, 相关系数 R 约为0.90 ($P < 0.001$), 二者相关性伴随 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重自春季到冬季逐渐增大而增强, 年均 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比重为61%. 气溶胶光学厚度AOD(500 nm)与气溶胶波长指数(α)年均值分别为 (0.55 ± 0.10) 、 (1.12 ± 0.08) . $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与AOD间全年及各季节均呈显著线性相关, 相关系数 $R \geq 0.50$; 但其相关系数与相关函数存在着显著的季节差异, 夏秋季节相关性显著高于春冬季节, 且全年相关性掩盖较大的季节性系统差异. 对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 数据进行湿度订正, 对AOD进行混合层高度订正, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与AOD之间的相关性得到一定提升, 且更适合指数相关.

关键词: 北京市; 颗粒物污染; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; 气溶胶光学厚度; 相关性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0826-09

Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City

LIN Hai-feng^{1,2,3}, XIN Jin-yuan², ZHANG Wen-yu¹, WANG Yue-si², LIU Zi-rui², CHEN Chuan-lei³

(1. Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Central Meteorological Observatory, Liaoning Provincial Meteorological Bureau, Shenyang 110001, China)

Abstract: The pollution of particulate matter was serious in Beijing City from the synchronous observation of particulate matter mass concentration and aerosol optical characteristics in 2009. The annual mean concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were $(65 \pm 14) \mu g \cdot m^{-3}$ and $(117 \pm 31) \mu g \cdot m^{-3}$, respectively, which exceeded the national ambient air quality annual standards to be implemented in 2016. There were 35% and 26% days of 2009 that the daily standards were exceeded. There was a significant correlation between fine particulate ($PM_{2.5}$) and inhalable particle (PM_{10}), with a correlation coefficient (R) of approximately 0.90 ($P < 0.001$). PM_{10} contained a large percentage of $PM_{2.5}$, with an annual percentage of about 61%. The percentage became much higher from spring to winter, while the correlation between $PM_{2.5}$ and PM_{10} became much stronger. The annual mean of AOD (500 nm) and Angstrom exponent were (0.55 ± 0.1) and (1.12 ± 0.08) , respectively. There were significant correlations between $PM_{2.5}$, PM_{10} and AOD in the four seasons and the whole year, and the correlation coefficients were greater than or equal to 0.50. Furthermore, the correlation functions and coefficients had seasonal variations. The correlations were more significant in summer and autumn than in spring and winter. The annual correlation could cover up the seasonal systematic differences. The correlations between AOD revised by Mixed Layer Height and $PM_{2.5}$, PM_{10} revised by Relative Humidity became stronger, and the exponential correlations were superior to the linear correlations.

Key words: Beijing City; particulate matter pollution; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; AOD; correlation

大气气溶胶(也称颗粒物)是指悬浮在大气中的固态和液态粒子, 其尺度分布范围为 $10^{-3} \sim 10^1 \mu m$. 大气气溶胶对太阳辐射的散射、吸收作用直接影响地球大气的辐射平衡, 大气气溶胶不仅对气候系统存在直接和间接辐射强迫^[1]; 同时也是影响城市空气质量的主要污染物, 对局地甚至区域性环境产生危害^[2~4], 并通过成云作用及非均相化学反应

参与大气中的各种化学过程, 影响其他温室气体成分的源汇, 对全球气候变化有着重要的作用. 大气

收稿日期: 2012-05-25; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41222033); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05020103)

作者简介: 林海峰(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: lhf@dq.cern.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: xjy@mail.iap.ac.cn

气溶胶还是环境研究、大气订正中的重要因子之一。PM_{2.5}指空气动力学直径小于、等于2.5 μm的细颗粒物,对可见光的消光作用(散射和吸收)可造成大气能见度降低^[5],进入人体的PM_{2.5}大部分沉积在支气管和肺泡中,对健康造成直接危害^[6],PM₁₀和PM_{2.5}对人体健康的危害已经被国内外大量的流行病学和毒理学研究所证实^[7~11]。我国现行的环境空气质量标准以总悬浮颗粒物(TSP)和可吸入颗粒物(PM₁₀,空气动力学直径≤10 μm)为控制对象,为增强对细颗粒物污染全面遏制,国家环保部发布了2016年拟执行PM₁₀与PM_{2.5}控制标准(GB 3095-2012)。

气溶胶光学厚度(AOD)是气溶胶消光系数从地面到大气层顶的积分,表征无云大气铅直气柱中气溶胶散射造成的消光程度,与地面气溶胶质量浓度、消光系数以及吸湿增长参数等相关。气溶胶分布具有较高时空变异性,地面观测站点能够提供时间连续的观察,但不能得到良好的空间覆盖信息,难以反映污染物来源和变化趋势的宏观分布^[12]。建立AOD和PM_{2.5}质量浓度之间的联系,对空气质量监测和健康效应研究有积极意义。相关研究利用MODIS AOD产品与近地层PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度的相关性,建立回归方程反演近地层气溶胶质量浓度^[13~18]。但是,目前MODIS产品在复杂下垫面区域仍存在较大误差,其季节均值或月均值的误差存在叠加放大^[19],利用卫星资料直接反演地面颗粒物浓度势必引入较大误差。为此,利用地基气溶胶光学特性遥感数据和近地层颗粒物浓度数据研究建立AOD与PM_{2.5}、PM₁₀相关函数,将对发展卫星遥感近地层颗粒物浓度提供重要的应用参考。

1 材料与方法

北京市地处华北平原西北端,地处中纬,位于东亚大陆的东岸,气候受蒙古高压的控制,因此具有典型的暖温带半湿润大陆性季风气候特征,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促。观测地点位于中国科学院大气物理研究所铁塔分部东二楼楼顶,116°22'20"E,39°58'27"N,海拔高度50 m;处于北京市北三环与北四环之间的北土城公园,周边无显著点源,观测数据具有较高代表性。PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度监测采用美国热电公司生产的RP 1400a系列仪器,连续实时在线测量,数据采集频次为每5 min一次,仪器每两周定期进行一次标定,以保证观测数据的准确性。该仪器采用石英微量振荡天平的工作原

理,最低检测限:0.06 μg·(m³·h)⁻¹,质量分辨率:0.1 μg·m⁻³,精度:±1.5 μg·(m³·h)⁻¹。

气溶胶光学厚度观测采用便携式MICROTOS II太阳分光光度计。光度计有5个通道,波段中心波长分别为340、380、500、675与1 020 nm,每个通道滤波片波长精度为±1.5 nm,半波宽度为10 nm,通道的视场为2.5°圆形视场。该仪器采用以太阳光源的被动遥感手段,自大气上界入射到地气系统的太阳辐射受到大气中气体分子以及大气气溶胶粒子的散射和吸收,在地面接收到的太阳辐射包含了大气中气溶胶信息,通过测量接收到的太阳辐射,利用Beer-Lambert-Bouguer(朗伯-比尔)定律^[20]反演气溶胶光学厚度(AOD)。气溶胶波长指数angstrom exponent(α)采用340、380、500、675 nm四通道AOD对数线性拟合获取。

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5}与PM₁₀变化特征

图1、图2给出2009年北京市大气颗粒物PM_{2.5}、PM₁₀污染以及AOD(500 nm)、气溶胶波长指数(α)的日均值与月均值变化情况。PM_{2.5}、PM₁₀质量浓度、AOD(500 nm)和气溶胶波长指数(α)的逐日变化显著,颗粒物浓度与气溶胶光学参数存在季节性变化。给出现行国家环境空气质量二级标准(CEPB II)PM₁₀年均值、日均值标准分别为100、150 μg·m⁻³;2016年国家拟执行空气质量二级标准(GB 3095-2012)PM₁₀年均值、日均值标准分别为70、150 μg·m⁻³;PM_{2.5}年均值、日均值标准分别为35、75 μg·m⁻³。2009年北京PM₁₀浓度年均值为(117±31) μg·m⁻³,超过现行国家二级标准;2009年PM₁₀的超标日数为83 d,日均值超标率是26%。对比以往观测结果^[21~23],表明北京市可吸入颗粒物PM₁₀污染正在逐步减轻,但超标情况依然严重,颗粒物污染的长效管控治理仍需加强。细粒子PM_{2.5}年平均浓度为(65±14) μg·m⁻³,PM_{2.5}的超标日数为125 d,2009年均值超过国家2016年拟行二级标准,日均值超标率是35%。在2009年春夏秋冬4个季节中PM_{2.5}超标日均超过20 d,夏季、冬季超标日数达到35 d;PM₁₀超标日数季节变化相对较大,其中春季PM₁₀超标5 d明显少于其他季节,秋季最高,达到35 d。2009年PM_{2.5}观测值与王姣等^[24]研究得到植物园站2009年PM_{2.5}的年均质量浓度为60 μg·m⁻³较接近;明显低于北京2001年PM_{2.5}年均值93 μg·m⁻³^[25],及2003~2004年

监测结果 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [26]. 表明近几年伴随可吸入颗粒物污染治理, 细粒子污染也在逐步下降. $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 有明显的季节变化特征, 呈现从春季到冬季颗粒物浓度递增变化趋势. 春夏季较秋冬季低, 是因为春

天风大, 夏天空气边界层下对流运动旺盛, 经常下雨, 颗粒物会受到雨水清除, 不容易积累; 秋冬季比较高主要受静稳天气及入冬采暖期燃煤颗粒物的排放影响 [27, 28].

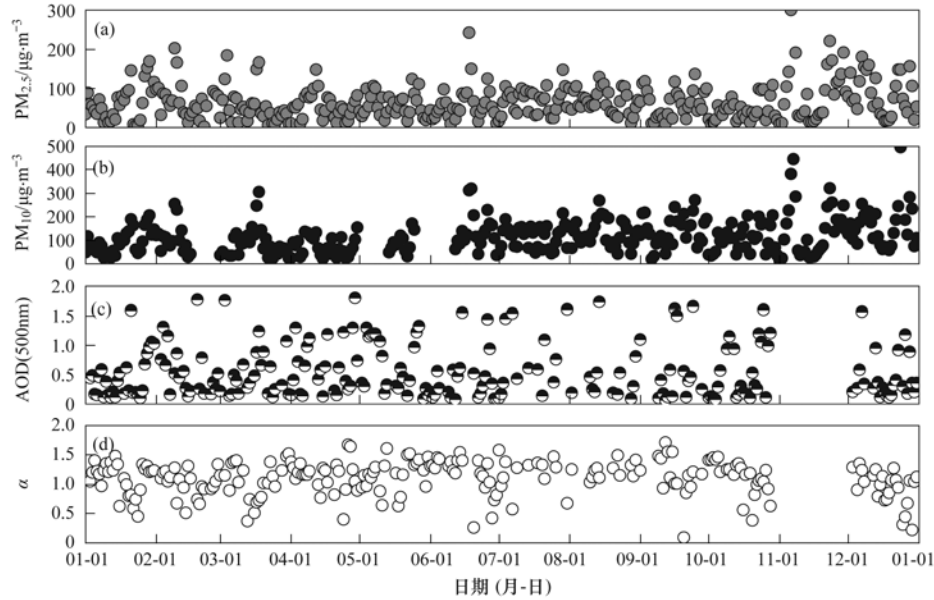


图1 2009年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 $\text{AOD}(500 \text{ nm})$ 、气溶胶波长指数(α)日平均示意

Fig. 1 Daily mean of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , AOD and Angstrom exponent (α) in 2009 in Beijing City

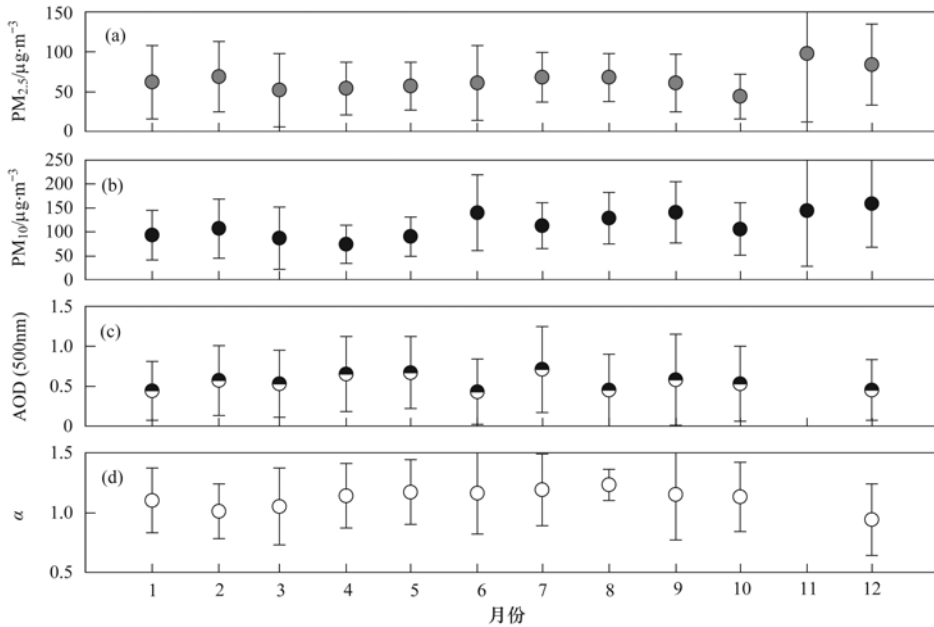


图2 2009年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 $\text{AOD}(500 \text{ nm})$ 、气溶胶波长指数(α)月平均示意

Fig. 2 Monthly mean of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , $\text{AOD}(500 \text{ nm})$ and angstrom exponent (α) in 2009 in Beijing City

2009年北京 PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值及月均值变化具有较高的一致性, PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值相关方程为 $y = 0.61x - 4.68$, $R = 0.90$, 月均值相关方程为 $y = 0.31x + 28.48$, $R = 0.67$. 11 ~ 12 月出现大批高

值时段. 12 月 PM_{10} 月均值为全年最高, 达到 $(183 \pm 160) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 为 $(84 \pm 51) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重为 65%; 11 月 $\text{PM}_{2.5}$ 月均值为全年最高, 达到 $(98 \pm 86) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 为 (144 ± 116)

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重达到全年次高 75%。出现高值是由于受到煤烟的影响。虽然 2~3 月也出现一定量的高值,但月均值不高,说明采暖带来的污染依然存在,受大风天气增多的影响,为污染物清除创造了有利的条件, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重分别为 80%、48%,与车瑞俊等^[29]得到 2005 年北京化工大学采样点冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 比值 0.64 接近,说明采暖季细粒子比重较高,3 月采暖结束,细粒子比重明显降低。这期间 PM_{10} 质量浓度变化比较大, $\text{PM}_{2.5}$ 变化同样有持续升高和降低过程,反映颗粒物污染的累积与清除过程。4~10 月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化幅度较小。6 月出现短暂高值时段,可能受水汽含量增加影响, PM_{10} 月均值达到 $(140 \pm 79) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 相对较低为 $(61 \pm 47) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 $\text{PM}_{2.5}$ 最低值出现在 10 月,浓度为 $(44 \pm 28) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 为 $(106 \pm 55) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 最低值出现在 4 月,浓度为 $(74 \pm 40) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 为 $(54 \pm 33) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

气溶胶光学厚度 AOD(500 nm) 年均值为 0.55 ± 0.10 ; AOD 春季最高,达到 0.61,冬季最低,为 0.49; 气溶胶波长指数(α) 年均值在 1.12 ± 0.08 , α 全年绝大多数处于 0.8~1.5 之间,整体较高,因为在城市背景下,空气中颗粒物以受人类生活影响较重的细粒子为主控模态(北京 2009 年 $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重为 61%); 气溶胶波长指数低值主要出现在春、冬季,这两个季节大风扬尘天气导致粗模态粒子比例增加。 α 随季节变化明显, α 夏季最高为 1.19 ± 0.04 ,冬季最低为 1.02 ± 0.08 。AOD 逐日变化较大,月均值及季节差异显著,春夏季节 AOD 高于秋冬季节。 α 随 AOD 没有明显的变化趋势,气溶胶主控模态较为稳定,我国中东部城市气溶胶模态受工业和日常人为活动影响显著^[20]。此外,在北京市雾霾污染较严重的秋冬季节及多雨的夏季导致 AOD 数据缺失量较大,导致气溶胶光学厚度季节变化特征与颗粒物浓度季节变化存在一定差异;鉴于此,对于以人为排放为主的城市地区,利用气溶胶光学厚度与近地层颗粒物浓度相关性推导 AOD 反演 PM 方法,如果建立在月季均值上,势必引入较大的误差。针对不同季节,利用日均值进行 AOD 与 PM 相关性研究和反演方法的建立,可以缩小误差的引入,下文将对此进行详细的讨论。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 相关性分析

图 3 是 2009 年北京市大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染的日均值相关性曲线。 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 $P < 0.001$ 水平上有显著的相关性,具有高度统计学

意义。回归方程为 $y = 0.61x - 4.68$, 可以反映可吸入颗粒物 PM_{10} 中细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 的含量。北京 2009 年 $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重为 61%,说明可吸入颗粒物 PM_{10} 中细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 的含量大于粗粒子 $\text{PM}_{2.5-10}$ 的含量。徐敬等^[26] 和杨复沫等^[30] 得出 1999~2001 年、2003 年北京 $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的比重约为 55%,表明近年来颗粒物污染中的细粒子比例在上升。

表 1 给出冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 最高可达到 $(72 \pm 11) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 为 $(128 \pm 48) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重约为 70%,相关系数为 0.92。主要由于冬季燃烧排放大量的细粒子导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升,比重增大。春季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 最低,分别为 $(84 \pm 8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(55 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重最低约为 53%,相关系数为 0.80。显然,春季大风天气可以有效的清除北京城区颗粒物污染,细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 比重接近颗粒物自然排放比例。北京市秋季较严重的雾霾污染导致 PM_{10} 季节均值最高,达到 $(131 \pm 21) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 为 $(68 \pm 27) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重约为 66%,相关系数为 0.92。这与李令军等^[23] 关于 2009 年北京大气背景点定陵站观测 PM_{10} 得出春季最高,夏秋较低的结论不同,主要是由于非城市背景对沙尘等气象要素更敏感,当春季风大会导致风沙加重,而城市却会出现明显清除污染物迹象。夏季 PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度分别为 $(127 \pm 14) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 $(66 \pm 4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重约为 56%,相关系数为 0.89;夏季高温高湿有助于细粒子吸湿性增长,细粒子比例相对秋冬季节有较大下降。

虽然, $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 之间有极显著相关, $P < 0.001$, 相关系数 > 0.80 。但是, $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 间的相关性存在显著的季节差异,夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 相关性与全年基本相同,秋季和冬季明显好于全年,春季相对较差。本研究将 $\text{PM}_{2.5}$ 按质量浓度区分为 < 50 、 $50 \sim 100$ 、 $> 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 这 3 个层次,并利用不同季节 PM_{10} 日均值,通过全年相关方程推算出 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值。发现 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度效应 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,除春季外, $\text{PM}_{2.5}$ 实测值整体上低于模拟值,模拟引入的误差区间为 $-20 \sim 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春季模拟引入的误差区间为 $-5 \sim 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;当 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度处于 $50 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间时,夏、秋季实测值依然低于模拟值,误差区间为 $-11 \sim 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春、冬季与之相反,误差区间为 $3 \sim 19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春季误差步长达到 13;当 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $> 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,四季实测值

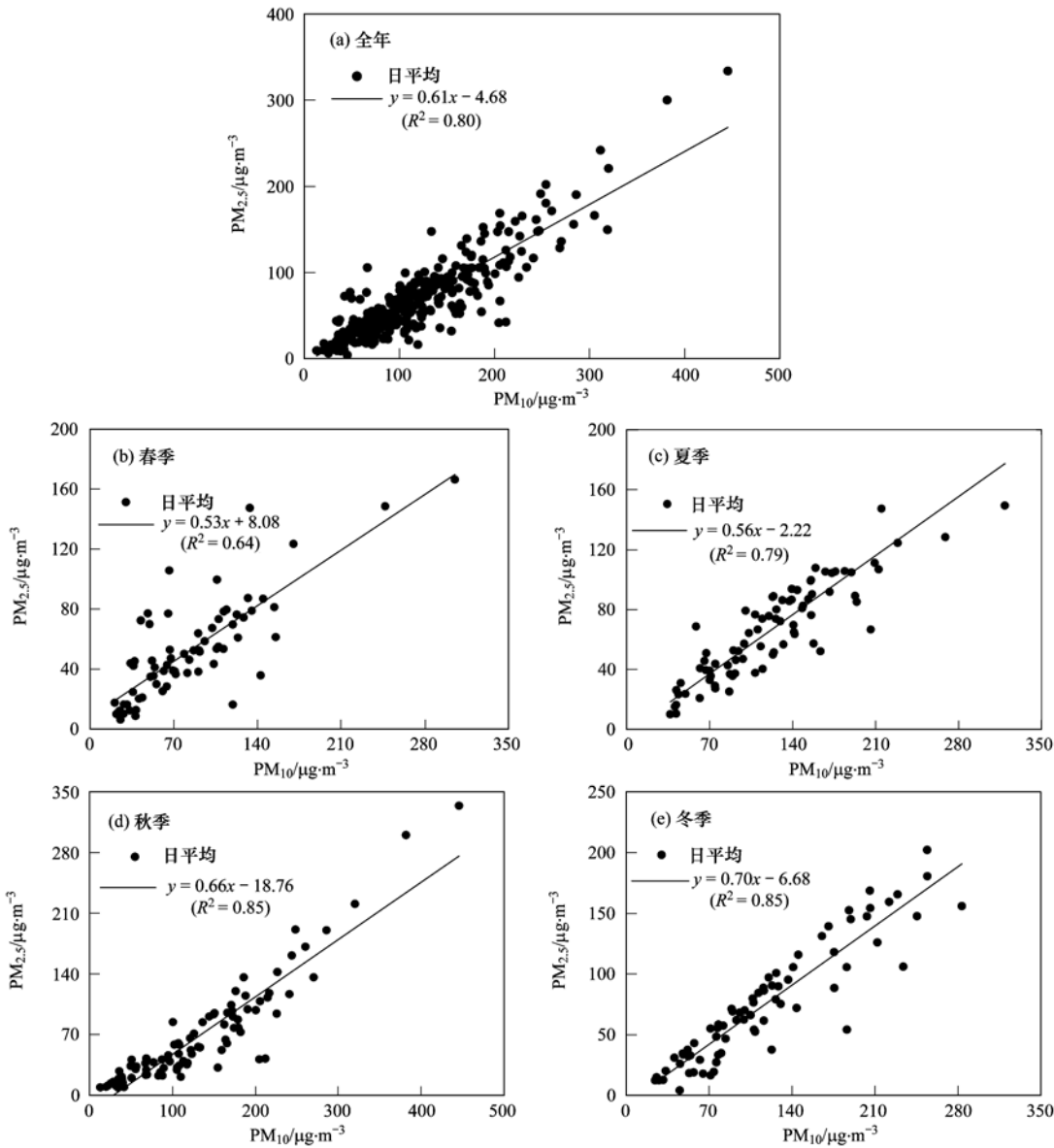


图 3 2009 年北京市不同季节 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 日均值相关性

Fig. 3 Correlation between the daily mean PM_{2.5} and PM₁₀ in the four seasons of 2009 in Beijing City

表 1 2009 年北京市 PM_{2.5}、PM₁₀、AOD 年均值、季节均值与相关性($P < 0.001$)

Table 1 Annual and seasonal mean of PM_{2.5}, PM₁₀, AOD, and the correlation between them in 2009 in Beijing City ($P < 0.001$)

季节	PM _{2.5} /μg·m ⁻³ (超标天数/d)	PM ₁₀ /μg·m ⁻³ (超标天数/d)	AOD	α	PM _{2.5} (y) VS PM ₁₀ (x)	R ²	PM _{2.5} (y) VS AOD(x)	R ²	PM ₁₀ (y) VS AOD(x)	R ²
春季	55 ± 3 (23)	84 ± 8 (5)	0.62 ± 0.08	1.12 ± 0.06	y = 0.53x + 8.08	0.65	y = 53.96x + 16.89	0.47	y = 69.57x + 40.49	0.23
夏季	66 ± 4 (35)	127 ± 14 (24)	0.53 ± 0.16	1.19 ± 0.04	y = 0.56x - 2.22	0.80	y = 45.54x + 25.89	0.58	y = 64.99x + 73.04	0.31
秋季	68 ± 27 (32)	131 ± 21 (35)	0.55 ± 0.04	1.14 ± 0.02	y = 0.66x - 18.76	0.85	y = 49.93x + 18.74	0.78	y = 80.10x + 72.08	0.52
冬季	72 ± 11 (35)	128 ± 48 (19)	0.49 ± 0.07	1.02 ± 0.08	y = 0.70x - 6.68	0.85	y = 89.70x + 22.29	0.55	y = 113.75x + 51.13	0.49
全年	65 ± 14 (125)	117 ± 31 (83)	0.55 ± 0.10	1.12 ± 0.08	y = 0.61x - 4.68	0.80	y = 56.19x + 23.16	0.46	y = 81.01x + 58.36	0.36
数据量	359	314	224	224						

全体高于模拟值,误差区间为 0 ~ 49 μg·m⁻³,秋季误差最大,达到 49. 说明全年相关方程掩盖了不同季节的系统差异,不同质量浓度区间内通过全年相关方称模拟引入的误差存在较大差异.

2.3 AOD 与 PM_{2.5}、PM₁₀相关性分析

为了研究不同季节 PM_{2.5}、PM₁₀与 AOD 的相关性,本研究对相关数据按照春、夏、秋、冬这 4 个季节进行了统计分析,在 $P < 0.001$ 水平上有极显著

的相关性,具有高度统计学意义. 图 4 可以看出 $PM_{2.5}$ 与 AOD 相关性明显好于 PM_{10} ,说明 $PM_{2.5}$ 对气

溶胶消光的贡献较大. 全年 $PM_{2.5}$ 与 AOD 相关性显著,相关系数 R 为 0.68; 不同季节 $PM_{2.5}$ 与 AOD 相

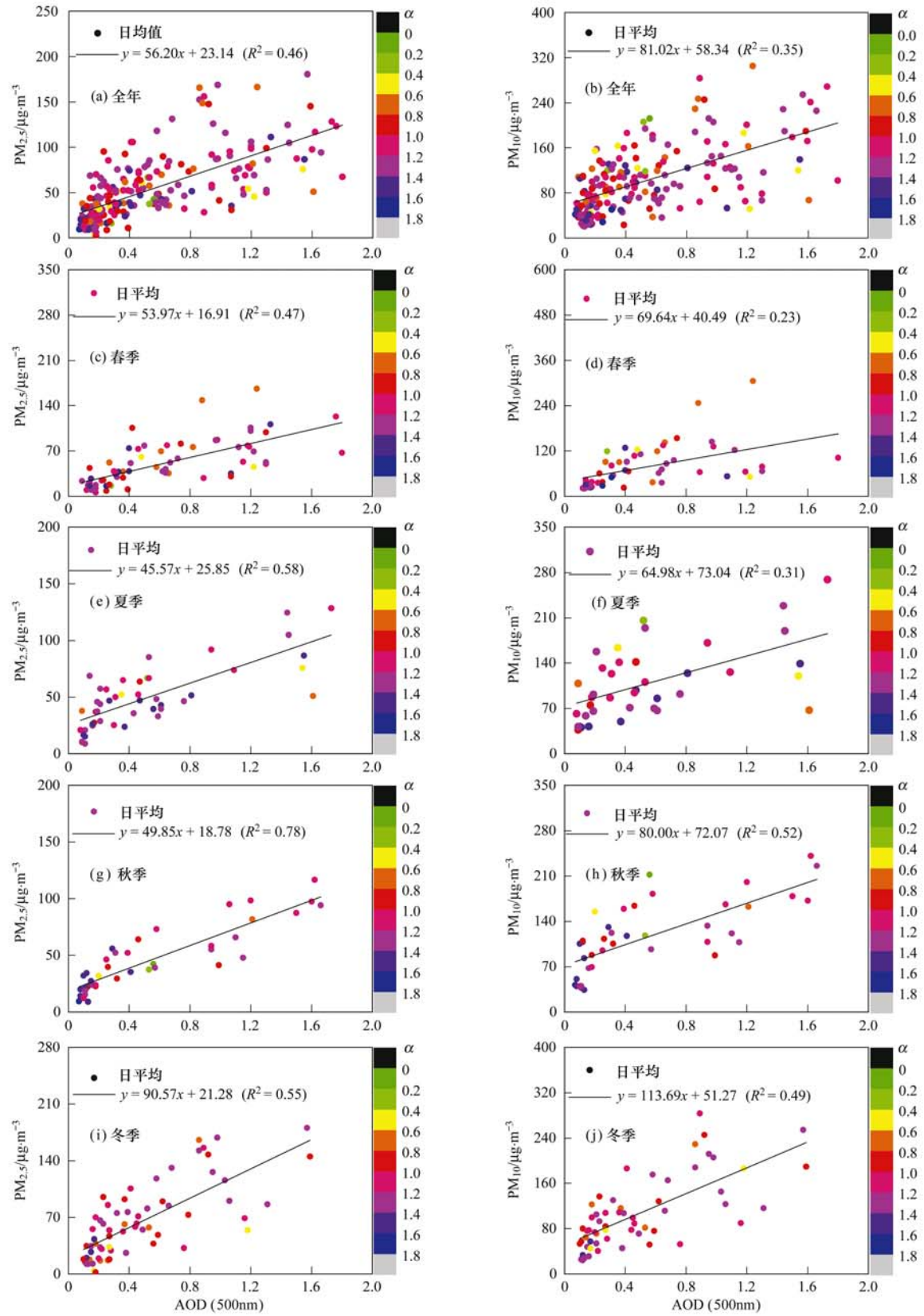


图 4 2009 年北京市不同季节的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 AOD 日均值的相关性

Fig. 4 Correlation between the daily mean AOD and $PM_{2.5}$, PM_{10} in the four seasons of 2009 in Beijing City

关性亦显著, R 变化范围为 0.69 ~ 0.88. 明显优于王静等^[31] 通过北京 2003 年共计 125 对 MODIS AOD 和 $PM_{2.5}$ 数据二者之间的直接比较, R 为 0.56, 相关性在春、夏和秋季良好, 冬季相关性较差, 季节 $R < 0.69$. 说明 $PM_{2.5}$ 与 AOD 相关性季节变化显著, MODIS 卫星反演 $PM_{2.5}$ 浓度不确定性较明显. 这主要是由于, 不同季节气溶胶物化特性及监测环境存在较大差异, 从而导致 $PM_{2.5}$ 和 AOD 的相关性季节差异很大长时间段样本的相关性会随季节差异而降低. 因此, 全年或个别时段的 $PM_{2.5}$ 与 AOD 的相关函数不具备普适代表性, 不同季节 $PM_{2.5}$ 与 AOD 的相关性及相关函数存在较大差异. 秋季, 气溶胶成分较为稳定, 所以 $PM_{2.5}$ 与 AOD 的相关性最高, R 达 0.88. 春季, 因大风天气较多, 城市上空气溶胶传输变化较快, 当日气溶胶光学厚度的时间代表性较差, 从而导致 $PM_{2.5}$ 与 AOD 的相关性较低, R 为 0.69.

气溶胶消光主要来源于细粒子的消光贡献, 粗粒子消光贡献相对较低. 因 PM_{10} 中粗粒子占据较大比重, 所以导致 PM_{10} 与 AOD 全年相关性普遍低于 $PM_{2.5}$ 与 AOD 的相关性, R 为 0.59. 春季、夏季 R 分别为 0.48、0.56, 低于全年; 秋季、冬季相关性相对要高, R 分别为 0.72、0.70. 虽然不同季节相关分析大于统计学上 99% 置信度的要求, 但 R 数值相对较低, 利用 AOD 与 PM_{10} 的相关方程反演 PM_{10} 浓度将存在较大随机误差. 本研究中 PM_{10} 与 AOD 全年及季节相关性明显优于何秀等^[32] 给出的 2005 ~ 2006 年 MODIS AOD 与北京大学地面监测 PM_{10} 质量浓度的相关性, 年均相关系数 R 为 0.26. 对比王静等^[31]、何秀等^[32] 获得的 2003、2005 ~ 2006 年 PM 与 MODIS AOD 相关性, 不难发现, 本研究中地基观测 AOD 与 PM 相关性均好于卫星 AOD 产品与 PM 的相关性, 尤其在考虑到季节影响的情况下, 地基同步观测结果的相关性更高. 此外, 季节性变化的环境因素会对 AOD 和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 产生一定的影响, 如湿度、温度、边界层高度等气象条件的作用, 进一步研究它们之间的相关性仍有一定的提升空间, 假如对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 进行湿度订正和 AOD 进行混合层高度订正, 理论上效果应该更好.

2.4 湿度和混合层高度订正

湿度影响因子一般用下式表示^[12]:

$$f(RH) = 1/(1.0 - RH/100) \quad (1)$$

在给定波长上和混合层高度为 H 的气溶胶光学厚度可以表达为:

$$\begin{aligned} \tau_{\lambda} &= \pi \int_0^H \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}, \text{amb}}(r) n_{\text{amb}}(r) r^2 dr dz \\ &= \pi f(RH) \int_0^H \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}, \text{dry}}(r) n(r) r^2 dr dz \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $n_{\text{amb}}(r)$ 是一定湿度条件下的以粒子半径为特征尺度参数的气溶胶数浓度谱分布函数, $Q_{\text{ext}, \text{amb}}(r)$ 是一定湿度条件下的消光系数, $Q_{\text{ext}, \text{dry}}(r)$ 是干燥条件下的消光系数^[33]. 数浓度谱分布的消光函数为:

$$\langle Q_{\text{ext}} \rangle = \frac{\int r^2 Q_{\text{ext}}(r) n(r) dr}{\int r^2 n(r) dr} \quad (3)$$

气溶胶有效半径表达为:

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int r^3(r) n(r) dr}{\int r^2 n(r) dr} \quad (4)$$

气溶胶干燥条件下的质量浓度表达为:

$$PM = \frac{4}{3} \pi \rho \int r^3 n(r) dr \quad (5)$$

气溶胶光学厚度与近地层 PM 的关系式通过公式 (2) ~ (5) 可以推导为:

$$\tau_{\lambda} = PM \cdot H \cdot f(RH) \cdot \frac{\langle Q_{\text{ext}, \text{dry}} \rangle}{4 \rho r_{\text{eff}}} \quad (6)$$

由此原理对气溶胶光学厚度和颗粒物浓度进行混合层高度和湿度进行订正可以有效提高地面 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 AOD 的相关性. 订正结果如图 5 所示.

图 5 是分别对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 进行湿度订正和对 AOD 进行高度订正之后二者的相关性分析. 图 5(a)、5(b) 给出颗粒物浓度经过湿度订正后与气溶胶光学厚度的相关分析, $PM_{2.5}$ 与 AOD 之间全年相关系数由 0.68 提升到 0.75, PM_{10} 与 AOD 之间全年相关系数由 0.60 提升到 0.69. 图 5(c)、5(d) 给出气溶胶光学厚度经过混合层高度订正后的相关分析, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 AOD 之间全年相关系数分别达到 0.74、0.67. 图 5(e)、5(f) 给出了经过湿度和混合层高度的同时订正, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 AOD 之间全年相关系数整体提升到 0.79、0.75. 经过湿度和高度订正后, 相关性有所上升. 订正后相关性适合指数分布, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 AOD 指数相关系数分别为 0.82、0.78. 利用指数方程可以较好的解决线性相关方称对低浓度的 AOD 反演 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度的高估问题. 结果表明利用相对简单的关系来代表 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 AOD 之间的变化趋势存在较大误差, 需要通过大量实验结果进行比对分析, 准确获取给

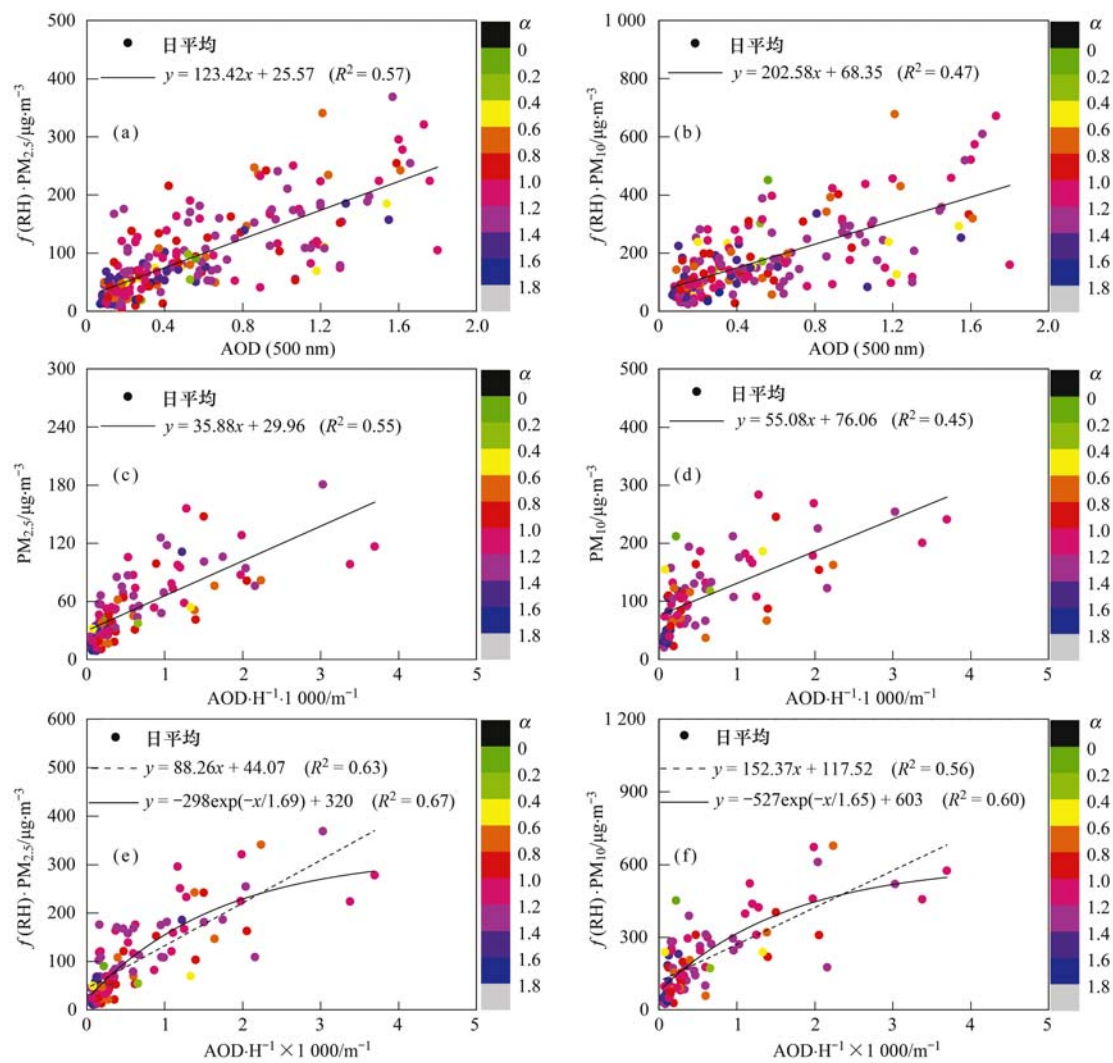


图5 经混合层高度与湿度订正后北京市PM_{2.5}、PM₁₀与AOD相关性变化

Fig. 5 Correlation between AOD revised by mixed layer height and PM_{2.5}, PM₁₀ revised by relative humidity in Beijing City

定区域不同季节的相关方程；同时,相关研究的发展将有效提高我国利用卫星产品反演区域颗粒物污染技术.

3 结论

北京市呈现高浓度颗粒物污染,且气溶胶光学厚度较高. PM_{2.5}与PM₁₀年平均浓度超标分别为70%与65%(2016年拟执行环境空气质量二级标准). 细粒子PM_{2.5}所占PM₁₀比重较高,年均约为60%;秋冬季节高于春夏,秋冬季节燃烧排放对细粒子浓度比重上升贡献明显;气溶胶波长指数的季节变化特征也显示了相应气溶胶模式变化规律. 地面颗粒物浓度PM_{2.5}、PM₁₀与气溶胶光学厚度AOD存在显著线性相关,且相关方程及相关系数存在显著的季节性差异,全年及单一时段的PM_{2.5}、PM₁₀与

AOD相关函数不具备普适的季节代表性. 此外,通过湿度和混合层高度订正可有效提高PM_{2.5}、PM₁₀与AOD之间的相关性.

参考文献:

[1] King M D, Kaufman Y J, Tannre D, *et al.* Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, **80**(11): 2229-2259.

[2] 徐祥德. 城市化环境大气污染模型动力学问题[J]. 应用气象学报, 2002, **13**(S1): 1-12.

[3] Colville R N, Hutchinson E J, Mindell J S, *et al.* The transport sector as a source of air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(9): 1537-1565.

[4] 徐祥德,施晓辉,张胜军,等. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应[J]. 科学通报, 2005, **50**(22): 2522-2530.

[5] Wang K, Dickinson R E, Liang S. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007[J]. Science,

- 2009, **323**(5920): 1468-1470.
- [6] Fujii T, Hayashi S, Hogg J C, *et al.* Particulate matter induces cytokine expression in human bronchial epithelial cells [J]. American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology, 2001, **25**(3): 265-271.
- [7] Kocifaj M, Horvath H, Jovanović O, *et al.* Optical properties of urban aerosols in the region Bratislava-Vienna I. Methods and tests [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(11): 1922-1934.
- [8] Espinosa A J F, Rodriguez M T, De la Rosa F J B, *et al.* A chemical speciation of trace metals for fine urban particles [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(5): 773-780.
- [9] Marcazzan G M, Ceriani M, Valli G, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in Milan (Italy) using receptor modeling [J]. Science of the Total Environment, 2003, **317**(1-3): 137-147.
- [10] Dockery D W, Pope C A. Acute respiratory effects of particulate air pollution [J]. Annual Review of Public Health, 1994, **15**(1): 107-132.
- [11] Pillai P S, Babu S S, Moorthy K K, *et al.* A study of PM, PM₁₀ and PM_{2.5} concentration at a tropical coastal station [J]. Atmospheric Research, 2002, **61**(2): 149-167.
- [12] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(SI): 177-186.
- [13] Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W, *et al.* Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(16): 2495-2509.
- [14] Gupta P, Christopher S A, Box M A, *et al.* Multi year satellite remote sensing of particulate matter air quality over Sydney, Australia [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, **28**(20): 4483-4498.
- [15] Gupta P, Christopher S A, Wang J, *et al.* Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(30): 5880-5892.
- [16] Kumar N, Chu A, Foster A. An empirical relationship between PM_{2.5} and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(21): 4492-4503.
- [17] Gupta P, Christopher S A. Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, **8**(12): 3311-3324.
- [18] Liu Y, Franklin M, Kahn R, *et al.* Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM_{2.5} concentrations in the St. Louis area: a comparison between MISR and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **107**(1-2): 33-44.
- [19] Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, *et al.* Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(35): 6317-6325.
- [20] Ichoku C, Chu D A, Mattoo S, *et al.* A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products [J]. Geophysical Research Letters, 2002, **29**(12): 8006.
- [21] 徐殿斗, 淡默, 宋燕, 等. 北京大气气溶胶中有机碳及可萃取有机卤素污染物 [J]. 中国环境科学, 2005, **25**(Suppl. 1): 17-21.
- [22] 赵越, 潘钧, 张红远, 等. 北京地区大气中可吸入颗粒物的污染现状分析 [J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 67-69.
- [23] 李令军, 王英, 李金香. 北京清洁区大气颗粒物污染特征及长期变化趋势 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 329-323.
- [24] 王姣, 王效科, 张红星, 等. 北京市城区两个典型站点 PM_{2.5} 浓度和元素组成差异研究 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 74-80.
- [25] 王京丽, 刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探 [J]. 气象学报, 2006, **64**(2): 222-228.
- [26] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 PM_{2.5} 的成分特征及来源分析 [J]. 应用气象学报, 2007, **18**(5): 646-654.
- [27] Sun Y, Zhuang G, Wang Y, *et al.* The air-borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(35): 5991-6004.
- [28] Xu X D, Shi X H, Xie L, *et al.* Spatial character of the gaseous and particulate state compound correlation of urban atmospheric pollution in winter and summer [J]. Science in China Series D (Earth Sciences), 2005, **48**(Supp II): 64-79.
- [29] 车瑞俊, 刘大锰, 袁杨森. 北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, **24**(5): 557-563.
- [30] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 PM_{2.5} 浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP 的关系 [J]. 中国环境科学, 2002, **22**(6): 506-510.
- [31] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 PM_{2.5} 质量浓度的特征及其相关性 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, **27**(1): 10-16.
- [32] 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM₁₀ 监测方面的应用研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2009, **18**(2): 26-32.
- [33] Koelemeijer R B A, Homan C D, Matthijsen J. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(27): 5304-5315.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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