

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
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	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析

徐彬¹, 张泽锋^{1*}, 李艳伟¹, 秦鑫^{1,2}, 缪青¹, 沈艳¹

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110016)

摘要: 大气气溶胶的吸湿性对气溶胶粒子的谱分布、云凝结核形成、气候强迫、人体健康等均有重要的影响。利用吸湿性串联差分迁移率分析仪 (HTDMA) 在 2014 年 4 月 16 日 ~ 5 月 21 日对南京北郊的大气气溶胶吸湿特性进行观测。30 ~ 230 nm 气溶胶粒子在 90% 相对湿度下的吸湿增长观测结果表明, 气溶胶粒子的吸湿增长因子平均概率分布函数 (GF-PDF) 呈现明显的双峰分布, 即一个占主导地位的强吸湿模态, 和一个相对较小但仍很明显的弱吸湿模态。对吸湿性的日夜对比分析发现, 整体上白天的气溶胶粒子吸湿性大于夜间气溶胶粒子, 白天强吸湿模态的粒子数目比例高于夜间, 夜间气溶胶粒子的外混合程度更高。利用 HYSPLIT 模式对气溶胶来源分析结果表明, 观测期间南京北郊主要受到 3 类气团的影响。其中西北大陆气团背景下爱根核模态粒子在经过大陆的长距离输送过程后, 老化程度较高, 吸湿性也更强。而对于积聚模态粒子, 则为来自东方气团的粒子吸湿性更强, 强吸湿模态粒子数目比例也较高。局地气团背景下气溶胶粒子在各粒径段都具有较高的强吸湿比例。

关键词: 气溶胶; 吸湿性; 南京; HTDMA; 混合状态

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-1911-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.001

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring

XU Bin¹, ZHANG Ze-feng^{1*}, LI Yan-wei¹, QIN Xin^{1,2}, MIAO Qing¹, SHEN Yan¹

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Weather Modification Office in Liaoning Province, Shenyang 110016, China)

Abstract: The hygroscopic properties of submicron aerosol particles have significant effects on spectral distribution, CCN activation, climate forcing, human health and so on. A Hygroscopic Tandem Differential Mobility Analyzer (HTDMA) was utilized to analyze the hygroscopic properties of aerosol particles in the northern suburb of Nanjing during 16 April to 21 May, 2014. At relative humidity (RH) of 90%, for particles with dry diameters 30-230 nm, the probability distribution of GF (GF-PDF) shows a distinct bimodal pattern, with a dominant more-hygroscopic group and a smaller less-hygroscopic group. A contrast analysis between day and night suggests that, aerosol particles during day time have a stronger hygroscopicity and a higher number fraction of more-hygroscopic group than that at night overall. Aerosol particles during night have a higher degree of externally mixed state. Backward trajectory analysis using HYSPLIT mode reveals that, the sampling site is mainly affected by three air masses. For aiken nuclei, northwest continental air masses experience a longer aging process and have a stronger hygroscopicity. For condensation nuclei, east air masses have a stronger hygroscopicity and have a higher number fraction of more-hygroscopic group. Aerosol particles in local air masses have a high number fraction of more-hygroscopic group in the whole diameter range.

Key words: aerosol; hygroscopicity; Nanjing; HTDMA; mixing state

吸湿性是气溶胶形貌, 表面含水量对周围环境相对湿度变化的响应^[1,2]。大气气溶胶的吸湿性性质, 是联系气溶胶微物理、化学参数的桥梁和纽带, 更是气溶胶光学性质的决定性参数之一, 因此气溶胶吸湿性质在整个大气气溶胶科学研究中处于基础地位^[3]。气溶胶的吸湿增长可以影响气溶胶的辐射强迫^[4]、改变气溶胶生命时间^[5], 以及通过影响气溶胶在呼吸道内的沉积从而影响气溶胶的健康效应^[6]。气溶胶的吸湿性很大程度上决定了气溶胶在大气中的分布和输送情况, 并直接参与云雾成核过程从而影响到云雾的理化性质, 因而气溶胶的吸湿性受到了广泛关注。

对于气溶胶吸湿性的观测, 目前最常见的仪器为吸湿性串联差分迁移率分析仪 (HTDMA), 此外也有 HDMPs 以及串/并联浊度计等方式。HTDMA 不仅能测量不同相对湿度下不同粒径气溶胶的吸湿增长因子, 还能据此推断粒子的混合状态信息, 因此被广泛用于气溶胶吸湿增长的观测研究。在过去的二十多年间, 利用 HTDMA 对气溶胶吸湿增长因子已

收稿日期: 2014-10-26; 修订日期: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41275152, 41005071, 41030962); 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 徐彬 (1990 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气气溶胶, E-mail: scz_xb@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: 002150@nuist.edu.cn

经开展了一些观测工作,观测点包括城市相对污染地区,受人类影响相对较小的偏远大陆地区、海洋等,但多数集中于欧美日本等较发达地区^[7,8]。例如 Kitamori 等^[9]在日本札幌地区利用气溶胶吸湿性观测评估了气溶胶粒子水含量(AWC),通过液态水的体积与相对湿度的函数关系拟合给出一个吸湿性参数 k_{eff} , k_{eff} 的日变化呈现正午和夜间高,上午和晚上低的特征。Bezantakos 等^[10]在爱琴海地区使用 HTDMA 的气溶胶吸湿性观测显示气溶胶粒子的主要模态呈现内混合状态,并结合 cTof-AMS 的化学组分观测验证了气溶胶的吸湿性观测结果,通过闭合分析计算了气溶胶吸湿性参数 k_{mix} 的垂直廓线。对于 2008 年以前的 HTDMA 观测,Swietlicki 等^[11]给出了一个较为详细的综述,他在文章中归纳总结了城市气溶胶的一般构成,并将其划分为几乎不吸湿模态(nearly-hydrophobic)、弱吸湿模态(less-hygroscopic)和强吸湿模态(more-hygroscopic)三组。近年来中国的空气污染问题和雾霾现象的日益频发,中国的气溶胶研究越来越受到国内外科学家的关注,我国的多个地方已经先后使用 HTDMA 开展了短期的气溶胶吸湿性观测。例如 Massling 等^[12]在北京的气溶胶吸湿性观测表明,重度污染期间,北京地区的亚微米气溶胶粒子受周边工业地区老化的气溶胶影响很大。Ye 等^[13]在上海冬季的气溶胶吸湿性观测显示,爱根核与积聚核模态粒子的吸湿性与吸湿性粒子比例有很大差别。Liu 等^[14]使用 HH-TDMA 测量了华北地区高相对湿度下的气溶胶吸湿增长特性,发现不同吸湿性模态中的粒子数目比例有明显的日变化。Tan 等^[15]在广州珠三角地区的吸湿性观测显示,在空气污染期间,局地排放的气溶胶粒子倾向于外混合状态并且含有一定比例的弱吸湿性粒子。

正如 Swietlicki 等^[11]在其关于气溶胶粒子吸湿性综述中指出的,气溶胶吸湿性的观测在亚洲地区仍然开展较少,有必要继续加强。而且,迄今为止,在南京的气溶胶研究还只是处在化学成分和光学特性的层面上,缺乏对于气溶胶吸湿增长及其混合状态的观测研究。本研究通过应用 MSP 公司生产的 HTDMA 对南京北郊的大气气溶胶吸湿性进行观测和分析。

1 材料与方法

1.1 观测点和实验实施

观测点位于南京信息工程大学气象楼(N32.207°,E118.717°,图1中采样点)12楼,金属

管伸出窗外,头部加装防雨罩,伸入具有空调的实验室内。采样点东侧有南化和南钢集团公司,东北侧有扬子石化公司,附近有高速公路。



图1 观测点及周边地区

Fig. 1 Sampling sites and the surrounding areas

观测时间为2014年4月16日~5月21日,粒径设置为30、70、110、150、190、230 nm,每个粒径观测0.5 h, RH 设置为90%。

本研究中使用的常规气象数据(温度、气压、风速、风向、相对湿度、降水等)来自南京信息工程大学的中国气象局综合观测培训实习基地(南京)。

1.2 仪器和分析方法

HTDMA 测量系统主要是由两台差分分析仪串接并配合一组加湿器构成^[16,17],具体方法原理可以参考 Swietlicki 等关于 HTDMA 观测的研究综述^[11]。其主要运行流程是先用第一台差分迁移率分析仪(differential mobility analyzer, DMA)筛选单分散气溶胶,而后将单分散气溶胶加湿,使其吸湿增长后用第二个 DMA 和凝结核计数器(condensation particle counter, CPC)测量加湿后气溶胶的粒径谱分布。由于以 HTDMA 系统测量气溶胶吸湿性增长现象具有精度高响应快的特性,因此目前广泛应用于气溶胶吸湿性的相关研究中^[18,19]。本研究主要采用的仪器是 MSP 公司生产的 HTDMA 1500(用于选定发生粒子)以及 HTDMA 1040(用于加湿并测量吸湿后的谱分布)。

本研究利用 MSP 公司开发的 HTDMAfit 软件对观测结果进行拟合,采用了 TDMAfit 算法,吸湿增长因子的概率分布函数(GF-PDF)使用对数正态分布拟合。

2 结果与讨论

2.1 气象要素

图2给出了观测期间温、湿、风、压等气象要

素变化情况,观测期间天气过程没有明显的转变,气压较为稳定,平均气压1 010.85 hPa,温湿变化主要呈现出白天气温高、相对湿度低,而夜间则相反的日变化特征. 观测期间平均气温 18.9℃,平均相对

湿度 62.4%,风向主要以东南风和西风为主,平均风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速约为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 在 4 月 16、17、19、25、26 日,5 月 11 日有少量降水,最大降水量为 15.9 mm,其余均为多云或晴好天气.

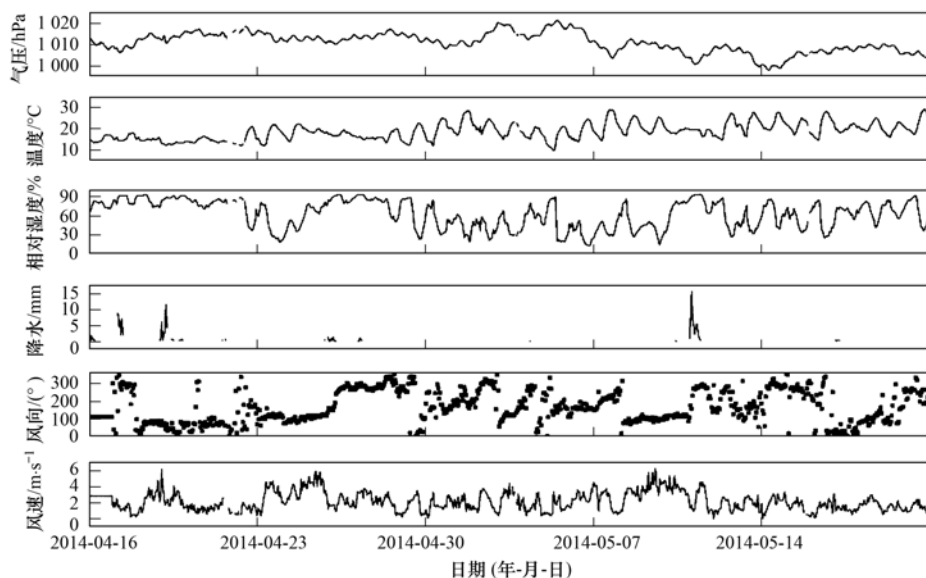


图 2 观测期间气象要素变化

Fig. 2 Temporal variations of meteorological elements during the observation period

2.2 观测期间气溶胶吸湿特征

每天的观测结果用软件拟合给出 3 个参数: Diameter GF 为正态分布中值(GF)、GSD 为正态分布半宽(sigma)、Penetration(fN)为峰的面积.

GF 为吸湿增长因子,定义为干粒子在特定的 RH 下吸湿的动力学粒径的相对增长率,公式如下:

$$GF(RH) = D_p(RH)/D_p(\text{dry}) \quad (1)$$

式中, $D_p(RH)$ 是在特定的 RH 下吸湿后的粒子的动力学直径, $D_p(\text{dry})$ 是被选择进入的干粒子的动力学直径.

对观测期间所有拟合参数进行平均后使用对数正态分布拟合,得到各粒径粒子的平均吸湿增长因子概率分布函数(GF-PDF),拟合公式为:

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

式中, μ 为 GF, σ 为 GSD,双峰时即为 $f1 \times NF1 + f2 \times NF2$, 其中 $NF1 = fN1/(fN1 + fN2)$, $NF2 = fN2/(fN1 + fN2)$, 可以分别表示双峰所含的粒子数目比例. 从平均 GF-PDF 看,不同粒径粒子加湿后的谱分布呈现双峰分布,即一个占主导地位的强吸湿模态和一个相对较小但仍很明显的弱吸湿模态(图 3). 说明南京北郊春季气溶胶粒子中同时含有较多的强吸湿颗粒和少部分弱吸湿颗粒. 而一般情况下

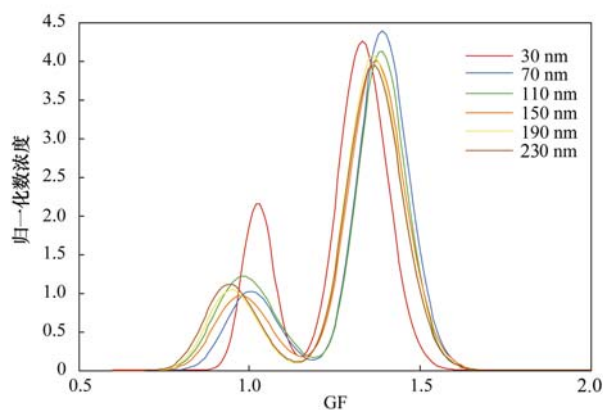


图 3 不同粒径粒子的平均吸湿增长因子概率分布函数(GF-PDF)

Fig. 3 Averaged probability distribution of growth factor (GF-PDF) for aerosol particles of different diameters

强吸湿颗粒多为吸湿性较强的无机盐(主要是硫酸盐和硝酸盐)组分较多的气溶胶颗粒,弱吸湿颗粒则主要为黑碳和不溶性有机物及其在大气中的初级老化产物^[11]. 从图 3 中还可以看到,30 nm 气溶胶粒子的弱吸湿模态峰值较其他粒径粒子更高,且强弱吸湿模态峰值更为接近,说明在 30 nm 小粒径段,气溶胶粒子的化学组分及混合状态可能与大粒径段气溶胶粒子有较大区别.

以 $c(g)$ 表示 GF-PDF,对其归一化后有:

$$\int c(g) dg = 1$$

(3)

式中, g 代表 GF. Gysel 等^[20] 给出等效粒径平均 GF (g_{mean} , 本研究用 GF_{mean} 表示) 来描述气溶胶粒子吸湿性:

$$g_{\text{mean}} = \int_0^\infty gc(g) dg$$

(4)

表 1 给出了观测期间各粒径气溶胶粒子吸湿性统计结果, 包括后面所要讨论的吸湿性日夜对比以及不同气团背景下的气溶胶吸湿性统计. 在 90% 相对湿度下, 各粒径段粒子平均吸湿增长因子 (GF_{mean}) 分别为: 1.26、1.32、1.29、1.30、1.29、1.28, 随着气溶胶粒子的粒径增大, GF_{mean} 变化不大, 气溶胶粒子的吸湿性没有明显增加. 弱吸湿模态吸

湿增长因子 (GF1) 随着粒径增大有略微减小的趋势. 已有的研究结论一般显示, 随着气溶胶粒子的粒径增大, 其吸湿性增强^[14,15]. 也有国外学者利用 H-DMPS/TDMPS、HTDMA 观测以及 MOUDI 化学组分计算 3 种不同方法研究气溶胶吸湿特性, 对比得出, 气溶胶吸湿增长因子最大值存在于积聚模范围内 (100 ~ 300 nm)^[21]. 气溶胶吸湿增长因子与气溶胶的化学组分有很大关系, 不同地区不同的气溶胶来源, 会导致气溶胶吸湿增长特性随粒径的变化情况有所不同. 由于燃煤排放和机动车排放, 南京北郊大气颗粒物中有机碳元素碳在细粒径段有明显的峰值^[22], 结果可能造成本文中大粒径部分弱吸湿性比例较高, 吸湿性降低.

表 1 观测期间各粒径气溶胶粒子吸湿性统计结果

Table 1 Summery of the measurements of hygroscopic growth for aerosol particles of different diameters during the observation period

项目			粒径/nm					
			30	70	110	150	190	230
观测所有	弱吸湿组	数目比例 (NF)	0.21	0.19	0.21	0.19	0.19	0.21
		吸湿增长因子 (GF)	1.03	1.01	0.99	0.98	0.95	0.95
	强吸湿组	数目比例 (NF)	0.79	0.81	0.79	0.81	0.81	0.79
		吸湿增长因子 (GF)	1.33	1.39	1.39	1.38	1.37	1.37
			平均 GF(GF_{mean})	1.26	1.32	1.29	1.30	1.29
		平均 σ	0.15	0.17	0.19	0.18	0.18	0.19
白天	弱吸湿组	数目比例 (NF)	0.07	0.14	0.15	0.18	0.15	0.20
		吸湿增长因子 (GF)	1.02	1.01	0.98	0.97	0.90	0.91
	强吸湿组	数目比例 (NF)	0.93	0.86	0.85	0.82	0.85	0.80
		吸湿增长因子 (GF)	1.35	1.39	1.38	1.33	1.32	1.32
			平均 GF(GF_{mean})	1.31	1.34	1.31	1.27	1.25
		平均 σ	0.13	0.16	0.17	0.16	0.17	0.19
夜间	弱吸湿组	数目比例 (NF)	0.30	0.27	0.27	0.22	0.23	0.23
		吸湿增长因子 (GF)	0.97	0.93	0.92	0.91	0.92	0.91
	强吸湿组	数目比例 (NF)	0.70	0.73	0.73	0.78	0.77	0.77
		吸湿增长因子 (GF)	1.24	1.30	1.30	1.31	1.35	1.34
			平均 GF(GF_{mean})	1.17	1.20	1.20	1.23	1.26
		平均 σ	0.14	0.18	0.18	0.18	0.20	0.20
气团 A	弱吸湿组	数目比例 (NF)	0.23	0.19	0.22	0.21	0.17	0.18
		吸湿增长因子 (GF)	1.02	1.01	0.10	0.98	0.92	0.92
	强吸湿组	数目比例 (NF)	0.77	0.81	0.78	0.79	0.83	0.82
		吸湿增长因子 (GF)	1.31	1.36	1.34	1.34	1.31	1.32
			平均 GF(GF_{mean})	1.25	1.30	1.27	1.26	1.25
		平均 σ	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17
气团 B	弱吸湿组	数目比例 (NF)	0.29	0.20	0.27	0.22	0.24	0.31
		吸湿增长因子 (GF)	1.03	1.01	0.97	0.95	0.97	0.97
	强吸湿组	数目比例 (NF)	0.71	0.80	0.73	0.78	0.76	0.69
		吸湿增长因子 (GF)	1.35	1.44	1.40	1.43	1.41	1.39
			平均 GF(GF_{mean})	1.26	1.35	1.29	1.33	1.31
		平均 σ	0.16	0.19	0.21	0.22	0.22	0.22
气团 C	弱吸湿组	数目比例 (NF)	0.32	0.18	0.38	0.18	0.18	0.17
		吸湿增长因子 (GF)	1.06	1.04	1.03	1.03	0.99	0.98
	强吸湿组	数目比例 (NF)	0.68	0.82	0.62	0.82	0.82	0.83
		吸湿增长因子 (GF)	1.31	1.39	1.39	1.41	1.38	1.39
			平均 GF(GF_{mean})	1.23	1.33	1.25	1.35	1.31
		平均 σ	0.12	0.14	0.18	0.16	0.16	0.16

2.3 日夜对比

对 5 月 5 日~5 月 21 日的观测数据,进行了日夜观测对比分析(以 18:00 为界,18:00 之前为白天,18:00 以后为夜间),图 4 给出了不同粒径粒子的 GF 值白天和夜间的观测结果,各粒径段粒子(除 190 nm)白天 GF_{mean} 均大于夜间 GF_{mean} ,强吸湿模态粒子吸湿增长因子 GF2 与弱吸湿模态粒子吸湿增长因子 GF1 在 30~150 nm 白天大于夜间,150 nm 以上白天小于夜间,且均小于纯硫酸铵粒子吸湿性. 说明白天的气溶胶粒子吸湿性大于夜间气溶胶粒子吸湿性. 结论与 Liu 等^[14]的研究结果相似,他认为白天粒子的平均吸湿性由于几乎不吸湿粒子比例的下降而有所增强.

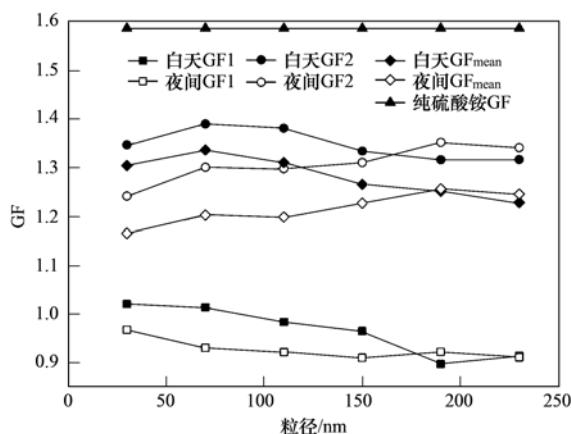


图 4 不同粒径粒子 GF 值日夜对比

Fig. 4 Comparisons of GFs for aerosol particles of different diameters during daytime and nighttime

图 5 给出了白天和夜间不同粒径段强吸湿模态粒子数占总气溶胶粒子数的百分比,结果表明白天强吸湿模态粒子数的百分比在各粒径段均高于夜间,显示了气溶胶粒子化学成分和混合状态的昼夜变化. 推测夜间可能有新鲜排放的弱吸湿粒子在近地面层累积(如新鲜黑碳或一次有机碳)^[23,24],白天弱吸湿粒子比例下降,可能是由于白天边界层升高,上层老化的气溶胶被夹卷到地面,在近地面层占主导^[14]. 此外,白天的光化学反应也可能加速气溶胶老化^[25],导致气溶胶吸湿性增强.

用 σ 表示 GF-PDF 的离散度,可以解释气溶胶粒子的混合状态^[14,15,26]. σ 通常与外混合状态和气溶胶粒子的化学异质性相联系^[27]:

$$\sigma = \left[\int_0^\infty (g - g_{mean})^2 c(g) dg \right]^{1/2} \quad (5)$$

一般认为 σ 较大的观测数据表明气溶胶粒子处于高度外混合状态,而 σ 较小则表明外混合程度

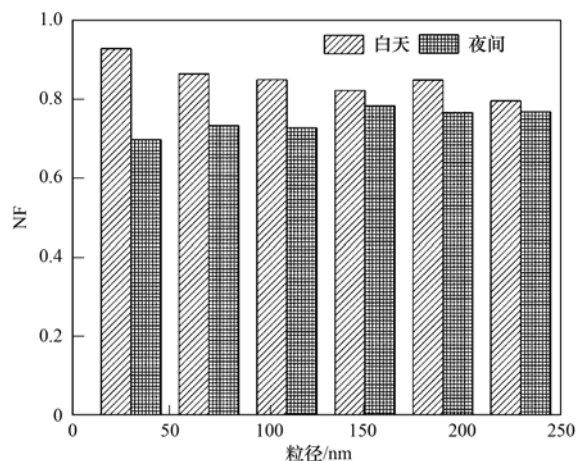


图 5 不同粒径粒子强吸湿模态分别在白天与夜间的粒子数目比例

Fig. 5 Number fractions of more-hygroscopic group aerosol particles of different diameters during daytime and nighttime

较低,或者处于准内混合状态^[14]. 图 6 给出了白天与夜间不同粒径粒子 GF-PDF 的离散度(σ)对比,从中可以看出,30~230 nm 各粒径段粒子白天 σ 均小于夜间,说明夜间气溶胶粒子的外混合程度更高. 这与过去的研究结果相一致:夜间的气溶胶处于明显的外混合状态,而白天气溶胶外混合程度有显著降低^[14,15]. Liu 等^[14]使用 PartMC-MOSAIC 模式对气溶胶吸湿性和混合状态的日变化特征进行了模拟,模拟中考虑了粒子碰并过程、气粒转化过程和混合层的作用,结果表明混合层的演变可以很大程度上解释气溶胶吸湿性和混合状态的日变化,即夜间浅的稳定边界层有利于新鲜排放的含碳粒子在地面附近堆积,而早晨混合层发展,湍流将上空老化的吸湿的粒子带到地面,会造成地面的不吸湿粒子比例下降. 从 σ 的粒径分布看,无论白天还是夜间, σ

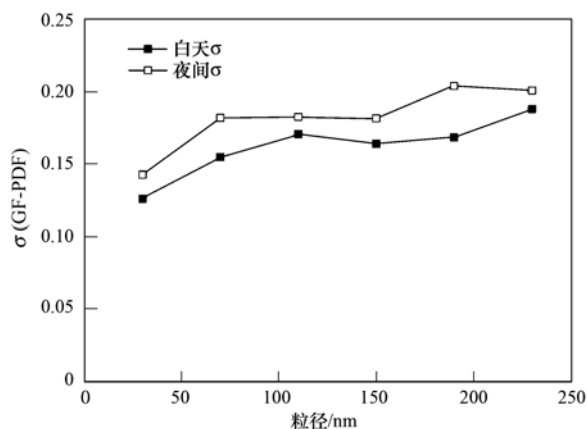


图 6 不同粒径粒子 GF-PDF 的离散度(σ)日夜对比

Fig. 6 The σ of GF-PDF for aerosol particles of different diameters during daytime and nighttime

都呈现随粒径增大而增大的特征,说明粒径越大的粒子更趋向于外混合状态。

2.4 结合 HYSPLIT 模式对不同气团背景的气溶胶吸湿性分析

利用 HYSPLIT 模式对观测期间影响观测点的气团作后向轨迹聚类分析,将 4 月影响南京北郊观测点的气团分为 4 类[图 7(a)]:1(A)局地气团,占 29%;2(B)东方气团,占 45%;3(C)东南气团,占 16%;4(D)东北大陆气团,占 10%。将 5 月影响南京北郊观测点的气团分为 3 类[图 7(b)],1(A):局地气团,占 44%;2(B):西北大陆气团,占 25%;3(C)东方气团,占 31%。为了比较不同气团背景下气溶胶粒子的吸湿性特征,分别统计了不同气团背景下强弱吸湿模态粒子的吸湿增长因子及其粒子数的百分比。由于 4 月 AC 气团与 5 月 AC 气团轨迹来源相似,传输路径近,受局地影响较大,故统一归类为局地气团,4 月 D 气团由于对应的 HTDMA 数据缺失,不作分析。因此,将影响南京北郊的气团分为 3 类:(A)局地气团,(B)西北大陆气团,(C)东方气团。

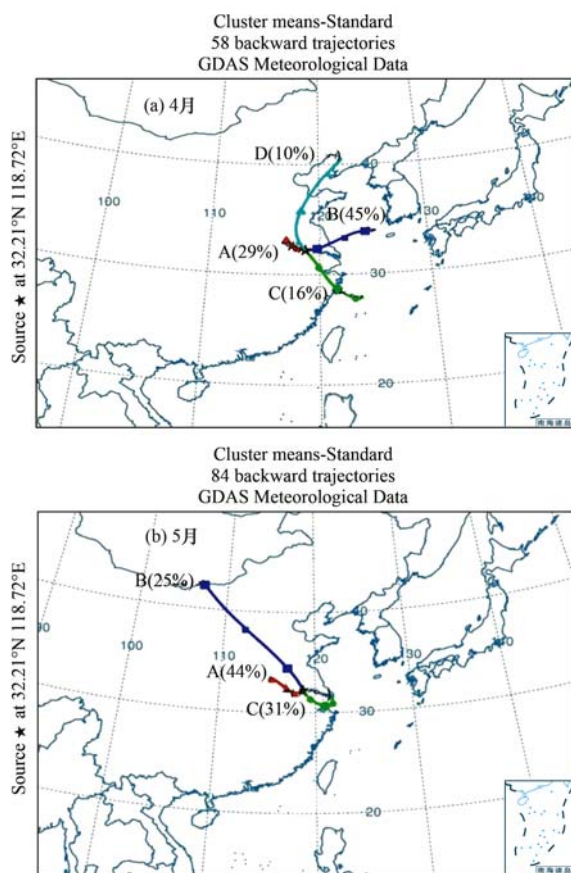


图 7 观测点 4、5 月气团轨迹聚类分析

Fig. 7 Clustering analysis of air mass trajectories affected the observation site in April and May

图 8 显示了不同气团背景下各粒径粒子吸湿增长因子 GF1、GF2,可以看出对于各粒径粒子的强吸湿模态吸湿增长因子 GF2,呈现出西北大陆气团 > 东方气团 > 局地气团的特征。对于弱吸湿模态吸湿增长因子 GF1,则为东方气团背景下的值更高。从平均吸湿增长因子看(图 9),对于 110 nm 以下(爱根核模态)气溶胶粒子,来自西北大陆气团的粒子吸湿性更强,可能是由于该气团小粒径粒子在经过西北大陆的长距离输送过程后,老化程度较高,吸湿性也更强。而对于 110 nm 以上(积聚模态)大粒径段粒子,则为来自东方气团的粒子吸湿性更强。

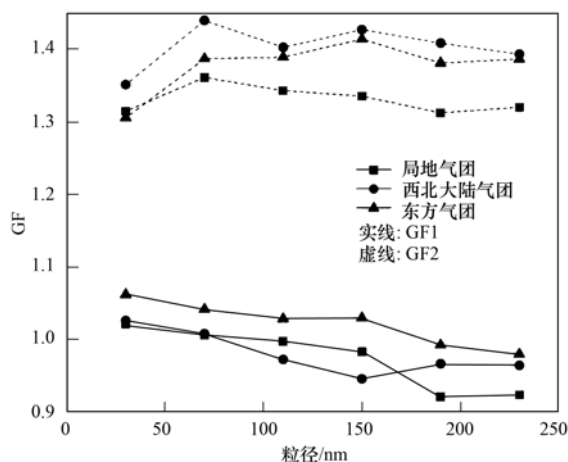


图 8 不同气团背景下各粒径粒子吸湿增长因子 GF1、GF2

Fig. 8 GF1 and GF2 for aerosol particles of different diameters in different air masses

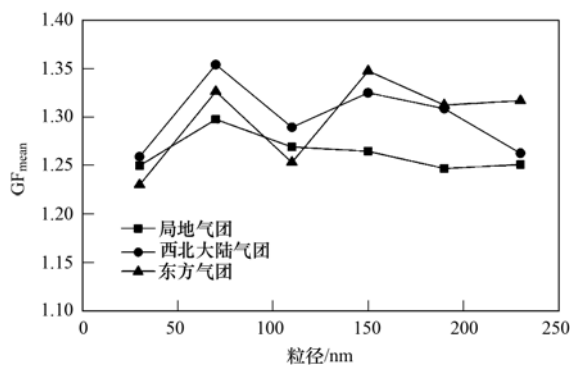


图 9 不同气团背景下各粒径粒子平均吸湿增长因子 GF_{mean}

Fig. 9 Averaged growth factor (GF_{mean}) for aerosol particles of different diameters in different air masses

从各粒径段粒子的强吸湿模态粒子数目比例看(表 1),局地气团背景下气溶胶粒子在各粒径段都具有较高的强吸湿比例。在 110 nm 以上大粒径段,来自东方气团的气溶胶粒子强吸湿比例也较高。从粒径分布看,强弱吸湿模态粒子数目比例随粒径没

有明显的变化。

3 结论

(1) 春季南京北郊不同粒径气溶胶粒子的吸湿增长因子平均概率分布函数(GF-PDF)为双峰分布, 由一个占主导地位的强吸湿模态和一个相对较小但仍很明显的弱吸湿模态组成, 说明南京北郊春季气溶胶粒子中同时含有较多的强吸湿颗粒和少部分弱吸湿颗粒。在 90% 相对湿度下, 30 ~ 230 nm 各粒径段粒子平均吸湿增长因子分别为: 1.26、1.32、1.29、1.30、1.29、1.28, 随着气溶胶粒子的粒径增大, 气溶胶吸湿性变化不大。

(2) 对吸湿性的日夜对比分析发现, 整体上白天的气溶胶粒子吸湿性大于夜间气溶胶粒子吸湿性, 可能原因: 夜间有新鲜排放的黑碳等弱吸湿粒子, 并在近地面层累积, 白天边界层升高, 上层老化的气溶胶被夹卷到地面, 在近地面层占主导。此外, 白天的光化学反应也可能加速气溶胶老化, 导致气溶胶吸湿性增强。混合状态的日夜对比显示, 夜间气溶胶粒子的外混合程度更高, 且粒径越大的粒子更趋向于外混合状态。

(3) 结合 HYSPLIT 模式对不同气团背景的气溶胶吸湿性分析, 共将影响南京北郊的气团分为 3 类, 结果显示西北大陆气团背景下爱根核膜态粒子在经过大陆的长距离输送过程后, 老化程度较高, 吸湿性也更强。而对于积聚模态粒子, 则为来自东方气团的粒子吸湿性更强, 强吸湿模态粒子数目比例也较高。局地气团背景下气溶胶粒子在各粒径段都具有较高的强吸湿比例。

参考文献:

[1] Gasparini R, Li R J, Collins D R. Integration of size distributions and size-resolved hygroscopicity measured during the Houston Supersite for compositional categorization of the aerosol [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(20): 3285-3303.

[2] Liu B Y H, Pui D Y H, Whitby K T, *et al.* The aerosol mobility chromatograph: a new detector for sulfuric acid aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1978, **12**(1): 99-104.

[3] 刘新罡, 张远航. 大气气溶胶吸湿性质国内外研究进展[J]. *气候与环境研究*, 2010, **15**(6): 806-816.

[4] Cheng Y F, Wiedensohler A, Eichler H, *et al.* Relative humidity dependence of aerosol optical properties and direct radiative forcing in the surface boundary layer at Xinken in Pearl River Delta of China: An observation based numerical study[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6373-6397.

[5] Kreidenweis S M, Remer L A, Brientjes R, *et al.* Smoke aerosol from biomass burning in Mexico: Hygroscopic smoke optical model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*

(1984-2012), 2001, **106**(D5): 4831-4844.

[6] Löndahl J, Pagels J, Boman C, *et al.* Deposition of biomass combustion aerosol particles in the human respiratory tract [J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, **20**(10): 923-933.

[7] McMurry P H, Stolzenburg M R. On the sensitivity of particle size to relative humidity for Los Angeles aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(2): 497-507.

[8] Massling A, Stock M, Wiedensohler A. Diurnal, weekly, and seasonal variation of hygroscopic properties of submicrometer urban aerosol particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3911-3922.

[9] Kitamori Y, Mochida M, Kawamura K. Assessment of the aerosol water content in urban atmospheric particles by the hygroscopic growth measurements in Sapporo, Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(21): 3416-3423.

[10] Bezantakos S, Barmounis K, Giamarelou M, *et al.* Chemical composition and hygroscopic properties of aerosol particles over the Aegean Sea [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(22): 11595-11608.

[11] Swietlicki E, Hansson H C, Hämeri K, *et al.* Hygroscopic properties of submicrometer atmospheric aerosol particles measured with H-TDMA instruments in various environments-A review [J]. *Tellus B*, 2008, **60**(3): 432-469.

[12] Massling A, Stock M, Wehner B, *et al.* Size segregated water uptake of the urban submicrometer aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(8): 1578-1589.

[13] Ye X N, Ma Z, Hu D W, *et al.* Size-resolved hygroscopicity of submicrometer urban aerosols in Shanghai during wintertime [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **99**(2): 353-364.

[14] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(7): 3479-3494.

[15] Tan H, Yin Y, Gu X, *et al.* An observational study of the hygroscopic properties of aerosols over the Pearl River Delta region [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 817-826.

[16] Rader D J, McMurry P H. Application of the tandem differential mobility analyzer to studies of droplet growth or evaporation [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1986, **17**(5): 771-787.

[17] Grace Lee W M, Chen C Y, Huang S L, *et al.* The deliquescent growth of inorganic-salt aerosols observed by a combined system of TDMA and integrated nephelometer [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1996, **27**(S1): 313-324.

[18] Pitchford M L, McMurry P H. Relationship between measured water vapor growth and chemistry of atmospheric aerosol for Grand Canyon, Arizona, in winter 1990 [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(5): 827-839.

[19] Weingartner E, Gysel M, Baltensperger U. Hygroscopicity of aerosol particles at low temperatures. 1. New low-temperature H-TDMA instrument: Setup and first applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(1): 55-62.

[20] Gysel M, Mcfiggans G B, Coe H. Inversion of tandem differential

- mobility analyser (TDMA) measurements[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2009, **40**(2): 134-151.
- [21] Meier J, Wehner B, Massling A, *et al.* Hygroscopic growth of urban aerosol particles in Beijing (China) during wintertime; a comparison of three experimental methods [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(18): 6865-6880.
- [22] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 451-457.
- [23] Zhang R Y, Khalizov A F, Pagels J, *et al.* Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(30): 10291-10296.
- [24] Petters M D, Prenni A J, Kreidenweis S M, *et al.* Chemical aging and the hydrophobic-to-hydrophilic conversion of carbonaceous aerosol[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(24): L24806.
- [25] Swietlicki E, Zhou J, Berg O H, *et al.* A closure study of sub-micrometer aerosol particle hygroscopic behaviour [J]. *Atmospheric Research*, 1999, **50**(3): 205-240.
- [26] Sjogren S, Gysel M, Weingartner E, *et al.* Hygroscopicity of the submicrometer aerosol at the high-alpine site Jungfraujoch, 3580 m a. s. l, Switzerland[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(18): 5715-5729.
- [27] Rose D, Nowak A, Achtert P, *et al.* Cloud condensation nuclei in polluted air and biomass burning smoke near the mega-city Guangzhou, China-Part 1: Size-resolved measurements and implications for the modeling of aerosol particle hygroscopicity and CCN activity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**: 3365-3383.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行