

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO ₂ 的来源	刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)
广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映	廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性	于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)
白马泉风景区夏季大气 PM _{2.5} 中二次有机物的初步研究	代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性	乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究	王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨	薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价	郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析	黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究	崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)
春季盘溪水质日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究	肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价	郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究	徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验	王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征	李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性	李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析	张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价	敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价	刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算	姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析	赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究	潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征	邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究	田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)
新生态铁的混凝作用探索	杨雪, 张景成, 关小红 (1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究	岳婵媛, 缪恒锋, 任洪艳, 阮文权 (1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究	王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究	秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯玺 (1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物	张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)
掺氮 Ta ₂ O ₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究	赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)
O ₃ /H ₂ O ₂ 降解水中扑灭通效能研究	李绍峰, 孙楚 (1260)
Pr-N 共掺杂 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学	沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究	张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)
聚合铝铁对 A ² /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响	温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响	张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响	李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究	王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析	李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌	王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究	于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究	陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)
氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究	王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响	孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响	王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C连续标记法	聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析	王坚, 张旭, 李广贺 (1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究	孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究	黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响	马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究	袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式	兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化	方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析	杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)	

北京雾霾天气期间气溶胶光学特性

于兴娜^{1,5}, 李新妹², 登增然登³, 德庆央宗⁴, 袁帅⁵

(1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2. 中国民用航空呼伦贝尔空中交通管理站, 呼伦贝尔 021008; 3. 西藏自治区日喀则地区拉孜县气象局, 拉孜 858100; 4. 西藏自治区林芝地区察隅县气象局, 察隅 806600; 5. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

摘要: 为了解北京地区雾霾天气条件下大气气溶胶的光学特性, 利用2002~2008年AERONET资料分析了雾霾天气期间气溶胶光学厚度、Angstrom波长指数、粒子尺度谱分布和单次散射反照率等气溶胶光学特性参数。结果表明, 北京地区雾霾天气期间气溶胶光学厚度表现出较高值, 且随波长增大而减小, 440 nm时平均气溶胶光学厚度达到1.34。Angstrom波长指数在雾霾天气时也表现出较高值, 平均值达到1.11; 其中高于0.9的波长指数出现频率达到94%, 说明北京雾霾天气期间气溶胶粒子主要以细粒子为主。气溶胶体积尺度谱分布表现出双峰型结构, 细模态的平均峰值半径随光学厚度增大而增大, 而粗模态的平均峰值半径却随光学厚度增大表现出减小趋势; 气溶胶粒子尺度谱中的主模态峰与光学厚度有关。雾霾天气期间平均单次散射反照率达到0.89, 且随光学厚度增大表现出依次增大趋势, 但对波长变化表现不敏感。

关键词: 北京; 雾; 霾; 气溶胶; 光学特性

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)04-1057-06

Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing

YU Xing-na^{1,5}, LI Xin-mei², DENG Zen-grandeng³, DE Qing-yangzong⁴, YUAN Shuai⁵

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Chinese Civil Aviation Hulunbuir Air Traffic Management Station, Hulunbuir 021008, China; 3. Meteorological Bureau of Lazi County, Xigaze City, The Tibet Autonomous Region, Lazi 858100, China; 4. Meteorological Bureau of Chayu County, Linzhi City, The Tibet Autonomous Region, Chayu 806600, China; 5. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The purpose of this study is to investigate the optical properties of aerosol during haze-fog episodes in Beijing. The aerosol optical depth (AOD), Angstrom exponent (α), size distribution and single scattering albedo (ω) during haze-fog episodes were analyzed between 2002 and 2008 using AERONET data. During haze-fog episodes, the aerosol optical depth showed a decreasing trend with wavelengths, and showed high values with an average 1.34 at 440 nm. The magnitude of Angstrom exponent was relatively high during haze-fog episodes and the mean values reached 1.11. The frequency distribution of α was up to 94% when $\alpha > 0.9$, indicating the predominance of fine particles during haze-fog episodes in Beijing. The aerosol volume size distributions presented a bimodal structure (fine and coarse modes). The maxima (peaks) radius of fine mode showed an increasing trend with AOD, however, those of coarse mode showed a decreasing trend with AOD. The size distribution showed a distinct difference in dominant mode for the different AOD. The single scattering albedo showed an increasing trend with AOD during haze-fog episodes in Beijing. The mean value of ω was 0.89 at the four wavelengths and the ω exhibited a low sensitivity to wavelengths.

Key words: Beijing; fog; haze; aerosol; optical property

雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或者冰晶组成的水汽凝结物, 发生雾时空气中水汽达到(或接近)饱和(一般相对湿度 $>90\%$); 霾是指悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体, 使空气混浊, 水平能见度降低到10 km以下的一种天气现象, 一般相对湿度 $<80\%$ 。雾、霾天气不仅会导致能见度降低, 严重影响正常的工农业活动和交通运输^[1], 更严重的是雾、霾发生时, 空气中的细颗粒物浓度急剧增加, 极易形成二次气溶胶, 其携带的有毒有害成分对人类健康造成极大威胁^[2,3]。

许多学者对城市雾、霾的气候特征、微物理特

征及其理化特性等方面进行了较多研究^[2~12], 但对雾、霾天气下气溶胶光学性质的研究还比较少见。最近, 盛立芳等^[13]观测到一次海雾过程中的消光系数为 1.21 km^{-1} , 其中以 $>0.5 \mu\text{m}$ 粒子的消光作用为主。颜鹏等^[14]发现受雾霾天气影响, 北京

收稿日期: 2011-06-30; 修订日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41005089); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20103228120004); 江苏省高校自然科学基金项目(10KJB170009); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)2007-6-36); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 于兴娜(1979~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气环境, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

上甸子大气本底污染监测站观测到了较高的气溶胶散射系数和吸收系数,单次散射反照率也明显高于非雾霾时段. 徐政等^[15]报道了济南秋季霾天气时的散射系数与吸收系数均比非霾天气高近3倍,单次散射反照率同样高于非霾天气,气溶胶光学厚度在霾期间达到了1.14. 闵敏等^[16]利用太阳光度计观测河北香河在灰霾暴发期间气溶胶光学厚度由平日的0.31增长到1.40(380 nm),Angstrom指数由1.45下降到0.99. 由于特殊地理位置和气象条件,北京时常出现雾、霾天气,但有关对北京市雾、霾天气时大气气溶胶光学厚度、粒子尺度谱分布及单次散射反照率等光学性质的认识还非常缺乏. 由于雾天气过程常伴有霾影响并可相互转换^[7],而目前得到的资料还不能准确区分雾、霾出现时段,故统用“雾霾天气”来描述. 本研究分析了北京市雾霾天气条件下气溶胶的光学性质,从而为进一步了解北京地区大气气溶胶的特点及其区域环境、气候效应提供依据.

1 观测站点和数据资料

北京位于华北平原的西北边缘,背靠太行山余脉和燕山山脉. 气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,其主要特点是四季分明. 春季多风,夏季炎热多雨,秋季晴朗温和,冬季寒冷干燥,春季受到塔克拉玛干沙漠以及浑善达克和毛乌素等沙地的影响,偶尔会出现沙尘天气. 本研究中的观测点设于中国科学院大气物理研究所楼顶(39.977°N,116.38°E),海拔约92 m,周围主要以交通污染为主.

本研究中的数据来自 Aerosol Robotic Network

(AERONET)观测网站. AERONET 是美国国家航空宇航局(NASA)组建的全球地基观测气溶胶、自动化程度较高的网络系统. 观测所用仪器是法国CIMEL公司制造的CE318型太阳-天空扫描光谱辐射计,该仪器在气溶胶光学特性的观测中应用非常广泛,并取得了许多成果^[17~19]. 该仪器的工作波长为340、380、440、500、675、870、940、1 020 nm,其中940 nm用来反演大气柱水汽含量,所有通道带宽为10 nm. 仪器的视场角为1.2°,太阳跟踪精度为0.1,关于详细的仪器介绍及标定参见文献[20]. 由各通道太阳直射辐射测值,采用统一的反演算法^[21],可以计算无云情况下的大气气溶胶的光学特性和粒子的粒径分布情况,其中光学特性包括大气气溶胶光学厚度、单次散射反照率、不对称因子和Angstrom波长指数等重要参数. 这些参数都是计算气溶胶的辐射强迫所必须的输入参数. 目前,气溶胶自动观测网络AERONET在全球陆地和海洋上分布着400多个观测站点,是当前世界上正在业务运行的大型气溶胶观测网络之一,其设备定标、数据传输、数据分级和质量保证等都形成了统一的规范,其反演结果已被全球科学工作者所使用^[22,23]. AERONET提供3个质量等级的产品:Level 1.0是未做去云处理的原始数据;Level 1.5数据是仅做去云处理的数据;Level 2.0数据是经过去云处理及人工检查保证质量的数据. 本研究采用的数据资料均为Level 2.0的气溶胶反演产品. 雾霾天气的选取是建立在地面天气报告和卫星图片的基础上并通过媒体报道以及已发表文章中的信息来验证,具体选取的日期见表1.

表1 北京雾霾发生期间选取的日期
Table 1 Selected haze-fog dates in Beijing

年份	1月	3月	4月	5月	6月	7月	9月	10月	11月	12月
2002						6~9日	7日和8日			
2003	1日	1日和30日								
2004			10日					5~9日	30日	1日和15日
2005					20~22日				4日和6日	
2006	14日,15日, 18日,19日, 21~27日									10日和11日
2007								25日	7日	
2008			9日,14日和15日	24日和25日						

2 结果与分析

2.1 气溶胶光学厚度与 Angstrom 波长指数

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth,AOD)是

衡量气溶胶粒子对太阳辐射衰减强弱能力的一个重要参数,能够反映整个大气柱的气溶胶含量,是评价大气污染的一个关键指标. 一般来讲,AOD值越小,大气越清洁;反之,AOD越大,大气越浑浊. 图1为

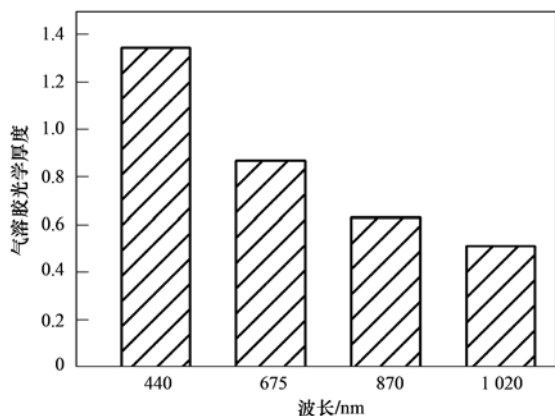


图1 北京雾霾天气期间气溶胶光学厚度随波长的变化

Fig. 1 Aerosol optical depth with wavelengths during haze-fog episodes in Beijing

北京雾霾天气期间气溶胶光学厚度随波长的变化情况. 从中可以看出, 雾霾天气条件下气溶胶光学厚度随波长增大而减小, 说明污染事件期间气溶胶粒子对太阳光的衰减具有波长选择性. 在波长 440 nm 时平均气溶胶光学厚度达到 1.34, 高于 2002 ~ 2007 年北京夏季最大季节平均 AOD (0.98) [24], 比 2008 年北京奥运会期间的 AOD (0.43, 550 nm) 高出 2 倍多 [25], 这主要是由于雾霾天气发生时稳定的天气形势十分有利于颗粒物积累, 从而造成高浓度气溶胶污染事件 [14].

Angstrom 波长指数 (α) 是衡量气溶胶粒子大小的一个重要光学参数, 其值越大, 说明粒子越小, 反之亦然. 对于分子而言, α 最大可达到 4; 而粗粒子或超粗粒子的 α 可以低至零甚至为负值. 图 2 给出了北京地区雾霾天气下 Angstrom 波长指数 (440 ~ 870 nm) 与气溶胶光学厚度 (440 nm) 之间的关系. AOD > 1.6 的高气溶胶光学厚度出现频率约为

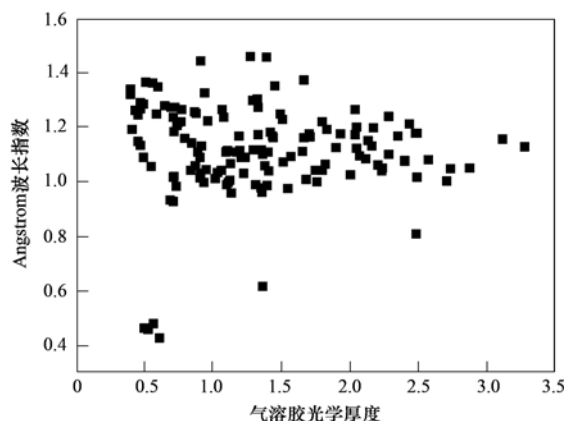


图2 北京地区雾霾天气下 Angstrom 波长指数 (440 ~ 870 nm) 与光学厚度 (440 nm) 的关系

Fig. 2 Angstrom exponent (440-870 nm) as a function of AOD (440 nm) during haze-fog episodes in Beijing

从中可知, 北京雾霾天气下 Angstrom 波长指数通常表现出较高值, 波动范围在 0.43 ~ 1.46 之间. 当 AOD > 0.5 时, α 通常高于 0.9 并保持在 0.9 ~ 1.4 左右. AOD 和 α 的关系在雾霾天气与沙尘天气时不同 [26], 两者之间的关系很可能为识别和估计不同气溶胶源区对气溶胶含量和粒径的影响提供一种方法. 总体来讲, 北京雾霾天气时平均 Angstrom 波长指数可达到 1.11, 是春季黄土高原半干旱区的 2 倍多 (0.48) [27], 说明了沙尘源区以粗的沙尘粒子为主控粒子, 而雾霾天气时气溶胶主要以细的污染粒子为主.

图 3 给出了北京地区雾霾天气期间的气溶胶光学厚度 (440 nm) 和 Angstrom 波长指数 (440 ~ 870 nm) 的频率分布. 从中发现, 雾霾天气期间的气溶胶光学厚度有较宽分布, 约有 93% 的 AOD 分布在 0.4 ~ 2.6 之间; 而 70% 的 AOD 集中在 0.4 ~ 1.6 之间; 30% 的 Angstrom 波长指数的频率分布在 0.4 ~ 1.5 之

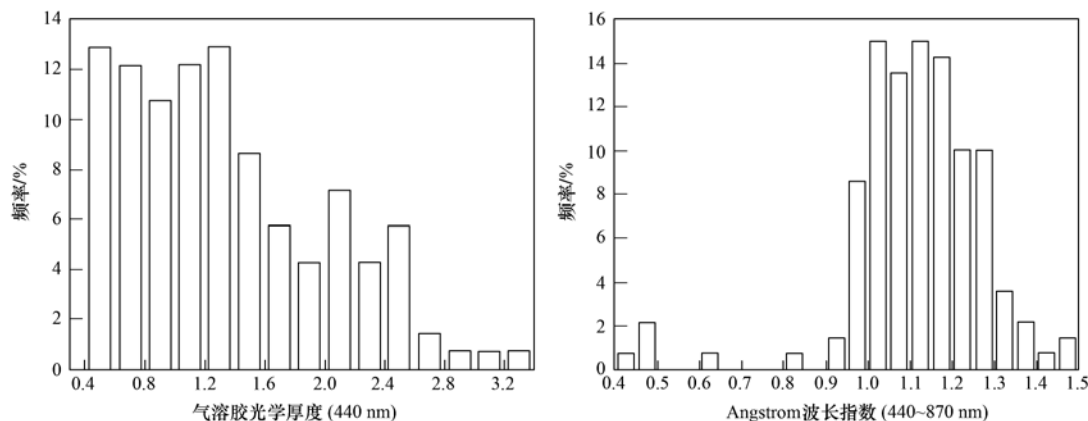


图3 北京地区雾霾天气期间的气溶胶光学厚度 (440 nm) 和 Angstrom 波长指数 (440 ~ 870 nm) 的频率分布

Fig. 3 Frequency distributions of AOD (440 nm) and Angstrom exponent (440-870 nm) during haze-fog episodes in Beijing

间,说明有不同类型的气溶胶存在. 约有 86% 的 α 集中在 0.95 ~ 1.3 之间, $\alpha > 0.9$ 的出现频率达到了 94%, 说明北京地区雾霾天气期间气溶胶粒子主要以细粒子为主.

2.2 气溶胶尺度谱分布

气溶胶粒子谱分布是计算气溶胶粒子辐射强迫和研究气溶胶气候效应的基本输入参数,不同类型的气溶胶具有不同的粒度分布特征. 图 4 给出了半径为 $0.05 \mu\text{m} \leq r \leq 15 \mu\text{m}$ 范围内的 22 个粒子尺度的气溶胶体积谱分布,从中可发现雾霾天气下气溶胶体积谱表现出明显的双峰分布,对每一个模态可由以下对数正态分布描述:

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{C_v}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(r/r_v)}{\sigma} \right)^2 \right]$$

式中, $dV/d \ln r$ 为体积尺度谱分布; C_v 为体积浓度; r 为粒子半径; r_v 为粒子的几何平均半径; σ 为标准偏差. 对于细模态来说,其平均峰值半径均随着 AOD 增大而增大,具体表现为:当 $\text{AOD} < 0.5$ 时,细粒子的平均峰值半径主要集中在 $0.11 \mu\text{m}$; 当 $0.5 < \text{AOD} < 2.5$ 时,半径增大到 $0.15 \sim 0.19 \mu\text{m}$ 左右;而 $\text{AOD} > 2.5$ 时,峰值半径上升到 $0.25 \mu\text{m}$ 左右,这可能是由于雾霾天气期间较高的相对湿度导致吸湿性粒子增长加剧的结果^[28]. 相反,随着 AOD 增大粗模态的平均峰值半径表现出减小趋势,如 $\text{AOD} < 1.0$ 时,粗模态的平均峰值半径主要集中在 $3.85 \mu\text{m}$ 左右;当 $1.0 < \text{AOD} < 2.0$ 时,峰值半径为 $2.94 \mu\text{m}$ 左右; $\text{AOD} < 2.5$ 时,峰值半径低至 $2.24 \mu\text{m}$. 另外,细模态气溶胶粒子的体积浓度也随着 AOD 增大而增高,其中 AOD 为 2.53 时的体积浓度是 0.52 时的 5.2 倍. 这主要是由于雾霾天气时稳定的天气系统造成大量污染物累积所致. 从图 4 中还可以看出,

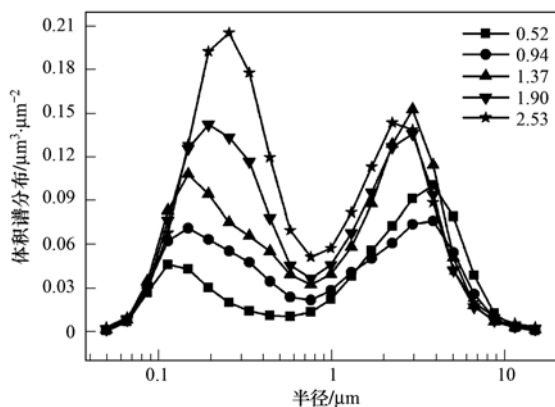


图 4 不同气溶胶光学厚度情况下气溶胶粒子的体积尺度谱分布

Fig. 4 Aerosol volume size distributions as a function of particle radius

当 $\text{AOD} > 2.0$ 时,细模态峰在气溶胶粒子尺度谱中为主模态峰,说明细粒子所占的比例较大;而 $\text{AOD} < 0.5$ 时,粗模态峰又为主模态峰,即粗粒子所占比例较大.

2.3 单次散射反照率

气溶胶粒子的单次散射反照率 (single scattering albedo, ω) 是反映气溶胶粒子总消光中散射所占比例的一个重要光学参数,是评估气溶胶气候效应的关键变量之一. 单次散射反照率的大小主要取决于气溶胶粒子的成分、形状、面积谱和浓度等因素. 图 5 为北京雾霾天气期间不同气溶胶光学厚度情况下平均单次散射反照率随波长的变化情况. 在任一光学厚度情况下,雾霾天气期间单次散射反照率随波长增大表现出先增大后减小趋势,在波长 675 nm 时的单次散射反照率达到最大,平均值为 0.91,表明雾霾天气时气溶胶粒子在这一波长下参与了更强烈的散射. 在波长 440 nm 时平均 ω 为 0.89,相似于 Mexico City^[29]、Kanpur (约为 0.90)^[30] 以及济南霾天气时的值 (0.88)^[15], 低于上甸子雾霾期间的平均 ω (0.95, 525 nm)^[13], 但高于北京市区 (0.81 和 0.79)^[31,32] 和广州的观测值 (0.83)^[33]. 雾霾天气期间 ω 增大主要与雾霾影响下气溶胶中散射性气溶胶及二次气溶胶 (如硫酸盐、硝酸盐) 含量增加有关^[14,15,34]. 同时,随着气溶胶光学厚度增大,单次散射反照率表现出依次增高的趋势. 如 AOD 为 0.52 时,4 个波段的平均 ω 为 0.87; AOD 为 0.94 时,平均 ω 为 0.88; AOD 为 1.37 ~ 2.53 时,平均 ω 达到 0.90 ~ 0.91.

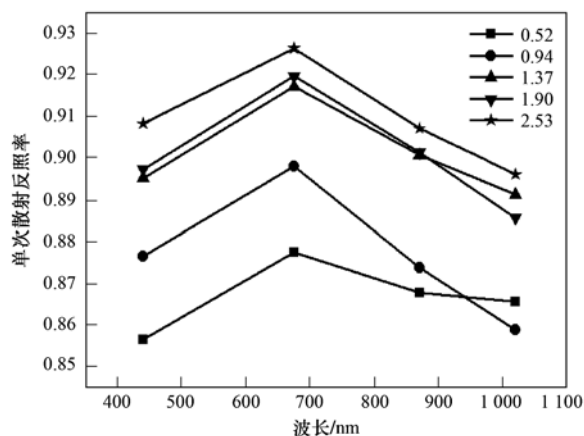


图 5 北京雾霾天气期间不同气溶胶光学厚度情况下单次散射反照率随波长的变化

Fig. 5 Single scattering albedo at 440, 675, 870 and 1 020 nm during haze-fog episodes in Beijing

3 结论

(1) 北京地区雾霾天气期间气溶胶光学厚度表现出较高值, 这主要是由于雾霾天气发生时稳定的天气形势非常有利于颗粒物积累, 从而造成的高浓度气溶胶污染事件所致. 雾霾天气下 Angstrom 波长指数也表现出较高值, 其主要范围分布在 0.43 ~ 1.46 之间; 当 AOD > 0.5 时, 波长指数通常 > 0.9. AOD 和 Angstrom 波长指数之间的关系很可能为识别和估计不同源区气溶胶特性提供一种方法.

(2) 北京地区雾霾天气条件下, 约有 93% 的 AOD 分布在 0.4 ~ 2.6 之间; 其中 70% 的 AOD 集中在 0.4 ~ 1.6 之间; 约有 86% 的 Angstrom 波长指数集中在 0.95 ~ 1.3 之间, 说明北京雾霾天气期间气溶胶粒子主要以细粒子为主.

(3) 气溶胶体积谱分布表现出明显的双峰型结构, 细模态的平均峰值半径随 AOD 增大而增大, 而粗模态的平均峰值半径随 AOD 增大而减小. AOD 的大小使得气溶胶粒子尺度谱中的主模态峰不同. 细模态的体积浓度也随 AOD 增大而增高, 如 AOD 为 2.53 时的体积浓度是 0.52 时的 5.2 倍.

(4) 北京地区雾霾天气条件下单次散射反照率随波长表现出先增大后减小趋势, 平均值达到 0.89, 并且随 AOD 增大, 单次散射反照率表现出依次增大趋势.

致谢: 感谢 Chen H. 和 Goloub P. 对于 AERONET 北京站的管理维护与资料共享.

参考文献:

- [1] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. 环境科学学报, 2003, **23**(4): 468-471.
- [2] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A A, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Haze-Fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [3] Kang C M, Lee H S, Kang B W, *et al.* Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(28): 4749-4760.
- [4] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析 [J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [5] 范新强, 孙照渤. 1953 ~ 2008 年厦门地区的灰霾天气特征 [J]. 大气科学学报, 2009, **32**(5): 604-609.
- [6] 魏建苏, 朱伟军, 严文莲, 等. 江苏沿海地区雾的气候特征及相关影响因子 [J]. 大气科学学报, 2010, **33**(6): 680-687.
- [7] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征 [J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1425-1431.
- [8] Niu S J, Lu C S, Liu Y G, *et al.* Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: a case study [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, **27**(6): 1259-1275.
- [9] 范雪波, 吴伟伟, 王广华, 等. 上海市灰霾天大气颗粒物浓度及富集元素的粒径分布 [J]. 科学通报, 2010, **55**(13): 1221-1226.
- [10] 时宗波, 贺克斌, 陈雁菊, 等. 雾过程对北京市大气颗粒物理化特征的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 551-556.
- [11] 段青春, 谭吉华, 盛国英, 等. 广州灰霾期间颗粒态 PAHs 的污染特征及来源 [J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1574-1579.
- [12] 樊曙先, 黄红丽, 樊韬, 等. 南京北郊雾天 PM₁₀ 中多环芳烃粒径分布特征 [J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2707-2714.
- [13] 盛立芳, 梁卫芳, 屈文军, 等. 海雾过程中大气气溶胶谱变化及消光作用 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2011, **41**(6): 1-8.
- [14] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性 [J]. 应用气象学报, 2010, **21**(3): 257-265.
- [15] 徐政, 李卫军, 于阳春, 等. 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测 [J]. 中国环境科学, 2011, **31**(4): 546-552.
- [16] 闵敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究 [J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(2): 153-160.
- [17] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性 [J]. 南京气象学院学报, 2004, **27**(5): 615-622.
- [18] 胡文超, 张文煜, 郭振海, 等. 甘肃半干旱区域城乡气溶胶光学特性的观测与分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2009, **45**(6): 46-50.
- [19] 黄建龙. 基于 CE-318 太阳光度计的南京仙林地区气溶胶光学厚度特性研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2009. 1-62.
- [20] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, **66**(1): 1-16.
- [21] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, **105**(D16): 20673-20696.
- [22] Dubovik O, Holben B, Eck T F, *et al.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, **59**(3): 590-608.
- [23] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, *et al.* Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**: D06202, doi: 10.1029/2004JD005274.
- [24] Yu X N, Zhu B, Zhang M G. Seasonal variability of aerosol optical properties over Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(26): 4095-4101.
- [25] 陈林, 石广玉, 秦世广, 等. 2008 年北京奥运会期间大气气溶胶物理特征分析 [J]. 气候与环境研究, 2008, **14**(6):

- 665-672.
- [26] Yu X N, Cheng T T, Chen J M, *et al.* A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (30): 5787-5797.
- [27] Yu X N, Zhu B, Fan S X, *et al.* Ground-based observation of aerosol optical properties in Lanzhou, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21** (11): 1519-1524.
- [28] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, *et al.* Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**: D06202, doi: 10.1029/2004JD005274.
- [29] Dubovik O, Holben B, Eck T F, *et al.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, **59** (3): 590-608.
- [30] Singh R P, Dey S, Tripathi S N, *et al.* Variability of aerosol parameters over Kanpur, northern India [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**: D23206, doi: 10.1029/2004JD004966.
- [31] Bergin M H, Cass G R, Xu J, *et al.* Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June, 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106** (D16): 17969-17980.
- [32] 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. *气象学报*, 2005, **63** (5): 622-635.
- [33] Andreae M O, Schmid O, Yang H, *et al.* Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (25): 6335-6350.
- [34] Yan P, Tang J, Huang J, *et al.* The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8** (8): 2229-2242.

欢迎订阅 2012 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2012 年为大 16 开本,70 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ ¹⁵ N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River	 CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period	 GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area	 WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta	 LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment	 WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow	WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《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)

2012年4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行