

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征

徐昶^{1,2}, 叶辉², 沈建东², 孙鸿良², 洪盛茂², 焦荔², 黄侃³

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310007; 3. 田纳西大学, 美国 TN37996)

摘要: 2011年7月~2012年6月期间, 对大气散射系数、颗粒物浓度及气象因子进行同步观测, 以评估颗粒物散射消光对杭州市大气能见度的影响。结果表明, 杭州市大气颗粒物散射系数日均值变化范围为 $108.4 \sim 1\,098.1 \text{ Mm}^{-1}$, 年均值为 $428.62 \text{ Mm}^{-1} \pm 200.2 \text{ Mm}^{-1}$ 。散射系数呈明显的季节变化, 秋冬高, 夏季低。日变化呈典型的双峰型, 早峰出现在 08:00, 晚峰出现在 21:00。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的散射效率分别为 $7.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 颗粒物散射消光占总消光比例的 90.2%。灰霾和重度灰霾天气下, 散射系数分别为 $684.4 \text{ Mm}^{-1} \pm 218.1 \text{ Mm}^{-1}$ 和 $1\,095.4 \text{ Mm}^{-1} \pm 397.7 \text{ Mm}^{-1}$, 达到非霾天气的 2.6 和 4.2 倍, 表明颗粒物散射消光作用是导致杭州市大气能见度下降和灰霾天气发生的主要因素。

关键词: 能见度; PM_{2.5}; 散射系数; 消光系数; 散射效率; 灰霾

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4422-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.002

Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou

XU Chang^{1,2}, YE Hui², SHEN Jian-dong², SUN Hong-liang², HONG Sheng-mao², JIAO Li², HUANG Kan³

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Hangzhou Environmental Monitoring Center Station, Hangzhou 310007, China; 3. The University of Tennessee, TN 37996, USA)

Abstract: In order to evaluate the influence of particle scattering on visibility, light scattering coefficient, particle concentrations and meteorological factor were simultaneously monitored from July 2011 to June 2012 in Hangzhou. Daily scattering coefficients ranged from 108.4 to 1 098.1 Mm⁻¹, with an annual average concentration of $428.6 \text{ Mm}^{-1} \pm 200.2 \text{ Mm}^{-1}$. Seasonal variation of scattering coefficients was significant, with the highest concentrations observed in autumn and winter and the lowest in summer. It was found there were two peaks for the average diurnal variations of the scattering coefficient, which could be observed at 08:00 and 21:00. The scattering efficiencies of PM_{2.5} and PM₁₀ were $7.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and $4.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. The particle scattering was about 90.2 percent of the total light extinction. The scattering coefficients were $684.4 \text{ Mm}^{-1} \pm 218.1 \text{ Mm}^{-1}$ and $1\,095.4 \text{ Mm}^{-1} \pm 397.7 \text{ Mm}^{-1}$ in hazy and heavy hazy days, respectively, which were 2.6 and 4.2 times as high as in non-hazy weather, indicating that particle scattering is the main factor for visibility degradation and the occurrence of hazy weather in Hangzhou.

Key words: visibility; PM_{2.5}; scattering coefficient; extinction coefficient; scattering efficiency; haze

大气污染已成为近年来杭州环境空气的突出问题, 其重要特征为细颗粒物污染的加剧和大气能见度的降低。2006~2008年, 杭州市PM_{2.5}的年平均浓度达到 $70 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[1], 是国家环境空气质量年二级标准 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 2 倍多^[2]。据杭州市气象局数据, 2003~2012年间, 杭州市能见度低于 10 km 的霾日数平均每年达到 159 d, 超过全年天数的 2/5。洪盛茂等^[3]研究发现, 20 世纪 80 年代, 杭州市大气年平均能见度在 10 km 左右, 至 2000~2006 年间则下降到 7 km 左右, 能见度的下降与 PM_{2.5} 等细颗粒物浓度的上升关系密切^[4, 5]。预防和控制大气细颗粒物污染, 改善大气能见度已经成为杭州目前大气污染治理中亟待解决的问题。

颗粒物的散射和吸收作用是影响大气能见度的主要因素, 通常散射消光作用又大于或远大于吸收消光作用^[6], 因此, 研究颗粒物散射作用能较好估

计大气颗粒物对总消光系数的贡献, 判断对大气能见度下降的影响。近年来国内对散射系数的研究逐渐增多, 陶俊等^[7]在广州城区研究发现散射系数与能见度呈强烈的负相关, 是影响能见度下降的重要因素。朱李华等^[8]和赵秀娟等^[9, 10]分别报道了北京城区和上甸子本底站霾天气下散射系数特征。岳建华等^[11]在成都报道了生物质燃烧和沙尘期间的散射系数特征。徐婷婷等^[12]和王苑等^[13]在上海分别对霾天气和沙尘天气下气溶胶后向散射系数进行研究。相比而言, 以往对杭州大气颗粒物的研究大多

收稿日期: 2014-04-17; 修订日期: 2014-08-07

基金项目: 浙江省环境保护科研计划项目(2012B004); 杭州市重大科技创新专项(20131813A03); 杭州市科技发展计划项目(20120433B03, 20130533B04); 杭州市环境保护科研计划项目(2012001)

作者简介: 徐昶(1983~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气化学, 污染源排放清单等, E-mail: xuchang1983@gmail.com

集中在颗粒物浓度和化学组分上^[14, 15], Xu 等^[16]在 1999 年秋季对杭州郊县的临安本底站的散射系数进行过短暂观测, 陈然等^[17]和肖钟湧等^[18]在 2006 ~ 2007 年间对杭州市区的气溶胶光学厚度进行过观测, 徐昶等^[19]在 2011 年世界无车日期间报道了杭州市颗粒物的散射消光系数, 但总体而言, 针对杭州市区较长时间范围内大气散射消光特性及霾天气下污染特征的研究仍较少. 本研究通过为期 1 a 的观测, 对杭州大气颗粒物散射消光特性及影响因子进行分析, 探讨了散射系数霾天气下的污染特征及对能见度下降的影响, 以期为更好地阐明杭州大气污染现状、开展防治工作提供依据及参考.

1 材料与方法

本研究监测地点位于杭州市朝晖国家环境空气自动监测站, 为商住交通混合区, 站点离地面垂直距离约 20 m, 周围无明显遮挡及排放源影响, 观测时间为 2011 年 7 月 1 日 ~ 2012 年 6 月 30 日. 研究期间, 采用澳大利亚 ECOTECH 公司的 Aurora-1000 型浊度仪观测颗粒物的散射消光系数 (b_{sp}), 测量波长为 525 nm, 时间分辨率为 5 min, 通过内部温湿度传感器控制内部加热系统, 维持内部相对湿度 (RH) 处于 60% 以下. 对观测期间获得的数据进行甄别, 排除因站点停电、仪器故障、维护校准、及个别极端雨雪天气造成的异常数据后, 共获得有效样本数 7507 个. 同时, 通过 Thermo 公司的 RP1405D 微量振荡天平法颗粒物监测仪在线监测获得 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 数据; 通过美国 Thermo 公司生产的 43i/43C 型和 42i 型气体分析仪在线监测获得 SO_2 、 NO - NO_2 - NO_x 气体的浓度. 同期的能见度数据由站点配备的美国 Belfort 公司的 Model6000 型能见度传感器获得; 相关的地面气象观测数据由美国 Metone 公司的自动气象站监测获得. 历史霾日数及相关气象资料由杭州市气象局提供. 同时还利用 NOAA Air Resources Laboratory 研发的 HYSPLIT 模式, 进行前推和后推气流轨迹线的绘制^[20]. 上述仪器均按相关标准及要求定期维护校准, 确保数据可靠性.

2 结果与讨论

2.1 散射系数特征概况

图 1 为 2011 年 7 月 ~ 2012 年 6 月期间, 杭州大气颗粒物散射系数小时及日变化状况. 散射系数日均值变化范围为 $108.4 \sim 1098.1 \text{ Mm}^{-1}$, 最低值出现在夏季的 7 月 12 日, 最高值则出现在秋季的 11

月 17 日, 年均值达到 $428.6 \text{ Mm}^{-1} \pm 200.2 \text{ Mm}^{-1}$. 春夏秋冬四个季节的散射系数分别为 397.0、287.4、442.4、547.1 Mm^{-1} .

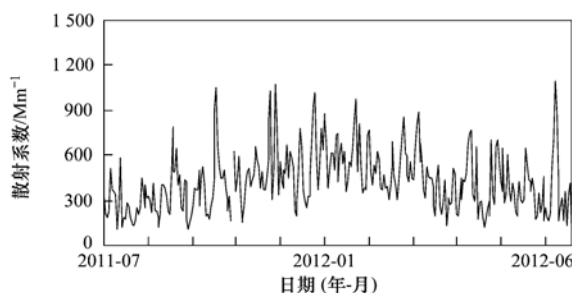


图 1 杭州大气颗粒物散射系数日变化趋势

Fig. 1 Daily variations of particle scattering coefficients in Hangzhou

表 1 给出了国内外文献中报道的观测值作为比较. 从年均水平来看, 杭州市散射系数明显高于北京^[21, 22]、上海^[23]两个特大城市, 达到其 1.5 倍左右, 远高于上甸子本底站^[22], 达到 2.4 倍左右. 分季节看, 秋冬季杭州散射系数高于广州^[24]、济南^[25], 明显高于上海^[26]、新垦^[27]、临安^[16]、Gosan^[28]、Mexico City^[29], 远高于 Hong Kong^[30]、Granada^[31]; 春季散射系数与天津^[32]、Kwangju^[33]接近; 明显高于石家庄^[34]; 夏季散射系数高于广州^[35], 远高于 Nagoya^[36]、Atalanta^[37]. 总体来看, 杭州市全年及各季节散射系数水平高于上述国内外地区及城市, 污染程度较重.

图 2 为颗粒物散射系数小时频率分布状况, 散射小时高频值主要分布在 $100 \sim 700 \text{ Mm}^{-1}$ 之间, 占有所有观测的 84.2%; 其中, 散射值在 $200 \sim 500 \text{ Mm}^{-1}$ 之间的出现频率占有所有观测的 51.0%; 散射值小于 100 Mm^{-1} 的出现频率为 1.9%, 散射值大于 800 Mm^{-1} 和 1000 Mm^{-1} 的出现频率分别为 8.1% 和 2.7%. 利用多项式拟合的方法, 得到杭州频率分布最大值所对应的散射系数值为 295 Mm^{-1} , 可作为杭州大气颗粒物散射系数本底值参考.

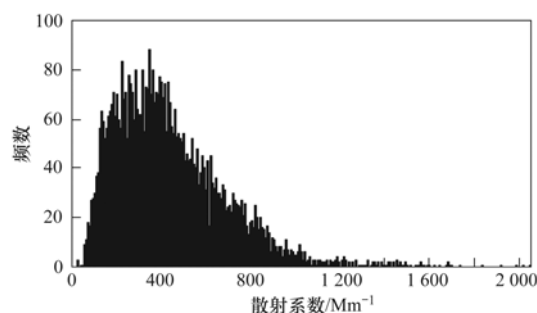


图 2 颗粒物散射系数频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of the scattering coefficients

表 1 各地颗粒物散射系数、PM_{2.5}质量浓度及颗粒物散射效率值状况

Table 1 Particle scattering coefficients, PM_{2.5} mass concentrations and particle scattering efficiencies at different sites over the world

观测地点	观测时间	散射系数/Mm ⁻¹	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	散射效率/m ² ·g ⁻¹
杭州(本研究)	2011-07~2012-06	428.6±200.2(525) ¹⁾	50.2±24.6	4.4(PM ₁₀) 7.6(PM _{2.5})
北京 ^[21]	2005~2006	288±281(525)		
北京 ^[22]	2008-06~2009~05	301±307(525)		5.88(PM _{2.5})
上海 ^[23]	2008	250.37±215.99(525)		
上海 ^[26]	2010-12~2011-03	292.81±206.39(525)		
天津 ^[32]	2011-04~2011-05	369.93±209.75(525)	57.89±37.02	2.95(PM ₁₀)
广州 ^[24]	2004-10~2004-11	418±159(545)	102.9±25.7	4.2±1.0(PM _{2.5})
石家庄 ^[34]	2010-05	199±237(550)		
新垦 ^[27]	2004-10~2004-11	333±137(550)		3.5±0.8(PM ₁₀)
济南 ^[25]	2009-10~2009-11	428.5±315.8(525)	96.4±79.1	
临安(本底站) ^[16]	1999-10~1999-12	353±202(530)	90±47	4.0±0.4(PM _{2.5})
上甸子(本底站) ^[22]	2008-06~2009-05	182±201(525)		4.81(PM _{2.5})
Hong Kong ^[30]	1998-11~1999-02	96.75(530)		
Kwangju, Korea ^[33]	2001-03~2001-05	319±222(530)	26.5±9.2	
Gosan, Korea ^[28]	2001-11	224.2±123.3(530)	50.4±15.2	4.5±1.3(PM ₁₀)
Mexico City, Mexico ^[29]	1997-02~1997-03	225.25±132.77(530)		
Atlanta, USA ^[37]	1999-07~1999-09	121±48(530)	31±12	3.5~4.4(PM _{2.5})
Granada, Spain ^[31]	2005-12~2006-02	84±62(550)		

1) 括号内数字为仪器测量光源的波长(nm)

2.2 散射系数季节变化及日变化特征

2.2.1 季节变化特征

图3为观测期间颗粒物散射系数月均值及气象因子变化趋势. 散射系数月均浓度最高值出现在12月, 达到564.6 Mm⁻¹±213.2 Mm⁻¹, 浓度较高的月份还有1月、11月和2月; 最低值出现在8月, 仅为241.7 Mm⁻¹±91.8 Mm⁻¹, 浓度较低的月份还有7月和6月. 总体呈现出秋冬季高、夏季低的变化趋势, 冬季散射系数达到夏季的1.9倍左右.

散射系数的季节变化趋势受污染物源强和气象因素的共同影响. 如图3所示, 杭州秋冬季温度较低, 燃烧取暖等活动增多, 机动车燃料燃烧效率下降^[38], 污染物排放水平增加; 较低的温度也导致逆温发生频率较高, 强度、厚度较大^[39], 加上秋冬季风速较低, 总体扩散条件较差, 污染物易积聚导致较高的散射水平. 而夏季, 沿海地区降水频繁, 温度较高, 风速较大, 对流活动加强, 大气扩散能力较强, 从而污染物浓度较低, 散射系数水平也较低.

通过HYSPLIT后向轨迹模式对每日传输到杭州的气团路径进行分析, 进一步研究不同季节气团传输对散射系数的影响, 如图4所示. 结果表明散射系数大于年均值428.6 Mm⁻¹的天数中, 来自西-西北-北方向气团的比例为64.4%, 东北方向及南-西南方向气团的比例分别为19.2%和8.9%, 而来自东-东南的气团比例只有7.5%. 当散射系数大于

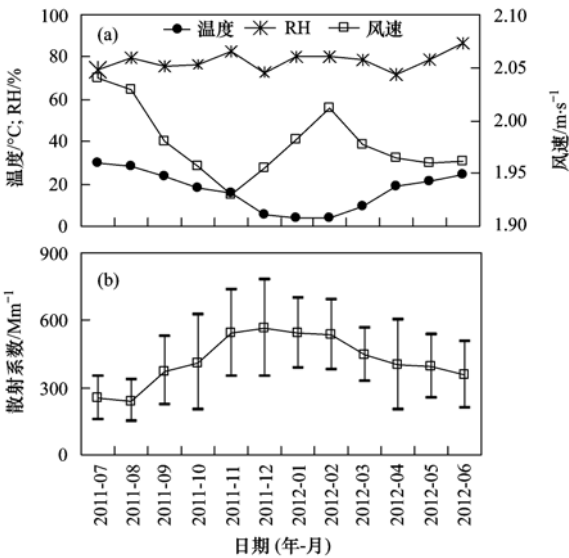


图3 散射系数及主要气象因子月变化趋势

Fig. 3 Monthly variations of scattering coefficients and major meteorological factors

600 Mm⁻¹时, 来自西-西北-北方向气团的比例上升到76.7%, 东北方向及南-西南方向气团的比例分别为10.0%和13.3%, 来自东-东南的气团比例则为零. 而在散射系数小于本底值295 Mm⁻¹的天数中, 来自东-东南的气团比例则达到了56.2%. 杭州所处沿海地区, 受典型的季风性气候影响, 秋冬季主导风向为西北风, 易从内陆带来污染气团, 而夏季主导风向为东南风, 易从海洋上带来干净气团^[40], 这

也是散射系数秋冬季高、夏季低的一个重要因素。

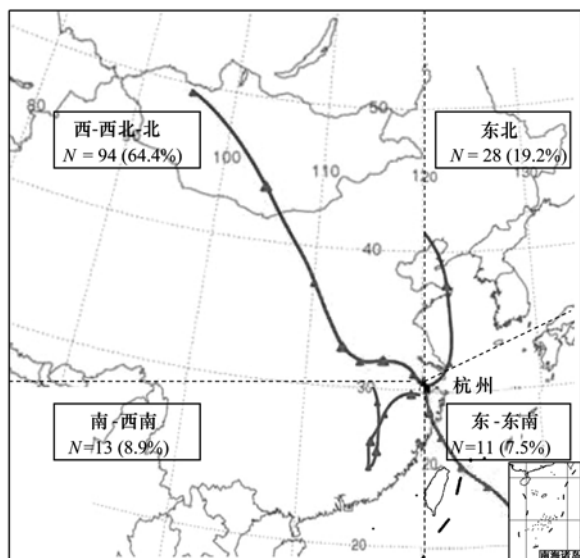


图4 4种传输到杭州的典型气团轨迹

Fig. 4 Four typical trajectories representing four types of air masses arriving in Hangzhou

散射系数的季节变化趋势与许建明等^[23] 2008年在上海的观测结果相似,但与Yan等^[41] 2003~2005年、He等^[21] 2005~2006年、赵秀娟等^[10] 2007~2008在北京观测到的夏季高、冬季低的结果相反。笔者发现,研究期间杭州市春、夏、秋、冬这4个季节的平均相对湿度(RH)分别为76.4%、80.0%、76.0%和79.0%,冬季与夏季RH相近;而北京夏季RH在70%~80%之间,冬季则在40%~50%之间,两个季节的差异较大。研究表明RH是影响颗粒物吸湿增长进而影响散射水平的重要因素^[41, 42],高湿度有利于二次污染气溶胶硫酸盐、硝酸盐、铵盐的生成及吸湿增长,从而影响消光水平降低能见度^[43]。Yan等^[41]在北京的实验中发现当RH从40%左右上升到80%左右时,相应的颗粒物散射系数亲水增长因子可达1.2~1.3,而当RH上升到90%以上,亲水增长因子可达到2.0以上,对散射水平的影响较大。同时夏季温湿度高,太阳辐射增强,气粒转化反应增强,使得气溶胶中二次气溶胶如硫酸盐、硝酸盐含量增加,气溶胶具有更高的光散射能力。因此,北京夏季较高的RH可能是导致夏季散射系数高于冬季的重要因素。而杭州与上海同处长江三角洲,地理位置与气候相近,影响散射系数的因素相对相似,呈现的季节变化趋势也相对一致。

2.2.2 日变化特征

对观测期间散射系数、PM_{2.5}和主要气态污染

物进行各时次平均,得到相应的日变化曲线,如图5所示。杭州市大气颗粒物散射系数日变化趋势总体呈双峰结构,各季节日变化趋势基本相似,早峰值出现在07:00~10:00之间,晚峰出现在19:00~22:00之间。从全年平均来看,早峰出现在08:00,达到 $459.1 \text{ Mm}^{-1} \pm 244.1 \text{ Mm}^{-1}$,晚峰出现在21:00,达到 $451.5 \text{ Mm}^{-1} \pm 279.4 \text{ Mm}^{-1}$,谷值则出现在16:00,为 $400.59 \text{ Mm}^{-1} \pm 248.0 \text{ Mm}^{-1}$,趋势与许建明等^[23]在上海的结果基本相似。

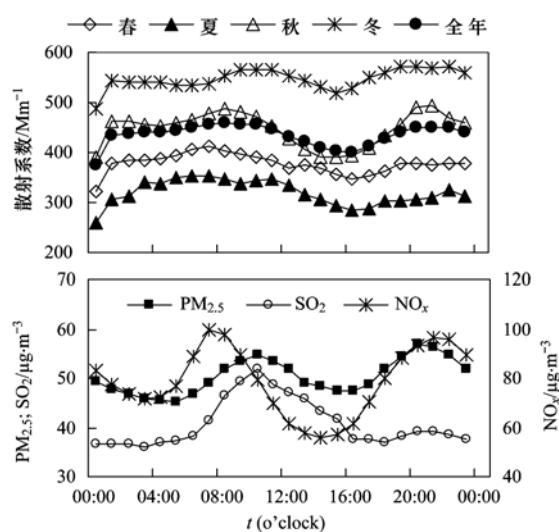


图5 颗粒物散射系数及PM_{2.5}、SO₂、NO_x浓度日变化趋势

Fig. 5 Diurnal variations of particle scattering coefficients, and the concentrations of PM_{2.5}, SO₂, NO_x

由图5可见,散射系数与PM_{2.5}、NO_x基本呈相似日变化趋势。NO_x通常作为机动车尾气排放的示踪物,07:00~10:00和19:00~22:00属于上下班高峰期,交通流量大,机动车污染排放加剧,因此散射系数的日变化趋势主要受城市交通影响,在上下班高峰期呈现出峰值。而在早上10:00以后,随着温度上升,大气边界层逐渐抬高,对流活动旺盛,污染物源强排放的减弱,至14:00左右,散射系数逐渐到达一天中的低谷。值得注意的是,PM_{2.5}和散射系数早峰出现时间比NO_x的峰值滞后2h,晚峰时间则基本相似,这可能是由于白天光照较为充足,大气氧化剂(如O₃)浓度较高,PM_{2.5}的浓度除了受机动车排放的一次污染物影响外,主要还受排放污染物二次转化和形成的影响,因此PM_{2.5}和散射系数的峰值略有延后,出现在交通高峰期之后;而夜间,光照缺乏,O₃与NO_x的转化效应削弱,大气氧化剂浓度较低,污染物的二次转化和形成效率下降^[19],因此PM_{2.5}浓度主要受机动车一次排放的影响较大,散射

系数峰值与 NO_x 也相对吻合. SO_2 主要作为固定源排放的指示物,受早晚高峰影响较小,在中午浓度达到高峰,这可能与上班后的一段时间内商业、工业用电量达到高峰有关,其和 $\text{PM}_{2.5}$ 峰值出现的时间一致,表明该时段 $\text{PM}_{2.5}$ 除受早高峰污染物二次转化的贡献外,还可能受到固定源一次排放贡献的影响.

2.3 散射效率及消光贡献

2.3.1 散射效率

将散射系数与 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 进行相关性分析,以研究主要污染物对散射系数的影响. 大气气态污染物的散射消光作用(瑞利散射)的影响一般较小^[44, 45],而本研究发现散射系数与 SO_2 和 NO_2 相关系数分别为 0.40 和 0.51,呈一定的相关性. SO_2 和 NO_2 是硫酸盐和硝酸盐等二次气溶胶的主要前体物,二次气溶胶由于粒径通常较小,其散射作用一般较为强烈,这可能是 SO_2 和 NO_2 与散射系数呈一定相关性的主要原因. 散射系数与 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关系数分别达到 0.72 和 0.84,表明颗粒物在消光贡献中起主要作用. 而散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性比与 PM_{10} 的相关性更好,表明细颗粒物对大气消光作用影响更为显著. 分季节对散射系数和 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性进行分析,得到春夏秋冬 4 个季节的 R^2 分别为 0.55、0.80、0.80 和 0.79,如图 6 所示. 夏秋冬 3 个季节散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性基本接近且较好,表明 $\text{PM}_{2.5}$ 是影响散射消光的主要因素,同时也发现秋季和冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度及散射水平总体显著高于夏季,这也是杭州秋冬季霾天气程度较重的原因之一^[46]. 相比而言,春季散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性相对其他 3 个季节略差. 研究发现春夏秋冬 4 个季节 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 分别为 0.53、0.60、0.72 和 0.62,春季 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值明显低于其他 3 个季节. 春季北方沙尘频发,通过长程传输到东部沿海地区,影响当地空气质量^[47, 48]. 沙尘主要以粗颗粒物形式存在,受频繁的沙尘输入影响,春季颗粒物中粗颗粒物含量较高,细颗粒物比例下降,对散射消光的影响削弱,这可能是该季节散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性弱于其他季节的重要原因.

颗粒物散射效率(单位 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)是单位质量浓度颗粒物对光的散射能力,是表征散射系数与颗粒物质量浓度定量关系的基本参数. 本研究中浊度仪未安装 $\text{PM}_{2.5}$ 粒径切割头,因此测定的光散射值是各个粒径的颗粒物共同散射的结果,而散射系数主要受细颗粒物的影响较大,因此本研究中暂不考虑粒径大于 $10 \mu\text{m}$ 颗粒物的散射作用,将散射系数近似

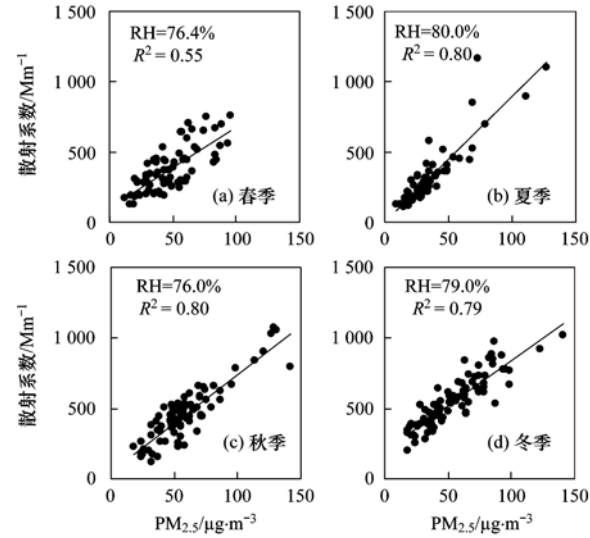


图 6 不同季节散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性

Fig. 6 Linear correlation between scattering coefficients and $\text{PM}_{2.5}$ in different seasons

视为粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物的结果. 用相关性分析回归方程的斜率,表示 PM_{10} 的散射效率,从而得到 PM_{10} 的散射效率为 $4.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,若将散射消光全视为 $\text{PM}_{2.5}$ 作用的结果,则近似得到 $\text{PM}_{2.5}$ 的散射效率为 $7.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 如表 1 所示,与文献中报道的观测值相比,杭州 PM_{10} 散射效率低于北京城区^[22]、上甸子^[22],与广州^[24]、Gosan^[28]、Atanlta^[37] 相近,高于天津^[32]、新垦^[27],略高于临安本底站^[16]; $\text{PM}_{2.5}$ 散射效率则远高于这些城市,表明杭州市细颗粒物重要的散射消光作用和对能见度的显著影响. 对不同 RH 范围下 $\text{PM}_{2.5}$ 的散射效率值进行比较,如表 2 所示. 结果表明当 RH 从 40% 以下上升到 70% 时,散射效率只从 $6.0 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $6.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,并不明显;当 RH 超过 70% 后,随着 RH 上升,散射效率显著增加达到了 $9.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,是 RH 为 40% 时的 1.6 倍左右,这与 Yan 等^[41] 在北京的结果相似. 气溶胶中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐等二次粒子的潮解点一般在 RH 为 70% ~ 80% 附近^[49],高湿度有利于二次

表 2 不同湿度下 $\text{PM}_{2.5}$ 散射效率

Table 2 Scattering efficiencies of $\text{PM}_{2.5}$ under different relative humidity

RH/%	散射效率/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	样本数
<40	6.0	167
40~50	6.0	329
50~60	6.1	738
60~70	6.4	1 161
70~80	7.5	1 743
80~90	8.2	2 262
90~100	9.4	2 354

粒子的生成及吸湿增长,这也是 RH 超过 70% 后散射效率显著增加的原因,也表明亲水增长因子对散射水平的影响较大,RH 是影响散射水平的一大重要因素。

2.3.2 散射消光贡献

大气总消光系数可表示为 $b_{\text{ext}} = \text{颗粒物散射消光}(b_{\text{sp}}) + \text{颗粒物吸收消光}(b_{\text{ap}}) + \text{气体散射消光}(b_{\text{sg}}) + \text{气体吸收消光}(b_{\text{ag}})$ 。同时, b_{ext} 与能见度又存在相应关系,用 Koschmieder 公式表示为: $L_v = 3.912/b_{\text{ext}}$,式中, L_v 指的是大气能见度,单位为 km, b_{ext} 指的是大气总消光系数,单位为 Mm^{-1} 。通过上述公式可以将观测期间的能见度转化为 b_{ext} ,计算得到各小时 b_{sp} 在 b_{ext} 中的比值,从而平均计算得到观测期间的散射消光贡献。

结果表明,2011 年 7 月~2012 年 6 月观测期间, b_{ext} 变化范围为 $359.1 \sim 918.3 \text{ Mm}^{-1}$,年均值则达到 472.2 Mm^{-1} 。对比各小时 b_{sp} 和 b_{ext} 可以计算得到观测期间 b_{sp} 在 b_{ext} 中的比例达到 90.2%, b_{ag} 的比例仅 10% 左右。该结果略低于杭州郊县临安的 93%^[16]、显著高于北京的 78%~80%^[21]。颗粒物散射消光受 RH 影响较大,较高的湿度利于散射组分吸湿增长导致散射消光作用增强,其次空气中较高的水汽含量也会增强散射作用,从而增加散射消光比例,因此较高的 RH、频繁降水以及较大的水域面积等因素可能都会导致散射消光比例相对较高。杭州地处东部沿海,降水较北方城市频繁,同时市区内有钱塘江、西湖、西溪湿地、运河河道等水系分布,水域面积较大,常年 RH 在 80% 左右,较高的 RH 可能是导致散射消光比例较高的重要原因。同时也表明颗粒物散射消光是杭州市大气消光最主要的贡献部分,是引起杭州市大气能见度下降的根本原因。

2.4 霾天气下散射特征

参照中国气象局颁布的霾的气象标准^[50],对观测期间发生的霾天气进行筛选,根据能见度、颗粒物浓度、以及散射系数水平,划分出了几次较典型的霾污染事件,如图 7 所示。2011 年 11 月 7 日~12 月 27 日之间,观测到了 5 次较典型的污染过程,分别发生在 11 月 13~14 日、11 月 17~18 日、11 月 27 日、12 月 5 日以及 12 月 13~14 日。5 次污染事件期间,均观测到能见度急剧降低至 5 km,最低小时能见度分别降至 2.2、0.9、2.3、2.0 和 1.9 km,散射系数则分别高达 1467.7、1416.2、1991.8、1012.0 和 1134.2 Mm^{-1} ,为典型的霾污染

天气。期间污染物浓度呈急剧上升趋势, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别高达 207.9、203.7、301.6、195.5 和 186.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 浓度则分别高达 343.2、369.9、452.3、348.3 和 371.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 均值分别达到 0.61、0.60、0.67、0.58 和 0.57,表明高浓度的细颗粒物和粗颗粒物均为污染形成的重要因素。气态污染物如 SO_2 、 NO_x 浓度也呈显著上升趋势, NO_x 浓度分别高达 158.7、170.6、270.1、168.5 和 519.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较平时上升了数倍,表明本地工业排放特别是机动车排放可能是这几次污染发生的主要原因。图 7 给出了污染期间主要气象因子状况。可以看到这 5 次污染期间 RH 基本在 80% 以上,适合二次粒子吸湿增长和生成^[41, 49],主导风向基本为北-西北方向,风速分别为 0.50、0.49、0.45、0.71 和 0.44 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,均较低,气压较污染前后均呈上升趋势,而温度则大多处于一天之中的低谷,污染过程多数发生在傍晚至早晨期间。从上文日变化过程分析可知,傍晚是交通晚高峰期间,机动车排放大量的污染物,杭州秋冬季气压总体较高,入夜后温度较低,容易形成逆温层^[39],加上风速较低,大气扩散条件总体较差,以及较高的 RH,均利于污染物积聚加重污染程度,从而导致散射消光水平上升而能见度下降形成霾天气,这也是杭州秋冬季霾天气多发的重要原因。

在 2012 年 3 月 14 日及 5 月 4 日观测到另外 2 次典型的污染过程。期间能见度分别下降至 4.2 km 和 3.5 km,散射系数分别为 586.5 Mm^{-1} 和 852.1 Mm^{-1} ,相比而言霾程度低于秋冬季的 5 次事件。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 123.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 124.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 浓度分别为 257.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 255.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 均值分别为 0.48 和 0.49,明显低于前 5 次事件(0.58~0.67),表明春季的这 2 次污染事件中细颗粒物浓度比例相对较低而粗颗粒物的比例上升。2 次污染过程期间的 SO_2 浓度分别为 86.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 60.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NO_x 浓度则分别为 138.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 90.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较污染前略有上升但不明显。表明本地污染源排放对两次污染形成的贡献有限。此外,这 2 次污染期间主导风向均为北-西北风方向,风速分别为 1.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 1.6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,远高于前 5 次污染事件,而 RH 分别为 57.3% 和 66.3%,远低于前 5 次事件的 80% 左右,且气压总体较低,表明受到北方干燥气团南下传输的影响,而其 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值低于平常水平也表明这 2 次能见度下降的霾天气过程很可能受春季北方沙尘长程传输

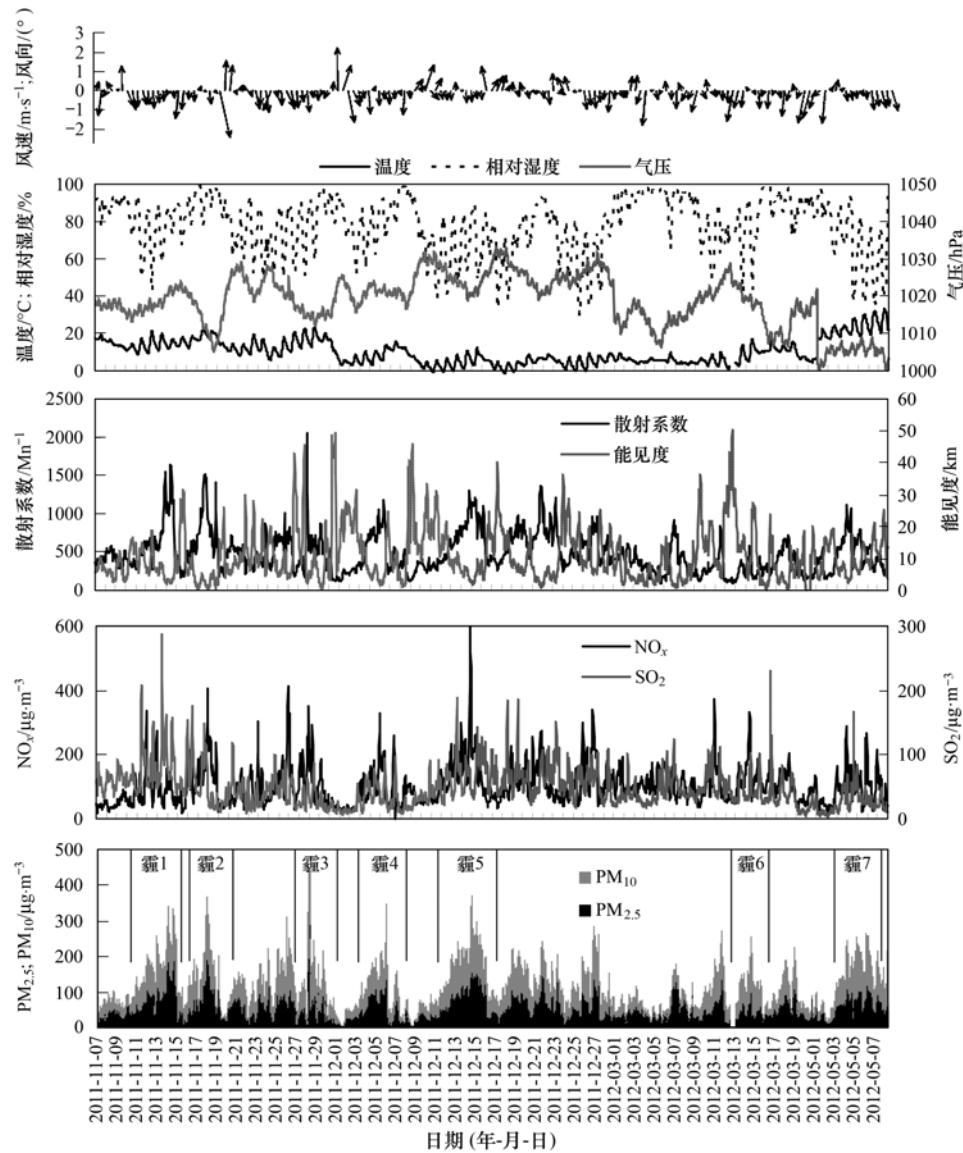


图 7 典型霾天气散射系数、颗粒物浓度及气象因子变化趋势

Fig. 7 Variations of light scattering coefficient, particle concentrations and meteorological factors during typical hazy weather

对当地空气质量造成的影响,这也是春季杭州霾天气发生的一大重要原因。

为了进一步了解霾天气下散射系数及主要污染物特性,对2011年7月~2012年6月一年左右观测期间的小时样本数按照能见度范围进行划分,从而得到不同程度灰霾天气以及非霾天气下散射系数、散射消光比例、颗粒物浓度、气态污染物浓度的界定标准,以及相关气象因子的水平状况。从表3中可以看到,在灰霾天气($V < 10$ km)状况下,散射系数达到 $684.4 \text{ Mm}^{-1} \pm 218.1 \text{ Mm}^{-1}$,是非霾天气($V > 10$ km)的2.6倍,在重度霾($V < 2.0$ km)状况下,散射系数则高达 $1\,095.4 \text{ Mm}^{-1} \pm 397.7 \text{ Mm}^{-1}$,是非霾天气的4.2倍。灰霾和重度霾天气下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分

别为 $77.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 30.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $119.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 45.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到非霾天气的2.2和3.4倍; PM_{10} 浓度分别为 $132.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 56.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $188.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 77.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到非霾天气的1.8和2.6倍; $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值分别为 0.60 ± 0.09 和 0.65 ± 0.08 ,比非霾天气分别上升了0.09和0.14;散射消光比例则分别达到 $91.7\% \pm 2.6\%$ 和 $91.1\% \pm 3.2\%$,比非霾天气分别高出2.3%和1.7%。上述结果表明灰霾天气下细颗粒物浓度、比例及颗粒物散射消光比例都较非霾天气有显著上升,这也可能是导致大气能见度下降和灰霾天气发生的重要原因。与此同时 SO_2 、 NO_x 等气态污染物浓度在灰霾天气也均表现出较高水平,分别达到 $57.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm$

33.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 116.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 61.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 接近非霾天气的 2 倍左右. 从气象因子来看, 灰霾天气发生时的平均风速为 $1.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 0.56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均温度为 $13.4^\circ\text{C} \pm 8.7^\circ\text{C}$, RH 为 $79.8\% \pm 10.9\%$, 压强为 $1015.7 \text{ hPa} \pm 9.0 \text{ hPa}$, 表明灰霾污染过程大多发生在风速、温度相对较低、湿度及压强较高的不利的大气扩散条件下. 灰霾的成因较为复杂, 是大气颗粒物浓度、化学组分、污染气体浓度以及气象因子等因素综合影响的结果.

表 3 霾与非霾天气下主要污染物浓度及气象因子水平¹⁾

Table 3 Concentrations of major pollutants and meteorological factors in hazy and non-hazy weather

项目	非霾 ($V \geq 10.0 \text{ km}$)	灰霾 ($V < 10.0 \text{ km}$)	重度霾 ($V < 2.0 \text{ km}$)
样本数	$N = 4\,029$	$N = 2\,568$	$N = 52$
散射系数/ Mm^{-1}	262.0 ± 111.7	684.4 ± 218.1	$1\,095.4 \pm 397.7$
散射消光比例/%	89.4 ± 4.7	91.1 ± 3.2	91.7 ± 2.6
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	34.8 ± 19.5	77.1 ± 30.7	119.8 ± 45.4
$\text{PM}_{10}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	73.2 ± 43.8	132.7 ± 56.6	188.1 ± 77.7
$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$	0.51 ± 0.14	0.60 ± 0.09	0.65 ± 0.08
$\text{SO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	33.2 ± 24.6	57.4 ± 33.2	70.3 ± 36.3
$\text{NO}_x/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	65.6 ± 43.9	116.5 ± 61.9	152.2 ± 71.6
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.39 ± 0.68	1.04 ± 0.56	0.90 ± 0.41
温度/ $^\circ\text{C}$	19.2 ± 9.9	13.4 ± 8.7	9.6 ± 7.1
RH/%	69.1 ± 15.8	79.8 ± 10.9	91.4 ± 4.8
压强/hPa	$1\,010.6 \pm 10.1$	$1\,015.7 \pm 9.0$	$1\,016.1 \pm 7.0$

1) V 表示能见度

3 结论

(1) 2011 年 7 月~2012 年 6 月期间, 杭州市大气颗粒物散射系数年均值为 $428.6 \text{ Mm}^{-1} \pm 200.2 \text{ Mm}^{-1}$, 频率最大值出现在 295 Mm^{-1} . 散射系数季节变化呈秋冬高夏季低的趋势, 冬季均值达到夏季的 1.9 倍; 日变化趋势呈典型的双峰型, 早峰出现在 08:00, 晚峰出现在 21:00.

(2) 散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 呈较好相关性, 散射效率则分别为 $7.6 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $4.4 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, 高于国内外报道的大多数城市. RH 超过 70% 后, 散射效率随 RH 上升呈显著上升趋势.

(3) 观测期间, 散射系数在总消光系数中的比例达到 90.2%, 表明颗粒物散射消光是杭州市大气消光最主要的贡献部分, 是引起杭州市大气能见度下降的根本原因.

(4) 霾污染天气大多发生在风速、温度较低、湿度及压强较高的不利大气扩散条件下. 灰霾和重度霾天气下, 散射系数分别达到非霾天气的 2.6 倍和 4.2 倍; $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值分别比非霾天气的比例分别上升了 0.09 和 0.14, 表明灰霾天气下散射系

数及细颗粒物浓度和比例都较非霾天气有显著上升, 这也可能是导致大气能见度下降和灰霾天气发生的重要原因.

参考文献:

[1] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州主城区悬浮细颗粒 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化及其组分分析[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(1): 14-17, 34.

[2] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].

[3] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气能见度变化及其与主要因子的分析[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(2): 56-61.

[4] 俞新华, 焦荔, 包贞, 等. 杭州市区大气能见度变化趋势及其与主要污染物相关性分析[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 106-108.

[5] 徐鹏炜, 谭湘萍, 蔡菊珍, 等. 杭州城市大气消光系数和能见度的影响因子研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(6): 410-413.

[6] 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.

[7] 陶俊, 张仁健, 董林, 等. 夏季广州城区细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子特征[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1417-1424.

[8] 朱李华, 陶俊, 陈忠明, 等. 2010 年 1 月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 13-19.

[9] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 416-423.

[10] 赵秀娟, 张小玲, 蒲维维, 等. 气象条件对上甸子地区气溶胶散射特征的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3153-3159.

[11] 岳建华, 陶俊, 林泽健, 等. 成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2151-2157.

[12] 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 等. 环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2165-2171.

[13] 王苑, 邓军英, 史兰红, 等. 基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 830-838.

[14] Cao J, Shen Z, Chow J C, et al. Seasonal variations and sources of mass and chemical composition for PM_{10} aerosol in Hangzhou, China [J]. Particuology, 2009, 7(3): 161-168.

[15] 范雪波, 刘卫, 王广华, 等. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1): 13-18.

[16] Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(2): 161-173.

[17] 陈然, 江洪, 肖钟湧等. 地基遥感监测杭州地区气溶胶光学特性及大气环境变化[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 22-26.

[18] 肖钟湧, 江洪, 余树全, 等. 杭州地区大气气溶胶光学特性高光谱研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1894-1903.

- [19] 徐昶, 沈建东, 何曦, 等. 杭州无车日大气细颗粒物化学组成形成机制及光学特性[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(3): 392-401.
- [20] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html) [EB/OL]. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2003.
- [21] He X, Li C C, Lau A K H, *et al.* An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(22): 8903-8915.
- [22] Zhao X, Zhang X, Pu W, *et al.* Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. Atmospheric Research, 2011, **101**(3): 799-808.
- [23] 许建明, 耿福海, 甄灿明, 等. 上海浦东地区气溶胶散射系数及影响因子[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(1): 211-216.
- [24] Andreae M, 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.
- [25] 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.
- [26] Xu J W, Tao J, Zhang R J, *et al.* Measurements of surface aerosol optical properties in winter of Shanghai [J]. Atmospheric Research, 2012, **109-110**: 25-35.
- [27] Cheng Y, Wiedensohler A, Eichler H, *et al.* Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6351-6372.
- [28] Kim S, Yoon S, Jefferson A, *et al.* Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001 [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(1): 39-50.
- [29] Eidels-Dubovoi S. Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City [J]. Science of the Total Environment, 2002, **287**(3): 213-220.
- [30] Man C, Shih M. Light scattering and absorption properties of aerosol particles in Hong Kong [J]. Journal of Aerosol Science, 2001, **32**(6): 795-804.
- [31] Lyamani H, Olmo F, Alados-Arboledas L. Light scattering and absorption properties of aerosol particles in the urban environment of Granada, Spain [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(11): 2630-2642.
- [32] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖, 等. 天津城区春季大气气溶胶消光特性研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 795-802.
- [33] Kim K W, He Z S, Kim Y J. Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**(D19): D19S02.
- [34] 张勇, 银燕, 肖辉, 等. 石家庄春季大气气溶胶的散射特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 769-779.
- [35] 施展, 李远, 陶俊, 等. 2008 年夏季广州大气消光系数与细粒子的关系[J]. 中国粉体技术, 2012, **18**(3): 6-9.
- [36] Khatri P, Ishizaka Y, Takamura T. A Study on Aerosol Optical Properties in an Urban Atmosphere of Nagoya, Japan [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2009, **87**(1): 19-38.
- [37] Carrico C, Bergin M, Xu J, *et al.* Urban aerosol radiative properties: Measurements during the 1999 Atlanta Supersite Experiment [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D7), 8422, doi: 10.1029/2001JD001222.
- [38] Simpson R W, Xu H C. Atmospheric lead pollution in an urban area-Brisbane, Australia [J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(19): 3073-3082.
- [39] 杜荣光, 齐冰, 郭惠惠, 等. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报, 2011, **27**(4): 49-53.
- [40] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [41] Yan P, Pan X, Tang J, *et al.* Hygroscopic growth of aerosol scattering coefficient: A comparative analysis between urban and suburban sites at winter in Beijing [J]. Particuology, 2009, **7**(1): 52-60.
- [42] Nessler R, Weingartner E, Baltensperger U. Effect of humidity on aerosol light absorption and its implications for extinction and the single scattering albedo illustrated for a site in the lower free troposphere [J]. Journal of Aerosol Science, 2005, **36**(8): 958-972.
- [43] Malm W, Day D. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(16): 2845-2860.
- [44] Chan Y, Simpson R, McTainsh G, *et al.* Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(19): 3237-3250.
- [45] Peundorf R. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μ and their application to atmospheric optics [J]. Journal of the Optical Society of America, 1957, **47**(2): 176-182.
- [46] 刘晓慧, 朱彬, 王红磊. 长江三角洲地区 1980~2009 年灰霾分布特征及影响因子[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 1929-1936.
- [47] Fu Q Y, Zhuang G S, Li J, *et al.* Source, long-range transport, and characteristics of a heavy dust pollution event in Shanghai [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(D7), doi: 10.1029/2009JD013208.
- [48] Wang Y, Zhuang G S, Tang A, *et al.* The evolution of chemical components of aerosols at five monitoring sites of China during dust storms [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(5): 1091-1106.
- [49] 叶兴南, 陈建民. 灰霾与颗粒物吸湿增长[J]. 自然杂志, 2014, **35**(5): 337-341.
- [50] QX/T 113-2010, 霾的观测和预报等级[S].

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行