

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征

杨素英¹, 余欣洋¹, 赵秀勇², 李义宇³, 孙洪娉³, 田芷洁¹, 李岩¹, 吴尚¹, 王梓航¹

(1. 南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 国电环境保护研究院, 国家环境保护大气物理模拟与污染控制重点实验室, 南京 210031; 3. 山西省人工降雨防雹办公室, 太原 030032)

摘要: PM_{2.5} 普遍被认为是导致霾形成的主要污染物之一. 利用 2016 年 11 ~ 12 月在太原市人工降雨防雹办公室观测获得的气溶胶数谱资料、小店区气象站提供的气象要素资料以及小店区环境监测站提供的 PM 质量浓度资料, 探讨了 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征. 结果表明, 观测期间霾污染频发, 且程度严重, 重度霾占 25.35%. 相对湿度高于 80%、风速小于 1.5 m·s⁻¹ 是霾频繁发生的有利条件, 特别是重度霾; 中度霾和轻度霾在相对湿度 40% ~ 80%、风速小于 1.5 m·s⁻¹ 时也会频繁发生; 轻微霾主要发生在相对湿度 20% ~ 40%, 风速为 1.25 ~ 2.55 m·s⁻¹ 时. 霾天 PM_{2.5} 平均质量浓度为 209.45 μg·m⁻³, 是非霾天气的 3 倍, 且随着霾等级增加, PM_{2.5} 质量浓度和 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值不断增加. 低湿环境下 PM₁ 是影响霾的关键粒子; 高湿环境下 PM_{0.5} 是影响轻微霾、轻度霾和重度霾的关键粒子, 而影响重度霾的关键粒子则是 PM₁. 高湿环境下表面积浓度对能见度的贡献率下降, 但是气溶胶吸湿增长增大了粒子尺度, 导致消光效率因子增大, 从而弥补了表面积浓度的不足; 粒子尺度参数的增加是高湿时 PM_{2.5} 影响霾污染的重要因素.

关键词: 太原; 霾污染; PM_{2.5}; 尺度谱; 相对湿度

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2512-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709263

Characteristics of Key Size Spectrum of PM_{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan

YANG Su-ying¹, YU Xin-yang¹, ZHAO Xiu-yong², LI Yi-yu³, SHUN Hong-ping³, TIAN Zhi-jie¹, LI Yan¹, WU Shang¹, WANG Zi-hang¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Power Environmental Protection Research Institute, State Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Physical Modeling and Pollution Control, Nanjing 210031, China; 3. Weather Modification Office of Shanxi Province, Taiyuan 030032, China)

Abstract: PM_{2.5} is generally considered as a main pollutant causing the formation of haze. Based on meteorological parameters, aerosol distribution, and PM monitoring data in Taiyuan during November and December 2016, the characteristics of the key size spectrum of PM_{2.5} affecting haze were discussed. During the observation period, haze was frequent and serious. Heavy haze time accounts for 25.35% of the total haze time. Haze events occurred frequently when the relative humidity was greater than 80% and wind speed was less than 1.5 m·s⁻¹, especially for severe haze. Mild and moderate level haze occurred frequently when the relative humidity was less than 80% and greater than 40% and when wind speed was less than 1.5 m·s⁻¹. Slight haze mainly occurred when the relative humidity was 20% - 40% and the wind speed was 1.25 - 2.55 m·s⁻¹. The average mass concentration of PM_{2.5} was 209.45 μg·m⁻³, which was three times the level during non-haze events. With an increase in the haze level, the mass concentration of PM_{2.5} and the ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ increased. PM₁ was the key particle size affecting haze in the low humidity environment. PM_{0.5} was the key particle size that affects slight haze, mild haze, and moderate haze in the high humidity environment, while PM₁ was the key particle size that affects heavy haze. The contribution of surface concentration to visibility decreased with high humidity, but the particle size increased by moisture absorption leading to an increase in the extinction efficiency factor, which compensated for the lack of surface concentration. The increase in the particle size parameter was an important factor for PM_{2.5} affecting the haze pollution with high humidity.

Key words: Taiyuan; haze; PM_{2.5}; particle spectrum; relative humidity

收稿日期: 2017-09-28; 修订日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41575133); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501404)

作者简介: 杨素英(1975 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为气溶胶及其环境间接气候效应, E-mail: ysy@nuist.edu.cn

随着经济和城市化的快速发展, 华北地区已经成为国内高浓度气溶胶导致大气污染最为严重的区域之一^[1, 2]. 当前大量研究成果表明, 高浓度的气溶胶导致的霾污染已经成为华北地区最主要的空气污染, 并且有向着持续时间更长、污染程度更重, 涉及范围更广的特征发展的趋势^[3, 4]. 霾不仅影响人体健康, 而且降低能见度, 影响交通出行等人们的日常生活, 为了更好地防霾治霾, 霾污染特别是持续性霾污染的形成机制是当前研究的热点问题^[5].

$PM_{2.5}$ 已被普遍认为是导致霾形成的主要污染物之一^[6~8]. 霾污染时大气中 $PM_{2.5}$ 的含量异常高. 杨洋等^[9] 对 2015 年冬季发生在石家庄的一次持续性霾进行分析时发现, 霾过程中 $PM_{2.5}$ 的浓度可以达到 $208.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是清洁天的 5.8 倍. 赵秀娟等^[10] 对北京秋季霾天的 $PM_{2.5}$ 进行了分析, 认为在霾期 $PM_{2.5}$ 浓度是非霾期的 3.3 倍. 曹玲娟等^[3] 的研究发现太原地区灰霾期间大气 $PM_{2.5}$ 平均浓度是非灰霾期间的 12.8 倍. 在一般情况下 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的质量分数为 65% ~ 75%, 而在霾天气时却可以达到 80% ~ 90%^[11~13]. 当前针对 $PM_{2.5}$ 影响霾污染的成因开展了相关研究^[12, 14~16], 其中有些学者通过分析气溶胶谱获得了细粒子影响能见度的关键粒径, 这些关键粒径基本上集中在积聚模态, 但是具体的粒径范围会随着观测和地点和时间有所不同^[17, 18]. 根据气溶胶 Mie 散射理论可知, 气溶胶粒子的尺度和可见光的波长相当时散射辐射的能力最强^[19], 因此气溶胶粒子谱分布会

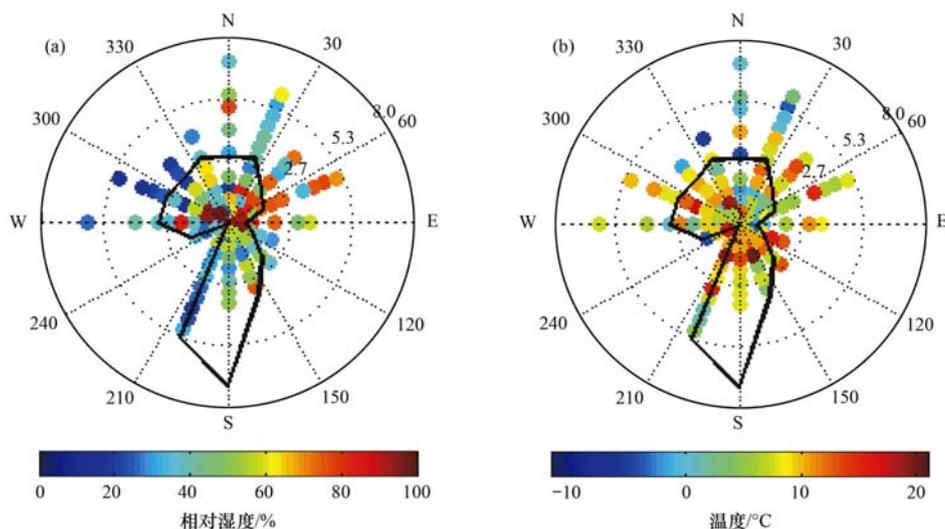
直接影响大气中能见度水平的高低. 当前关于霾污染背景或低能见度背景的气溶胶主要影响粒径仅通过能见度与不同粒径范围的气溶胶表面积浓度求相关获得^[17, 18]. 实际上相同等级的霾可以在不同的气象条件下发生^[20], 而同等级的霾在不同气象条件的气溶胶谱的具体差异和成因还没有进行深入的探讨.

太原市作为山西省会, 煤炭重化工企业分布较多, 大气颗粒物污染严重, 霾天气发生频率越来越大^[3], 因此本文选取太原作为华北地区典型城市, 以 2016 年 11 ~ 12 月发生的持续时间较长的霾污染为研究对象, 探讨太原市冬季细粒子气溶胶谱影响霾污染的特征和机制, 以期为华北地区的防霾治霾提供背景支持.

1 材料与方法

1.1 采样地点与采样时间

本次观测时间为 2016 年 11 月 5 日至 12 月 5 日, 观测和采样地点为山西省太原市小店区人工降雨防霾办公室 ($112^{\circ}57'E$, $37^{\circ}73'N$). 太原地处大陆内部, 远离东部海岸线, 西北部为广阔的欧亚大陆, 属于暖温带大陆性季风气候类型. 冬季漫长, 寒冷干燥, 昼夜温差大. 在观测期间, 太原市小店区平均温度为 3.2°C , 平均相对湿度 (RH) 为 62%, 平均风速 $1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 给出温度、相对湿度风向玫瑰图 (图 1). 观测期间风速普遍低于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以偏南风 and 西北为主, 偏南风时温度较偏北风时高, 高相对湿度主要出现在风速低于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时. 降雨出



角度表示风向, 半径表示风速, 黑色线表示风频, 彩色圆点表示温度或相对湿度平均值

图 1 相对湿度和温度随风速和风向的分布

Fig. 1 Wind dependency maps for relative humidity and temperature

现在 11 月的 6、7 和 29 日, 最大降水量为 3.1 mm.

1.2 观测仪器与数据来源

本文所用的气溶胶数浓度及谱分布数据由美国 MSP 公司生产的宽范围粒径谱仪(WPS)进行 24 h 连续测量获得, 仪器由 3 个部分组成: 激光颗粒光谱仪(LPS)、凝结核计数器(CPC)和微分迁移率分析仪(DMA). 测量粒径范围为 0.01 ~ 10 μm , 同设 67 档, 时间分辨率为 5 min, 本文选取 0.01 ~ 2.5 μm 粒径范围进行研究. 气象观测资料由太原市小店国家一般气象站提供(37°45'N, 112°33'E 站号 53679, 观测场海拔高度 776.2 m). $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度资料由太原市小店环境监测站提供. 混合层高度数据源自美国国家海洋局和大气管理局空气资源实验室网站 (<http://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>). 混合层高度数据时间分辨率为 3 h.

1.3 霾的划分标准

根据中国气象局 2010 年发布的《霾的观测和预报等级》中关于霾的划分方法, 并结合庄治一^[21]对霾的划分方法, 当本文中所使用的小时级的能见度(V)数值低于 10 km, 并排除降水、沙尘暴、扬尘、吹雪等天气现象造成的视程障碍, 当相对湿度小于 80% 且持续时间不小于 3 h, 判断为霾; 当相对湿度 80% ~ 95% 时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 且持续时间不小于 3 h 也判断为霾. 其中当能见度小于 2 km 时定义为重度霾, 而当能见度大于等于 2 km 小于 3 km 定义为中度霾, 能见度大于等于 3 km 小于 5 km 定义为轻度霾, 能见度大于等于 5 km 小于 10 km 定义为轻微霾(表 1).

表 1 霾等级划分标准

霾等级	RH < 80% 划分标准 (持续时间不小于 3 h)	80% ≤ RH < 95% 划分标准
重度	$V < 2.0 \text{ km}$	满足 RH < 80% 时的划分标准且 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
中度	$2.0 \text{ km} \leq V < 3.0 \text{ km}$	
轻度	$3.0 \text{ km} \leq V < 5.0 \text{ km}$	
轻微	$5.0 \text{ km} \leq V < 10.0 \text{ km}$	

1.4 气溶胶 Mie 散射理论

1908 年 Mie 给出了均匀的球状粒子散射问题的精确解, 也就是 Mie 散射理论^[22]. 通过 Mie 散射理论可以求出大气气溶胶的消光系数(β_{ex})和能见度(V), 下面将作简要介绍: 假设大气中所有气溶胶颗粒成分相同, 且颗粒物形状呈均匀球体的理想状态, 已知颗粒物粒径和复折射率, 根据 Mie 理论可以得到消光效率因子 $[Q_{\text{ex}}, \text{式}(1)]$, 进一步可以

求得颗粒物的消光系数[式(2)]和能见度[式(3)]^[23].

$$Q_{\text{ex}} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}[a_n + b_n] \quad (1)$$

$$\beta_{\text{ex}} = \sum_i \frac{\pi D_{p,i}^2}{4} N_i Q_{\text{ex},i} \quad (2)$$

$$V = \frac{3.912}{\beta_{\text{ex}}} \quad (3)$$

式中, α 为尺度参数, a_n 和 b_n 为复函数, 称为 Mie 散射参数, 由粒子的复折射率 m , 尺度参数 α 和参数 $\rho = m\alpha$ 决定. $D_{p,i}$ 为气溶胶粒子的直径; N_i 为 WPS 测量得到的某粒径段的粒子数浓度; 由式(2)和式(3)可知, 消光系数与气溶胶粒子的总表面积浓度正相关, 能见度则与总表面积浓度反相关^[23].

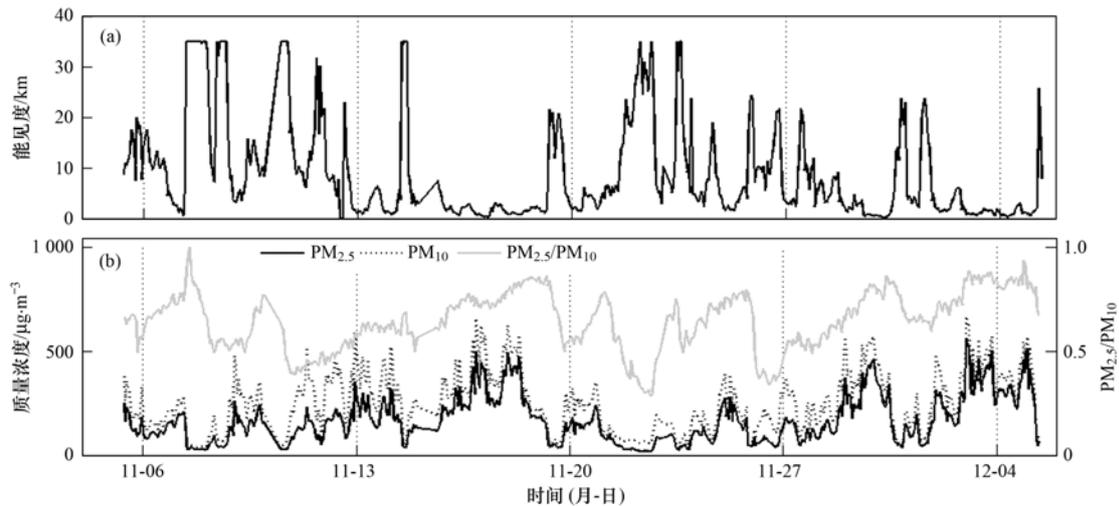
2 结果与讨论

2.1 观测期间能见度、气溶胶特征

能见度是霾等级划分的重要指标, 因此本文首先给出了观测期间能见度的逐小时变化曲线[图 2(a)], 从图 2(a)中可以看出, 能见度的数值存在很大的波动, 其中最大值为 35 km, 最小值为 0.13 km; 能见度小于 10 km 约占 70%, 其中小于 2 km 约占 30%, 在 11 月中旬, 11 月下旬及 12 月上旬均出现了持续性的低能见度. 本文进一步给出了观测期间 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度以及 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的时间变化曲线[图 2(b)], 从图 2(b)中可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度为 $167 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最小值和最大值分别为 $17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $563 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值在 0.28 ~ 0.93 之间变化, 当低能见度时该比值非常大, 可以达到 0.7 以上, 甚至超过 0.90. 与其他城市冬季 PM 的均值进行对比发现, 2016 年冬季太原市无论是 PM_{10} 还是 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度都远高于其他城市, 同时也远高于太原 2013 年冬季的浓度水平; $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占的比例较高, 和其他城市的占比大致相当, 说明 2016 年冬季太原的气溶胶污染严重, 细粒子的含量丰富(表 2).

表 2 各地区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的平均值和 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$

地区	$\text{PM}_{2.5}$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM_{10} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$	文献
太原(2016 年)	167.0	249.0	0.67	本研究
北京(2012 年)	79.7	—	—	[24]
杭州(2014 年)	82.8	113.7	0.73	[25]
太原(2013 年)	69.7	134.4	0.52	[26]

图2 观测期间能见度、PM_{2.5}、PM₁₀和PM_{2.5}/PM₁₀逐小时变化曲线Fig. 2 Temporal variations of visibility, PM concentration, and PM_{2.5}/PM₁₀

2.2 霾天细粒子质量浓度特征

2016年太原冬季霾污染非常严重,其中重度、中度、轻度、轻微霾的频率分别为25.35%、9.75%、13%、16.9%。对比表3发现,霾天气时PM_{2.5}的平均质量浓度、PM_{2.5}/PM₁₀分别为209.45 μg·m⁻³和0.68,而非霾天气时分别为65.41 μg·m⁻³和0.56,前者分别是后者的3~4

倍和1.2倍。PM_{2.5}的平均质量浓度、PM_{2.5}/PM₁₀还会随着霾等级的增加而呈现迅速增大的特征,如重度霾时PM_{2.5}的质量浓度可以达到300 μg·m⁻³,PM_{2.5}/PM₁₀的比值可以增加至0.75,说明在霾天气时PM_{2.5}的质量浓度显著高于非霾天气,并且随着霾等级得增加,PM_{2.5}对霾污染贡献越来越大。

表3 不同等级霾污染对应的气溶胶、相对湿度和风速分布

Table 3 Distribution of PM concentration, relative humidity, and wind speed for different haze levels

项目	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	PM ₁₀ /μg·m ⁻³	PM _{2.5} /PM ₁₀	相对湿度/%	风速/m·s ⁻¹
非霾天气	65.41	116.86	0.56	38.86	2.44
霾天气	209.45	303.13	0.68	71.90	1.19
轻微霾	113.79	202.32	0.56	56.56	1.73
轻度霾	150.31	245.92	0.61	64.20	1.16
中度霾	196.64	283.77	0.69	69.47	1.08
重度霾	300.11	398.38	0.75	85.47	0.91

2.3 不同等级霾污染下的气象要素分布特征

观测期间霾天气时平均的相对湿度、风速和混合层高度分别为71%、1.19 m·s⁻¹和179 m,而非霾天气时则为38%、2.44 m·s⁻¹和487 m,说明霾天气主要发生在平均风速偏低、相对湿度偏高,混合层高度偏低的气象条件下。在这些气象条件的控制和影响下,造成霾污染天气的大气水平输送、垂直输送和扩散能力很差,较高的相对湿度能够促进气溶胶的增长,改变气态污染物非均相反应的环境,为一次颗粒物向二次颗粒物的转换提供适宜的条件^[27~29],在持续时间较长并且较差的气象条件下,容易造成气溶胶的累积,出现霾污染以及污染程度的增加。

PM_{2.5}质量浓度与风速和相对湿度存在显著的

相关关系(表4),其中与相对湿度呈显著的正相关关系而与风速呈现显著的负相关关系,这种相关关系在霾天气好于非霾天气,由此说明相对湿度和风速是影响PM_{2.5}质量浓度,特别是霾天气下PM_{2.5}质量浓度的重要气象要素。

在对霾污染时气象要素平均特征分析的基础上,接下来对不同等级霾污染时气象要素分布特征进行研究。首先给出了观测期间PM_{2.5}、能见度随相对湿度和风速的分布(图3),从图3中可以看出,风速一定时,PM_{2.5}的质量浓度会随着相对湿度的增加而增大,能见度则正好相反;而当相对湿度一定时,气溶胶质量浓度随着风速的增加而降低。PM_{2.5}质量浓度的最大值主要集中在风速低于3 m·s⁻¹、相对湿度高于80%的区域内,能见度最小

值也集中在这区域内. 总体来看, 每个 $PM_{2.5}$ 质量浓度的高值区都有低能见度区域与之对应, 表明当细粒子浓度相对偏高时, 会带来较低能见度的天气状况. 但是值得注意, 当相对湿度达到 80%, 风速为 $3 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 即使气溶胶质量浓度低于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 也会带来低能见度天气, 刘凡等^[30]认为这是由于 $PM_{2.5}$ 中的吸湿组分吸湿增长, 增强了对

光的散射作用导致的. 非霾天气主要出现在相对湿度低于 50%, 风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下, 此时 $PM_{2.5}$ 质量浓度较低. 同时从不同等级霾对应的相对湿度和风速的数值(表 3)可以看出, 随着霾等级的增加, 相对湿度逐渐增加, 风速逐渐减小, 即污染程度偏重的霾容易在相对湿度较高, 风速较小的条件下发生.

表 4 霾天与非霾天 PM 和气象要素的相关系数分布¹⁾

Table 4 Correlation between PM and meteorological factors for haze and non-haze

	温度	湿度	风速	$PM_{2.5}$	PM_{10}
温度	1.00	-0.40 *	0.40 *	0.00	-0.05
湿度	-0.16 *	1.00	-0.42 *	0.41 *	0.45 *
风速	-0.21 *	-0.22 *	1.00	-0.24 *	-0.32 *
$PM_{2.5}$	0.43 *	0.28 *	-0.23 *	1.00	0.93 *
PM_{10}	0.34 *	0.24 *	-0.20 *	0.92 *	1.00

1) 右上部为霾天的相关性, 左下部为非霾天的相关性; * 表示 0.05 水平上显著相关

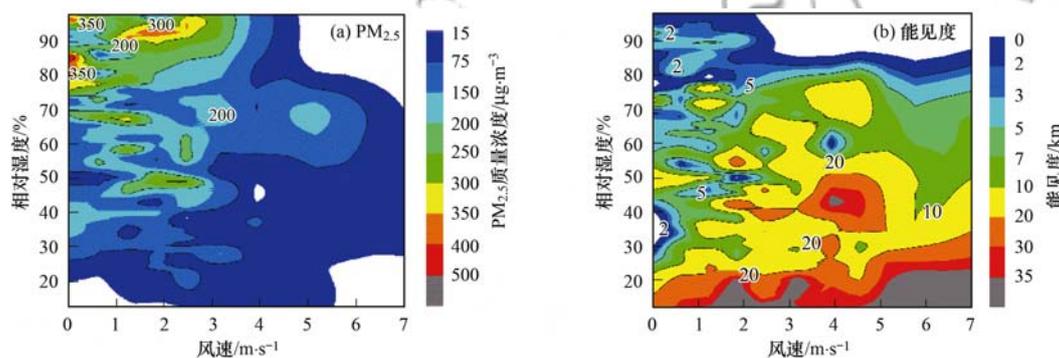


图 3 $PM_{2.5}$ 和能见度随风速和相对湿度等值线分布

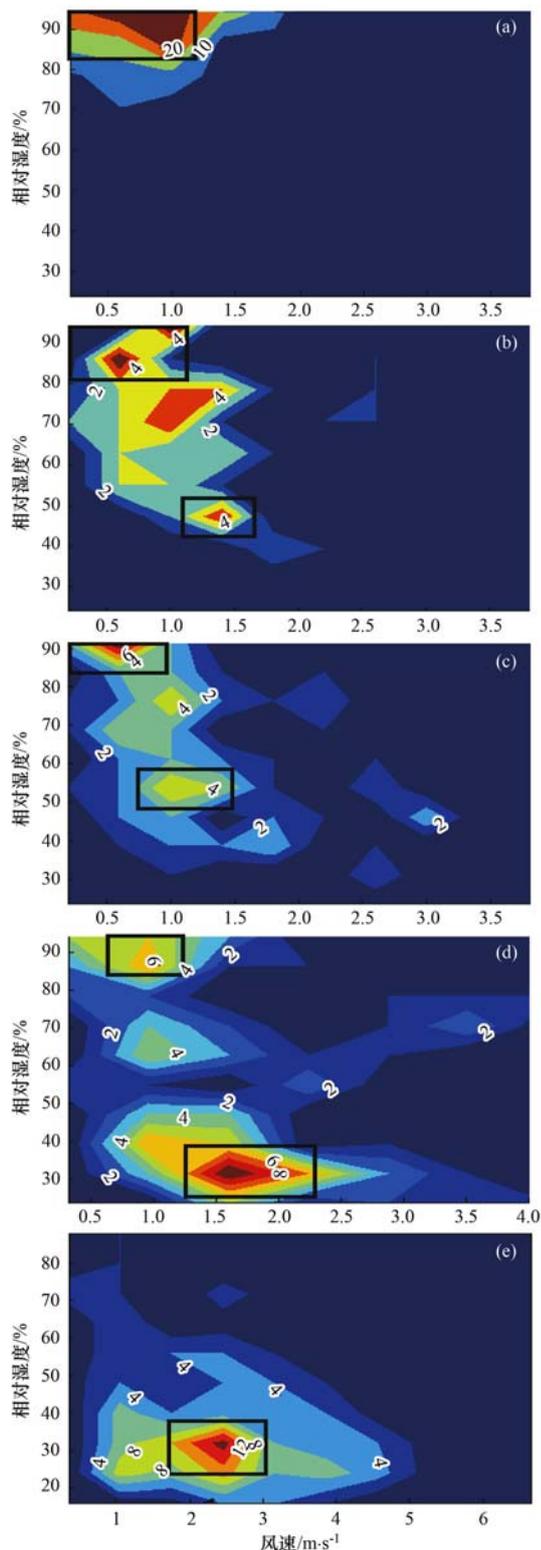
Fig. 3 $PM_{2.5}$ concentration and visibility with different wind speeds and relative humidities

为了进一步获得不同等级霾在不同风速和相对湿度下的频次分布, 本文给出了非霾天气与不同等级霾污染出现的频次随风速和相对湿度的分布(图 4). 经分析发现, 观测期间非霾和重霾出现的频次最高, 其中非霾天高频中心出现在相对湿度为 30%, 风速为 $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时; 而重霾天则主要出现在相对湿度高于 80%, 风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时; 中度霾和轻度霾的高频中心随风速和相对湿度呈现负指数关系, 即随着相对湿度的增加和风速的减小, 它们出现的频次随之增加; 轻微霾在低湿(相对湿度低于 60%)和高湿(相对湿度高于 80%), 并且风速较低时均出现高频中心, 其中在低湿时高频中心出现在相对湿度为 30% 附近, 高湿环境时其高频中心出现在风速低于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相对湿度大于 80% 时.

2.4 霾天气下 $PM_{2.5}$ 数浓度和表面积浓度谱分布特征

由公式(2)和(3)可以知道, 大气能见度与气溶胶粒子总表面积浓度呈现反相关的分布特征^[31]. 为了获得观测期间 $PM_{2.5}$ 影响霾污染的关键尺度谱特征, 本文分别选取高湿环境和低湿环境下不同等级霾污染高频中心(图 4 中黑框)的 $PM_{2.5}$ 的数浓度谱(图 5)和表面积浓度谱(图 6)进行了分析.

分析图 5 发现, 低湿($RH < 60\%$)和高湿($RH \geq 80\%$)环境下, 不同等级霾天气下气溶胶数浓度谱均为单峰型分布, 并且随着霾等级的增加, 气溶胶峰值数浓度普遍上升, 但存在一个特殊现象, 低湿背景下 $PM_{2.5}$ 峰值数浓度在中度霾天明显低于轻度霾天, 说明单纯从 $PM_{2.5}$ 数谱分布上并不能够很直观地获得 $PM_{2.5}$ 影响大气能见度的主要粒径范围. 同时从图 5 还可以看出, 低湿条件下气溶胶峰值粒



(a) 重度霾; (b) 中度霾; (c) 轻度霾; (d) 轻微霾; (e) 非霾
图 4 不同等级霾与非霾发生的频次随风速和相对湿度的分布

Fig. 4 Frequency distribution of different levels of haze and non-haze with different wind speeds and relative humidities

径随着霾污染程度的增加而增大, 而高湿条件下细粒子峰值粒径则集中出现在 $0.8 \mu\text{m}$ 附近.

为了获得气溶胶影响霾的关键尺度分布特征,

给出了 $PM_{2.5}$ 表面积浓度谱分布 (图 6). 由图 6 可以看出, 观测期间 $PM_{2.5}$ 表面积浓度主要集中在粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 范围内, $PM_{1.0}$ 表面积浓度约占 $PM_{2.5}$ 表面积浓度的 98%. 低湿和高湿环境中 $PM_{2.5}$ 表面积浓度谱均呈双峰分布, 第一峰值中心位于 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$, 第二峰值中心位于 $0.6 \mu\text{m}$ 附近. 低湿时, 随着霾等级的增加两个峰值中心对应的峰值表面积浓度迅速增加, 特别是第一峰值中心; 而高湿环境下, 从轻微霾发展到中度霾, 第一峰值中心对应的峰值表面积浓度会随着霾等级的增加而迅速增高, 但是第二峰值中心对应的峰值表面积浓度并没有明显变化, 基本维持在 $2000 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 附近, 说明高湿环境下影响中度及以下等级霾的气溶胶为 $PM_{0.5}$, 而低湿环境下则为 $PM_{1.0}$. 观测期间重度霾只发生在高湿的环境中, 此时两个峰值中心的表面积浓度远远高于其他等级霾对应的浓度, 第二峰值表面积浓度达到了 $4000 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$, 说明影响重霾的气溶胶粒子为 $PM_{1.0}$.

对比图 6 还发现, 对于轻微霾、轻度霾和中度霾而言, 当霾等级相同时, 第一峰值中心对应的峰值表面积浓度在低湿环境中的数值要明显高于高湿环境中的数值, 该差异基本随着霾等级的增加而增大, 其中轻微霾、轻度霾和中度霾时表面积浓度的变化率分别为 -18.4% 、 -36.5% 和 -32.7% (表 5); 在第二峰值中心附近 ($0.5 \mu\text{m} \leq D \leq 1 \mu\text{m}$), 轻度霾和中度霾时粒子的表面积浓度也呈现出高湿时表面积浓度比低湿时偏低特征; 同时从表 5 还可以发现, 重度霾时的 $PM_{1.0}$ 表面积浓度与低湿环境下中度霾时的 $PM_{1.0}$ 表面积浓度大致相当. 综上所述, 在不同的相对湿度下形成相同等级的霾时, 气溶胶影响霾的机制是不同的, 其中低湿时气溶胶的表面积浓度是影响霾形成的主要因素, 而高湿时气溶胶影响不同等级霾的具体机制还需要进一步探讨.

从气溶胶 Mie 散射理论出发, 由公式 (2) 可知消光效率因子是除表面积浓度外, 影响气溶胶消光系数的另一关键因子^[31], 在高湿环境下形成与低湿环境下相同等级的霾时, 高湿环境下气溶胶粒子表面积浓度对能见度的贡献率下降, 其消光效率因子的贡献率则会上升. 而对可见光来说, 消光效率因子是复折射指数、粒子直径的函数. 观测期间, 高湿环境下气溶胶的吸湿增长使得粒子尺度变大, 进而增大气溶胶的消光效率因子; 另一方面, 由于吸收的水分所具有的复折射指数相比其他气溶胶组分要偏小, 造成其复折射指数的降低, 从而减小其

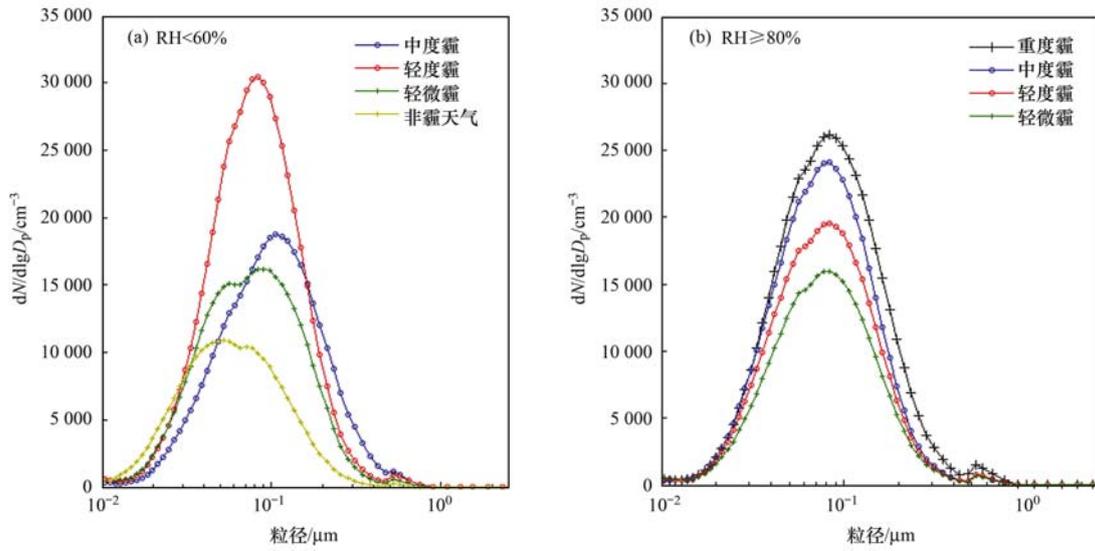


图 5 不同等级霾天气 PM_{2.5} 数浓度谱分布

Fig. 5 PM_{2.5} number concentration distribution for different haze levels

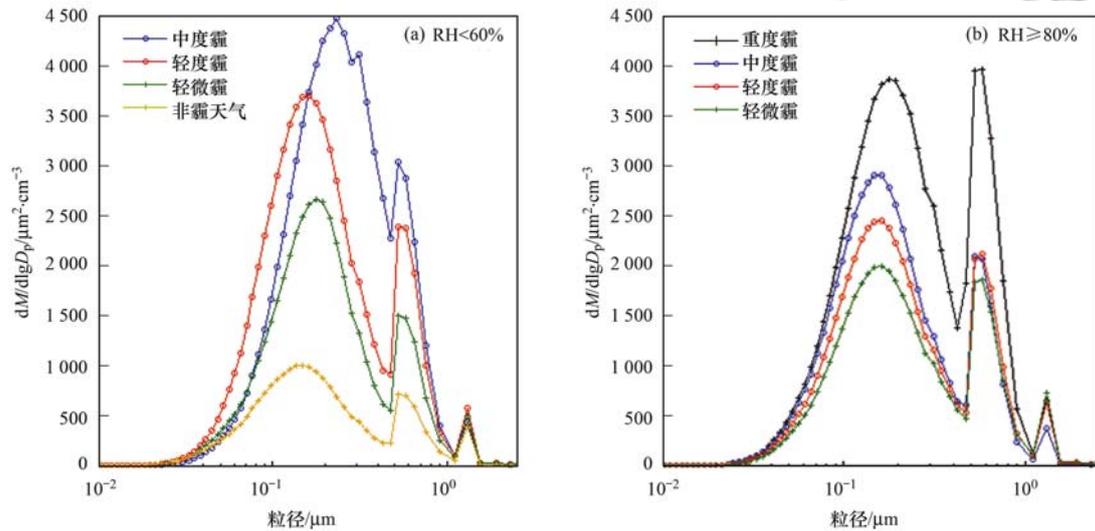


图 6 不同等级霾天气 PM_{2.5} 表面积浓度谱分布

Fig. 6 PM_{2.5} surface concentration distribution for different haze levels

表 5 低湿和高湿环境下不同等级霾对应的 PM_{2.5} 关键粒径段表面积浓度及变化率¹⁾

Table 5 PM_{2.5} surface concentration of key size components and the rate of change under different haze levels

with high relative humidity and low relative humidity

项目	$D \leq 0.5 \mu\text{m}$			$0.5 \mu\text{m} \leq D \leq 1 \mu\text{m}$			$D \geq 1 \mu\text{m}$		
	低湿 表面积浓度	高湿 表面积浓度	变化率 /%	低湿 表面积浓度	高湿 表面积浓度	变化率 /%	低湿 表面积浓度	高湿 表面积浓度	变化率 /%
轻微霾	38.1	31.1	-18.4	5.3	6.5	22.6	43.4	37.6	-13.4
轻度霾	57.8	37.5	-36.5	8.1	7.4	-8.6	65.9	44.9	-31.9
中度霾	65.9	44.3	-32.7	9.9	6.9	-30.3	75.9	51.2	-32.5
重度霾	—	61.8	—	—	13.7	—	—	75.6	—

1) 表面积浓度单位: $\times 10^3 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$; 变化率: 高湿时的粒子表面积浓度与低湿时粒子表面积浓度之差再除以低湿时粒子表面积浓度, 再乘以 100%

消光效率因子^[32]. 然而, 由于气溶胶尺度增大所引起
的消光增强作用要显著强于由于复折射指数减小

所造成的消光减弱效应, 因此这总体上会使得气溶胶
的消光能力增强. 综上所述, 高湿时出现相同等

级的霾污染, 粒子尺度参数的增加作用显著, 是造成高湿时 PM_{2.5}影响霾污染的主要因素。

3 结论

(1) 观测期间霾频发, 以重度霾为主。霾天气下气溶胶以细粒子为主, PM_{2.5}平均质量浓度高达 209.45 μg·m⁻³, PM_{2.5}/PM₁₀均值为 0.68。

(2) 观测期间非霾和重霾出现的频次最高, 重霾的高频中心位于风速小于 1.5 m·s⁻¹、相对湿度高于 80% 的区域; 非霾的高频频次中心出现在风速为 2~3 m·s⁻¹, 相对湿度为 30% 时; 轻微霾、轻度霾和中度霾在高湿和低湿环境下均有高频中心。

(3) 低湿环境下 PM₁ 是影响霾污染的关键粒子; 高湿环境下 PM_{0.5} 是影响轻微霾、轻度霾和中度霾的关键粒子, 而影响重度霾的关键粒子则是 PM₁。

(4) 高湿环境下轻微霾、轻度霾和中度霾的 PM₁ 表面积浓度明显低于低湿环境时同等级霾的 PM₁ 表面积浓度, 其中轻度霾和中度霾表面积浓度的第一和第二峰值都有明显下降。

(5) 高湿环境下气溶胶表面积浓度对能见度的贡献率下降, 但是气溶胶通过吸湿增长增大了粒子尺度, 导致消光效率因子增大, 从而弥补了表面积浓度的不足。粒子尺度参数的增加是高湿时 PM_{2.5} 影响霾污染的重要因素。

参考文献:

- [1] 高歌. 1961-2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(7): 761-768.
Gao G. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961-2005[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(7): 761-768.
- [2] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960~2013 年我国霾污染的时空变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3237-3248.
Fu C B, Tang J X, Dan L, et al. Temporal and spatial variation of haze pollution over china from 1960 to 2013 [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3237-3248.
- [3] 曹玲娟, 耿红, 姚晨婷, 等. 太原市冬季灰霾期间大气细颗粒物化学成分特征[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 837-843.
Cao L X, Geng H, Yao C T, et al. Investigation of chemical compositions of atmospheric fine particles during a wintertime haze episode in Taiyuan city[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(4): 837-843.
- [4] 花丛, 张碧辉, 张恒德. 2013 年 1-2 月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J]. 气象, 2015, **41**(9): 1144-1151.
Hua C, Zhang B H, Zhang H D. Analysis on boundary layer characteristics in fog and haze processes in north China from January to February 2013[J]. Meteorological Monthly, 2015, **41**(9): 1144-1151.
- [5] 徐晓斌. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, **27**(5): 604-619.
Xu X B. Observational study advances of haze and photochemical pollution in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, **27**(5): 604-619.
- [6] Yang Y, Liu X G, Qu Y, et al. Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013 [J]. Atmospheric Research, 2015, **155**: 192-203.
- [7] 王利朋, 马嫣, 郑军, 等. 2013 年 1 月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 816-824.
Wang L P, Ma Y, Zheng J, et al. Aerosol optical properties in the northern suburb of Nanjing during haze days in January 2013 [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 816-824.
- [8] 吴丹, 蒯少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2656-2666.
Wu D, Lin S L, Yang H Q, et al. Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of PM_{2.5} in Hangzhou [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [9] 杨洋, 王红磊, 侯雪伟, 等. 石家庄一次持续性霾过程形成原因及气溶胶垂直探空分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(3): 824-832.
Yang Y, Wang H L, Hou X W, et al. Characteristics and formation mechanism of a long-term haze episode and the vertical distribution of aerosol concentration in Shijiazhuang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(3): 824-832.
- [10] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 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.
Zhao X J, Pu W W, Meng W, et al. PM_{2.5} pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing area [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 416-423.
- [11] Parkhurst W J, Tanner R L, Weatherford F P, et al. Historic PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations in the southeastern United States—potential implications of the revised particulate matter standard [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1999, **49**(9): 1060-1067.
- [12] Guo S, Hu M, Zamora M L, et al. Elucidating severe urban haze formation in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [13] Marcazzan G M, Ceriani M, Valli G, et al. Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in Milan (Italy) using receptor modelling [J]. Science of the Total Environment, 2003, **317**(1-3): 137-147.
- [14] Wang Y S, Li Y, Wang L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 14-25.
- [15] 吴蒙, 范绍佳, 吴兑, 等. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1409-1415.
Wu M, Fan S J, Wu Y, et al. Characteristics and influence factors study of haze and cleaning weather over Guangzhou area

- [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(8): 1409-1415.
- [16] 赵子菁, 魏永杰, 张祥志, 等. 南京市霾天气与主要气象条件的相关分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3570-3580.
- Zhao Z J, Wei Y J, Zhang X Z, *et al.* The correlation analysis of Nanjing haze days and meteorological factors [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3570-3580.
- [17] 于兴娜, 马佳, 朱彬, 等. 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[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1919-1925.
- Yu X N, Ma J, Zhu B, *et al.* Effects of relative humidity and aerosol physicochemical properties on atmospheric visibility in northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1919-1925.
- [18] 尚倩, 李子华, 杨军, 等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- Shang Q, Li Z H, Yang J, *et al.* Size distributions of aerosol particles and the impact on visibility in winter of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- [19] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. *气象学报*, 2002, **60**(2): 230-237.
- Zhang L S, Shi G Y. The impact of relative humidity on the radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(2): 230-237.
- [20] 刘红年, 朱焱, 林惠娟, 等. 基于自动站资料的苏州灰霾天气分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 668-675.
- Liu H N, Zhu Y, Lin H J, *et al.* Observation and analysis of haze characteristics in Suzhou based on automatic station data [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3): 668-675.
- [21] 庄智一. 上海地区霾的统计分析研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [22] Mie G. Beitrage zur Optik truber medien, speziell kolloidaler metallosungen[J]. *Annals of Physics*, 1908, **330**(3): 377-445.
- [23] 麦卡特尼. 大气光学[M]. 潘乃先译. 北京: 科学出版社, 1988. 293-298.
- [24] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 北京市PM_{2.5}和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 829-837.
- Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and PM_{2.5} in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 829-837.
- [25] 于洲, 刘寿东, 王咏薇, 等. 杭州市2014年城区大气污染物浓度变化特征观测分析[J]. *科学技术与工程*, 2016, **16**(16): 95-104.
- Yu Z, Liu S D, Wang Y W, *et al.* Observation of atmospheric pollutants in the urban area of Hangzhou[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, **16**(16): 95-104.
- [26] 王浩宇, 王三平, 郭志明, 等. 太原市PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂和CO冬夏两季污染特征研究[J]. *环境与可持续发展*, 2014, **39**(6): 167-170.
- Wang H Y, Wang S P, Guo Z M, *et al.* Study on PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ and CO pollution characteristics in winter and summer in Taiyuan[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2014, **39**(6): 167-170.
- [27] 徐虹, 肖致美, 孔君, 等. 天津市冬季典型大气重污染过程特征[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1239-1246.
- Xu H, Xiao Z M, Kong J, *et al.* Characteristic of atmospheric heavy pollution episodes in Winter of Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1239-1246.
- [28] Xu L L, Duan F K, He K B, *et al.* Characteristics of the secondary water-soluble ions in a typical autumn haze in Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 296-305.
- [29] Wang L, Ji D S, Li Y, *et al.* The impact of relative humidity on the size distribution and chemical processes of major water-soluble inorganic ions in the megacity of Chongqing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **192**: 19-29.
- [30] 刘凡, 谭钦文, 江霞, 等. 成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1466-1472.
- Liu F, Tan Q W, Jiang X, *et al.* Effect of relative humidity on particulate matter concentration and visibility during winter in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1466-1472.
- [31] 陶宗明, 张寅超, 张改霞, 等. 气溶胶粒子消光效率因子的特性研究及尺度谱的拟合[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(1): 103-109.
- [32] 陈静, 赵春生. 大气低能见度的影响因子分析及计算方法综述[J]. *气象科技进展*, 2014, **4**(4): 44-51.
- Chen J, Zhao C S. A Review of influence factors and calculation of atmospheric low visibility [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2014, **4**(4): 44-51.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)