

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征

胡凌飞¹, 张柯¹, 王洪宝², 李娜¹, 王洁¹, 杨文慧¹, 殷喆¹, 焦周光¹, 温占波^{1*}, 李劲松^{1*}

(1. 军事医学科学院微生物流行病学研究所, 病原微生物生物安全国家重点实验室, 北京 100071; 2. 军事医学科学院实验动物中心, 北京 100071)

摘要: 于2013年1月8日~2013年2月4日雾霾频繁暴发期间, 使用定量空气微生物采样器和气溶胶粒谱测试仪测试并比较了雾霾天和之后的晴朗天气下细菌、真菌气溶胶浓度变化、粒谱分布及不同粒径大小颗粒物的数量浓度差异和粒谱分布特征。结果表明, 采样周期内真菌气溶胶小于5 μm 的粒子(可吸入肺粒子)所占百分比显著高于细菌气溶胶小于5 μm 的粒子百分比。雾霾过后的晴朗天气下细菌、真菌气溶胶浓度高于雾霾天气时的浓度, 而颗粒物浓度则相反。无论雾霾天或晴朗天微生物气溶胶的粒谱分布无显著差别, 空气中的颗粒物以PM_{1.0}占绝大多数。

关键词: 雾霾; 细菌气溶胶; 真菌气溶胶; 粒径分布; 颗粒物

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3144-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.004

Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing

HU Ling-fei¹, ZHANG Ke¹, WANG Hong-bao², LI Na¹, WANG Jie¹, YANG Wen-hui¹, YIN Zhe¹, JIAO Zhou-guang¹, WEN Zhan-bo^{1*}, LI Jin-song^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pathogen and Biosecurity, Institute of Microbiology and Epidemiology, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China; 2. Laboratory Animal Center of Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China)

Abstract: In this study, we evaluated the bacterial, fungal aerosol concentration, and particle size distribution using microbiological aerosol sampler, and analyzed the particles count concentration of PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM_{5.0} and PM_{10.0} using aerodynamic particle sizer during clear and haze days in Beijing during Jan 8th, 2013 to Feb 4th, 2013. The concentration of bacterial, fungal aerosol, air particulate matter and aerosol distribution were compared between haze days and clear days. Our results indicated that the proportion of fungal particles smaller than 5 micron, which could deposit in lungs or deeper regions, was much higher than bacterial particles. The biological concentration of bacteria and fungi were higher in clear days than in haze days, and there was no statistic difference of the microbiological aerosol distribution. The concentration of air particulate matter were higher in haze days than in clear days, PM_{1.0} was the main particulate matters both in clear days and haze days.

Key words: haze; airborne bacteria; airborne fungi; size distribution; particulate matter(PM)

2013年1月以来,北京地区雾霾天气频发,引起了社会公众的普遍关注^[1,2]。雾霾是一种大气污染状态,是对悬浮于大气中的各种颗粒物(particulate matter, PM)含量超标的笼统表述,悬浮颗粒物作为主要的空气污染物,对人体健康的影响是深远的^[3~5]。2010年中国的室外空气污染导致123万人过早死亡,几乎占全球此类死亡的40%,颗粒物污染已成为导致死亡的第四大危险因素^[6]。我国陈仁杰等^[7]评价了大气可吸入颗粒物污染对我国113个主要城市的居民健康影响,并粗略估算了相关的健康经济损失,折算成货币约为3 414.03亿元。悬浮颗粒物成分非常复杂,包括空气中的灰尘,碳质成分,各种化学元素,有机物质,还有空气中的微生物。空气微生物是以气溶胶的形式而存在,包

括细菌、真菌、病毒、孢子、细胞碎片等生物性粒子^[8]。微生物气溶胶对人体健康的危害与其种类、浓度和粒径大小都有很大的关系,因而测定和研究微生物气溶胶浓度及其粒径分布对维护人类健康和环境污染治理都有重要的理论和现实意义。目前,国内外关于空气微生物群落结构、浓度和粒径分布等已有一些研究^[9~11],来自清华大学的研究人员利用宏基因组的方法分析了北京严重雾霾期间颗粒物中的微生物类型^[12],武丽婧^[13]研究了雾霾天对青

收稿日期: 2015-01-29; 修订日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205102)

作者简介: 胡凌飞(1981~),女,硕士研究生,实验师,主要研究方向为军事预防医学和生物安全学, E-mail: huling03@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wenzhanbo@yeah.net; Lij-s@163.com

岛及黄海生物气溶胶微生物群落结构和物种组成的影响,高敏等^[19]考察了北京不同程度雾霾天生物气溶胶浓度和粒径特征. 本文着重研究了雾霾天和之后的晴朗天气下可培养细菌和真菌气溶胶和不同粒径颗粒物的浓度变化及其粒谱分布特征.

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

采样地点位于北京市朝阳区中国环境科学研究院内大气环境研究所楼顶(40.03°N, 116.39°E, 距离地面垂直距离约 15 m), 周边无明显大气污染物排放源. 采样时间为 2013 年 1 月 8 日~2013 年 2 月 4 日, 每天采样 3 次, 采样时间段分别为上午 08:30~09:30, 中午 12:30~13:30, 下午 16:30~17:30.

1.2 空气微生物气溶胶浓度测试

Andersen 六级采样器(青岛众瑞)用于生物气溶胶的采样, 该仪器是模拟人体呼吸道的解剖结构和空气动力学特征, 采用惯性撞击的原理设计制造, 特点是对空气微生物的捕获率高, 并能同时测定粒子大小分布. 空气粒子按大小采集到各级培养皿上, 第一级采样粒径 >7.0 μm, 第二级采样粒径 4.8~7.0 μm, 第三级采样粒径 3.4~4.7 μm, 第四级采样粒径为 2.1~3.3 μm, 第五级采样粒径为 1.1~2.0 μm, 第六级采样粒径为 0.6~1.0 μm^[14]. 采样流量 28.3 L·min⁻¹, 采样时间 5 min.

空气细菌采样用普通琼脂培养基(广东环凯), 真菌采样用沙氏培养基(广东环凯), 灭菌后在无菌条件下倒入平皿(90 mm)中. 细菌采样平板放入 37℃ 恒温箱中培养 48~72 h, 真菌采样与细菌采样同步进行, 采样平板放入 26℃ 恒温箱中培养 48~96 h. 培养后进行菌落计数并按文献[14]校正.

1.3 空气微生物气溶胶粒谱的测试

根据每天每次采样后各级采样平板培养的细菌、真菌菌落计数, 得到整个采样周期内细菌、真菌气溶胶的粒谱分布.

1.4 空气中各种粒径颗粒物数量浓度

TSI 3321 气溶胶粒径测试仪是利用双束激光粒径测量原理测量气溶胶粒子的粒径, 它拥有一体化测量系统能在测粒径的同时分析给出气溶胶粒子的数量浓度随粒径的分布情况, 测量粒径范围为 0.5~20 μm^[15]. 利用 TSI 3321 检测的数据在不同粒径范围内的累加即得到不同大小颗粒物 PM_{1.0}(直径 ≤1.0 μm 的颗粒物)、PM_{2.5}(直径 ≤2.5 μm 的颗粒

物)、PM_{5.0}(直径 ≤5.0 μm 的颗粒物)和 PM_{10.0}(直径 ≤10.0 μm 的颗粒物)的数量浓度和粒径分布.

1.5 数据计算及分析

根据校正后各级菌落数的数量计算微生物气溶胶浓度和各级带菌粒子的百分比, 具体计算方法如下:

$$c = \frac{1000T}{t \times F}$$

$$P = \frac{n}{T} \times 100\%$$

式中, c 为微生物气溶胶浓度, CFU·m⁻³; T 为校正后 6 级总菌落数; t 为采样时间, min; F 为空气流量, L·min⁻¹; P 为各级带菌粒子百分比; n 为校正后各级菌落数.

采用 SPSS 10.0 进行统计学分析.

2 结果与分析

2.1 细菌和真菌气溶胶日均浓度变化

PM_{2.5}(air quality index, AQI) 目前作为一个常用的空气质量指数被用于表示空气污染程度. 根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633-2012)将空气质量划分为六个级别, 指数越大, 级别越高, 说明污染越严重. 采样期间有两次明显的持续的雾霾天, 一次在 1 月 21~23 日, 查询当时的 PM_{2.5}(AQI)为 124~399, 属于轻度到严重污染; 1 月 28~31 日的 PM_{2.5}(AQI)为 221~447, 属于重度到严重污染, 而 1 月 24 日和 2 月 1 日的 PM_{2.5}(AQI)分别为 68、58, 空气质量优良.

以采样期内的每天上午、中午和下午这 3 次采样的平均浓度作为空气中细菌和真菌气溶胶的日均浓度(CFU·m⁻³), 变化曲线如图 1 所示, 浓度高峰值均在 500 CFU·m⁻³ 左右, 浓度最低值在 50 CFU·m⁻³ 左右. 由图 1 可以看出在 1 月 21~23 日和 1 月 28~31 日这两次雾霾天气时细菌和真菌气溶胶浓度都处于较低的水平, 而之后 1 月 24 日和 2 月 1 日细菌和真菌气溶胶的浓度有明显上升趋势. 进一步取雾霾天和晴朗天的气溶胶日均浓度的平均值进行比较, 在 1 月 21~23 日和 1 月 28~31 日期间, 细菌气溶胶平均浓度为 118 CFU·m⁻³, 真菌气溶胶平均浓度为 111 CFU·m⁻³; 1 月 24 日和 2 月 1 日细菌气溶胶平均浓度为 325 CFU·m⁻³, 真菌气溶胶平均浓度为 173 CFU·m⁻³, 晴朗天气时细菌和真菌气溶胶浓度明显高于雾霾天气时的浓度(P 值均小于 0.05).

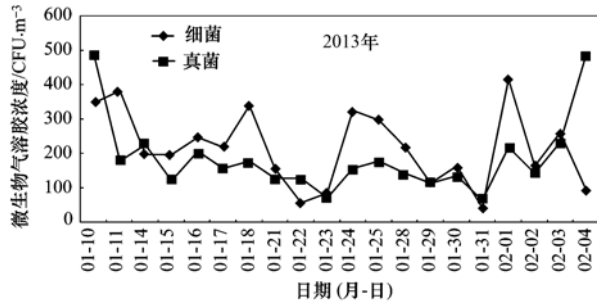


图1 采样周期内细菌、真菌日均浓度的变化规律

Fig. 1 Daily average aerosol concentration of the bacterial and fungal during sampling time

2.2 细菌和真菌气溶胶粒谱分布

对采样周期内每天的空气细菌、真菌气溶胶各级粒子百分比取平均值,得到空气细菌、真菌气溶胶的粒谱分布如图2和图3所示。小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子为可吸入肺脏的粒子^[20],Aderson采样除第一和第二级外所采的粒子均小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。由图2和图3可得出,细菌气溶胶大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子百分比为44.8%,小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子为55.2%;真菌气溶胶大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子百分比为23.5%,小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子为76.5%,真菌气溶胶可吸入肺脏的粒子数所占的百分比明显高于细菌气溶胶粒子所占的百分比($P < 0.05$)。

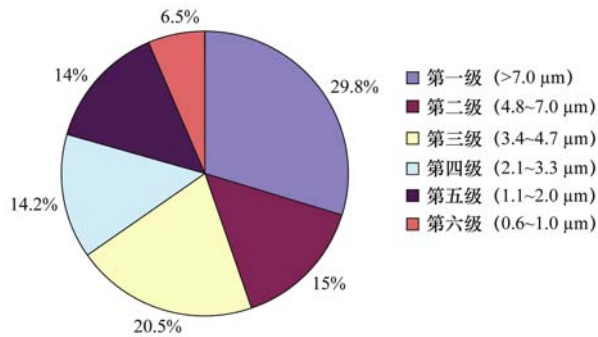


图2 细菌气溶胶粒谱分布

Fig. 2 Size distribution of bacterial aerosol particle

还考察了雾霾天和之后的晴朗天气下空气细菌和真菌气溶胶粒谱的变化。雾霾污染时细菌气溶胶粒谱分布如图4所示,小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的细菌气溶胶为57.9%,之后晴朗天气的细菌气溶胶粒谱分布如图5所示,小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的细菌气溶胶为54.3%,差异不显著($P > 0.05$)。同样在雾霾天和之后的晴朗天真菌气溶胶粒谱分布如图6和图7所示,小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 真菌气溶胶百分比分别为80.4%和74.3%,差异不显著($P > 0.05$)。

2.3 各粒径颗粒物日均数量浓度和粒谱分布

采样周期内, $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{5.0}$ 和 $\text{PM}_{10.0}$ 的日

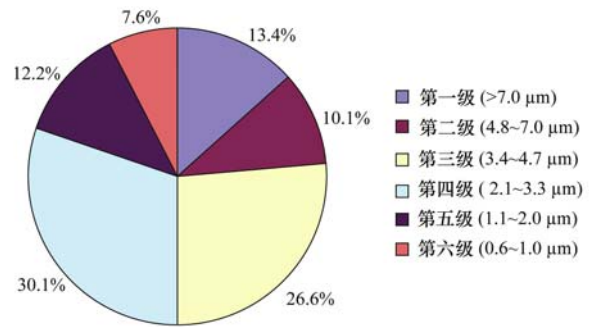


图3 真菌气溶胶粒谱分布

Fig. 3 Size distribution of fungal aerosol particle

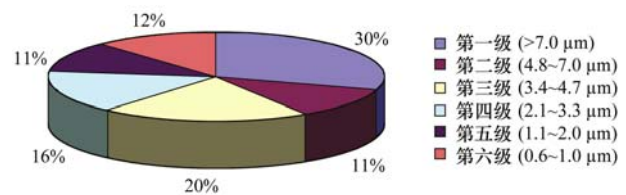


图4 雾霾天细菌气溶胶的粒谱分布

Fig. 4 Bacterial aerosol particle size distribution during haze days

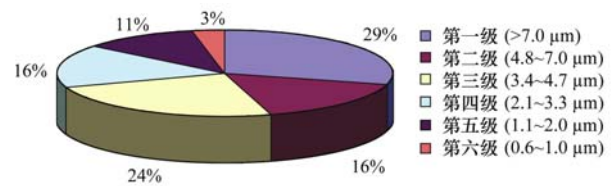


图5 晴朗天气中细菌气溶胶的粒谱分布

Fig. 5 Bacterial aerosol particle size distribution during sunshine weather

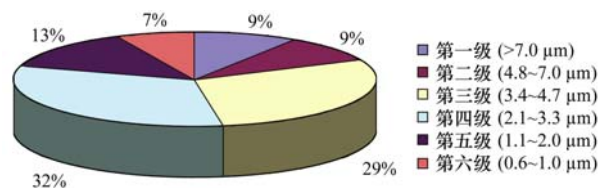


图6 雾霾天气中真菌气溶胶的粒谱分布

Fig. 6 Fungal aerosol particle size distribution during haze days

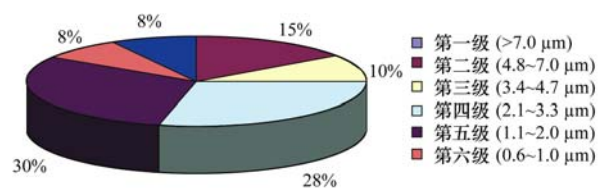


图7 晴朗天气中真菌气溶胶的粒谱分布

Fig. 7 Fungal aerosol particle size distribution during sunshine weather

均数量浓度如图 8 所示. 结合图 1 可以看出, 在 1 月 21~23 日和 1 月 28~31 日两次雾霾天气下的颗粒物数量浓度处于较高水平, 而细菌、真菌气溶胶

浓度都处于较低的水平; 之后的 1 月 24 日和 2 月 1 日是晴朗天气, 颗粒物数量浓度处于较低水平, 细菌和真菌气溶胶浓度处于较高水平.

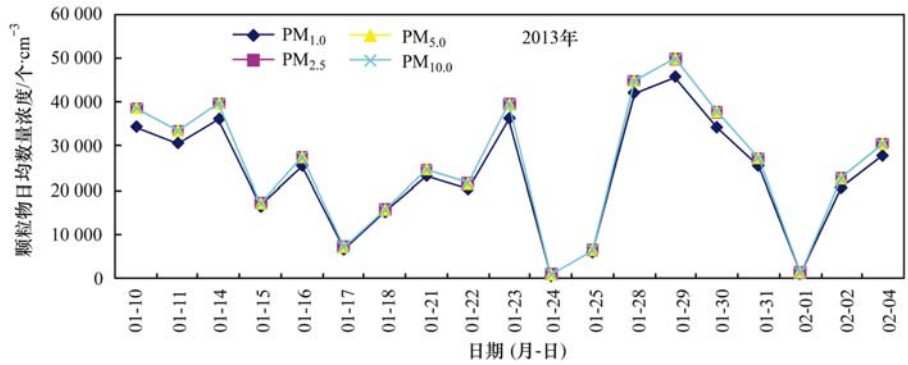


图 8 采样周期中各粒径颗粒物日均数量浓度

Fig. 8 Daily average concentrations of different particulate matters during sampling time

在 1 月 29 日严重雾霾天 [$PM_{2.5}$ (AQI) > 300] 时, $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{5.0}$ 和 $PM_{10.0}$ 数量浓度明显高于天气晴朗(2 月 1 日)时, 约为天气晴朗时的 37 倍(如图 9). 无论雾霾天或晴朗天, 各粒径颗粒物数量浓度之间做方差分析, 差异不显著 ($P > 0.05$). 图 10 和图 11 为 1 月 29 日和 2 月 1 日 TSI 3321 气溶胶粒径测试仪测得的不同粒径粒子分布, 纵坐标粒子的对数分布 ($dN/d\lg D_p$) 也是一种微粒浓度单位的表示法.

3 讨论

生物气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 对空气质量和人体健康有很大影响. 本研究在雾霾频发的北京冬季采样约一个月的时间, 考察了雾霾天和雾霾之后的晴朗天气时细菌和真菌气溶胶和不同粒径颗粒物的浓度变化及其粒谱分布特征.

研究结果表明细菌、真菌的日均最高的浓度约为 $500\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 绝对浓度值处于较低水平, 有研究表明空气细菌浓度夏季和秋季较高, 春季和冬季较

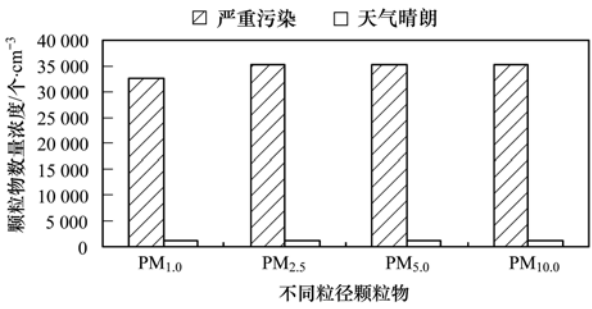


图 9 雾霾天和晴朗天各粒径颗粒物数量浓度

Fig. 9 Concentrations of count numbers of different particulate matters in haze day and clear day

低, 说明空气中可培养微生物浓度有季节分布特征, 因不同地区的不同气象条件而存在明显差异^[16,17]. 细菌和真菌气溶胶浓度随着颗粒物浓度的增加而降低, 这与以往关于细菌气溶胶浓度与空气颗粒物浓度正相关的报道有所不同^[18], 但与高敏等^[19]在 2013 年 1~7 月的采样研究结果一致, 作者认为可能与雾霾天空气颗粒物中含有大量的有毒有害物质有关. 另外, 可能由于晴朗天气时人们外出活动相

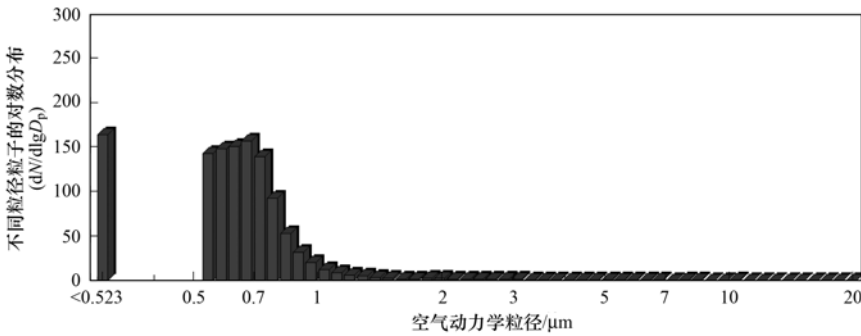


图 10 2 月 1 日晴朗天颗粒物的粒谱特征

Fig. 10 Characteristic of particulate spectrum in a sunshine day (February 1)

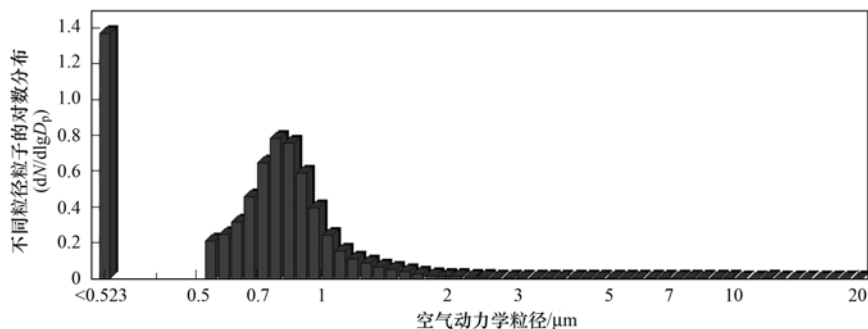


图 11 1 月 29 日雾霾天颗粒物的粒谱特征

Fig. 11 Characteristic of particulate spectrum in a haze day (January 29)

对更加频繁,促使了微生物气溶胶浓度的升高。

空气颗粒物不同粒径的粒子会沉降在人体呼吸道的不同位置,如 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 的粒子可进入鼻腔和上呼吸道; $6 \sim 10 \mu\text{m}$ 的粒子能沉着在小支气管内; $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的粒子可进入肺深处^[20],采样周期内包括雾霾天和晴朗天,真菌气溶胶小于 $5 \mu\text{m}$ 粒子,即可吸入肺脏的粒子数所占的百分比明显高于细菌气溶胶粒子所占的百分比,这可能是因为细菌通常附着在颗粒物表面,所以通常粒径较大,而真菌孢子大多是单独浮游在空气中^[22]。真菌孢子可以通过呼吸道进入人体,尤其是真菌小粒子能够引起真菌性疾病,对身体造成危害^[23]。整体来看,细菌气溶胶分布较多的是第一级、第二级和第三级,即大于 $5 \mu\text{m}$ 的粒子居多,而真菌气溶胶粒子不同于细菌粒子,主要分布在第三级和第四级,即粒径范围在 $2.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 的粒子居多,呈正态分布,这与以往报道相似^[24~26]。统计学分析,雾霾天和之后的晴朗天气细菌、真菌气溶胶的粒谱分布特征差异不显著,说明这两种天气状况对细菌、真菌气溶胶粒径分布没有明显的影响。

空气颗粒物数量浓度监测表明雾霾天气时,各粒径大小不同的颗粒物数量浓度均显著高于天气晴朗时,正是由于这些颗粒物的数量增加引发了雾霾现象。方差分析 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{5.0}$ 和 $\text{PM}_{10.0}$ 数量浓度两两之间差异不显著,因为 $\text{PM}_{1.0}$ 是指直径 $\leq 1.0 \mu\text{m}$ 的颗粒物、 $\text{PM}_{2.5}$ 是直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, $\text{PM}_{2.5}$ 包含了 $\text{PM}_{1.0}$ 的颗粒物,差异不显著说明范围在 $1.0 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 之间的颗粒并不多,同理 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{5.0}$ 和 $\text{PM}_{10.0}$ 数量浓度两两之间差异不显著就说明无论雾霾天还是晴朗天,空气中的粒子都以小粒子为主,即 $\text{PM}_{1.0}$ 的颗粒物数量占绝对优势,而粒子粒径越小,进入人体呼吸道部位就越深,对人体的危害就越大^[21]。有研究认为雾霾天气

时空气中小粒径颗粒物可聚集形成大粒径颗粒物^[27],但可能也与环境温湿度有关^[19]。因此要更详细准确地了解环境条件对空气微生物和不同粒径颗粒物的浓度及粒径分布的影响还需长期监测加大样本量,并分析各种环境气象因素的影响。

4 结论

(1)采样周期内真菌气溶胶小于 $5 \mu\text{m}$ 的粒子(可吸入肺脏的粒子)所占的比例显著高于细菌气溶胶小于 $5 \mu\text{m}$ 的粒子。

(2)细菌、真菌气溶胶浓度在晴朗天气时较高,而颗粒物浓度在雾霾天时较高。

(3)无论雾霾天和晴朗天,空气中 $\text{PM}_{1.0}$ 颗粒物的数量占绝大多数。

致谢:感谢中国环境科学研究院高健研究员在采样过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Ouyang Y. China wakes up to the crisis of air pollution[J]. The Lancet Respiratory Medicine, 2013, 1(1): 12.
- [2] Zhang J F, Mauzerall D L, Zhu T, et al. Environmental health in China: Progress towards clean air and safe water[J]. The Lancet, 2010, 375(9720): 1110-1119.
- [3] Valavanidis A, Fiotakis K, Vlachogianni T. Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part C: Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews, 2008, 26(4): 339-362.
- [4] Cao J J, Xu H M, Xu Q, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(3): 373-378.
- [5] Pope C A, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. The Journal of the American Medical Association, 2002, 287(9): 1132-1141.

- Association, 2002, **287**(9): 1132-1141.
- [6] Lozano R, Naghavi M, Foreman K, *et al.* Global and regional mortality from 235 causes of death for 20 age groups in 1990 and 2010; a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. The Lancet, 2012, **380**(9859): 2095-2128.
- [7] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(3): 410-415.
- [8] Ariya P A, Amyot M. New directions: The role of Bioaerosols in atmospheric chemistry and physics [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(8): 1231-1232.
- [9] 纪思思, 夏立江, 杜文利, 等. 北京某垃圾填埋区空气细菌浓度及粒径分布特征[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(6): 67-70.
- [10] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Concentration and size distribution of culturable airborne microorganisms in outdoor environments in Beijing, China [J]. Aerosol Science and Technology, 2008, **42**(5): 325-334.
- [11] Li M F, Qi J H, Zhang H D, *et al.* Concentration and size distribution of Bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(19): 3812-3819.
- [12] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants during a severe Smog event[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [13] 武丽婧. 青岛及黄海生物气溶胶中微生物群落多样性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. 39-49.
- [14] Andersen A A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles [J]. Journal of Bacteriology, 1958, **76**(5): 471-484.
- [15] 拓飞, 徐翠华. 用 TSI 3321 APS 分析大气气溶胶浓度和粒径分布[J]. 中国辐射卫生, 2009, **18**(4): 507-508.
- [16] O'Gorman C M, Fuller H T. Prevalence of culturable airborne spores of selected allergenic and pathogenic fungi in outdoor air [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(18): 4355-4368.
- [17] 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 等. 青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 801-809.
- [18] Haas D, Galler H, Luxner J, *et al.* The concentrations of culturable microorganisms in relation to particulate matter in urban air[J]. Atmospheric Environment, 2013, **65**: 215-222.
- [19] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4415-4421.
- [20] 于玺华. 现代空气微生物学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002. 336-339.
- [21] Pope C A, Ezzati M, Dockery D W. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States[J]. The New England Journal of Medicine, 2009, **360**(4): 376-386.
- [22] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气微生物粒度分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 1-5.
- [23] Wu P C, Su H J, Lin C Y. Characteristics of indoor and outdoor airborne fungi at suburban and urban homes in two seasons[J]. Science of the Total Environment, 2000, **253**(1-3): 111-118.
- [24] Xu Z Q, Yao M S. Monitoring of Bioaerosol inhalation risks in different environments using a six-stage Andersen sampler and the PCR-DGGE method [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(5): 3993-4003.
- [25] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气真菌生态分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(2): 160-165.
- [26] 胡庆轩, 陈振生, 徐桂清, 等. 北京地区大气微生物粒子谱的研究[J]. 中国环境监测, 1991, **7**(1): 9-11.
- [27] Kulmala M, Laakso L, Lehtinen K E J, *et al.* Initial steps of aerosol growth[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, **4**(5): 2553-2560.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chen, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行