

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)	

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征

高敏¹, 仇天雷¹, 贾瑞志^{1,2}, 韩梅林¹, 宋渊², 王旭明^{1*}

(1. 北京市农林科学院生物技术研究中心, 农业基因资源与生物技术北京市重点实验室, 北京 100097; 2. 中国农业大学生物学院, 北京 100193)

摘要: 近年来北京雾霾天气频发, 空气颗粒物聚集是导致雾霾天气发生的主要原因之一。作为一种重要的空气颗粒物, 生物气溶胶对人体健康存在危害。本研究调查了雾霾天气时, 生物气溶胶浓度和粒径分布规律; 对其同空气质量指数 $PM_{2.5}$ (AQI), 环境温度和湿度间的 Spearman's 相关性进行了研究; 分析了冬夏两季重度雾霾天气时, 生物气溶胶粒径分布规律。结果表明, 生物气溶胶浓度与 $PM_{2.5}$ (AQI) 呈负相关, 与环境温度呈正相关。环境湿度与细菌气溶胶浓度呈负相关而与真菌气溶胶浓度呈正相关。在冬季, 最大浓度细菌和真菌气溶胶分别在 $4.5 \sim 7.0 \mu m$ 和 $2.1 \sim 3.3 \mu m$ 粒径范围内检测到, 而夏季最高浓度细菌和真菌气溶胶均分布在 $3.3 \sim 4.5 \mu m$ 范围内。本研究结果将为不同雾霾天气下, 评价生物气溶胶对人类健康造成的危害提供基础数据。

关键词: 雾霾; 细菌气溶胶; 真菌气溶胶; $PM_{2.5}$ (AQI); Spearman's 相关性; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4415-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.12.001

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing

GAO Min¹, QIU Tian-lei¹, JIA Rui-zhi^{1,2}, HAN Mei-lin¹, SONG Yuan², WANG Xu-ming¹

(1. Beijing Key Laboratory of Agricultural Genetic Resources and Biotechnology, Beijing Agro-Biotechnology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Biological Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In recent years, haze has been observed frequently in Beijing. Haze was one of the atmospheric phenomena caused by the accumulation of particulate matter. As an important fraction of particular matter, bioaerosol could potentially cause significantly negative health effects. In this study, we detected the concentration and size distribution of viable bioaerosol during non-haze and haze days, analyzed correlation of viable bioaerosol with the ambient temperature and relative humidity using Spearman's correlation coefficient and finally detected the changing of size distribution of viable bioaerosol in summer and winter. Results indicated that concentrations of viable bioaerosol exhibited a negative correlation with Air Quality Index (AQI) of $PM_{2.5}$ and positive correlation with temperature. Relative humidity had a negative correlation with airborne bacteria while positive correlation with airborne fungi. The highest concentration of airborne bacteria and fungi were detected at size arrange of $4.5 \sim 7.0 \mu m$ and $2.1 \sim 3.3 \mu m$ in the winter, respectively. In the summer, both the highest concentration of airborne bacteria and fungi were observed at size arrange of $3.3 \sim 4.5 \mu m$. The results of this study will provide the basis data for hazard evaluation of bioaerosol on human health at non-haze and haze days.

Key words: haze; airborne bacteria; airborne fungi; $PM_{2.5}$ (AQI); Spearman's correlation coefficients; size distribution

目前,北京已经被列为世界十大空气污染城市之一^[1]。尤其是自2013年1月以来,北京地区雾霾天气暴发频率大大增加^[2,3],对人群健康造成严重危害。雾霾是由颗粒物在空气中聚集而引发的一种气候现象,颗粒物包括烟和灰尘等不同种类的固体及液滴,其中也包括生物气溶胶^[4]。生物气溶胶是指含有细菌、真菌、病毒、孢子和细胞碎片等生物性粒子的一类气溶胶^[5]。植物、土壤和岩石表面附着的微生物均是生物气溶胶的重要来源。尽管生物气溶胶在空气颗粒物中所占比例较小,其对人体健康造成的潜在危害不容忽视^[6,7]。特别是生物气溶胶的粒径影响其在呼吸道的沉降位置^[8],导致其

危害的复杂性增加。值得注意的是,在雾霾天气时,空气中高浓度的重金属和无机离子^[3]能够加速由生物性粒子引起的过敏和哮喘反应^[13]。因此,对雾霾暴发条件下,空气中生物气溶胶的污染状况进行研究是十分有必要的。作为环境质量的背景参考值,国内外研究者已经对空气环境中可培养生物气溶胶浓度^[6,8,9]和粒径分布^[10~12]进行了详尽报道。然而目前关于雾霾暴发时空气中生物气溶胶的研究

收稿日期: 2014-04-18; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308047); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX2014302)

作者简介: 高敏(1980~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为环境生物技术与生物气溶胶, E-mail: gaomin@baafs.net.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangxuming@baafs.net.cn

少有报道^[14]. 针对这一现状,本研究对北京市不同雾霾天气时,空气中可培养细菌和真菌气溶胶的浓度、粒径分布情况,及其同雾霾污染程度的关系进行分析,以期为评价生物气溶胶对人类健康造成的危害提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

本研究的采样地点位于北京市西四环与西三环之间,北京市农林科学院生物中心楼顶,距地面垂直距离约 20 m,采样高度为 1.5 m. 空气质量指数 (air quality index, AQI) 是描述任何一种或者多种生物生存空气条件的一种指数. 其中,PM_{2.5} (AQI) 是由 PM_{2.5} 浓度值计算得出,与 PM_{2.5} 浓度正相关,目前被广泛用于表示空气污染程度. 本研究对不同 PM_{2.5} (AQI) 条件下,空气中的细菌气溶胶和真菌气溶胶进行检测. 样品采集时间为 2013-01-14 ~ 2013-07-02. 具体样品采集信息如表 1 所示.

表 1 北京市不同雾霾程度对应采样信息

Table 1 Sampling information at different haze days in Beijing

污染程度	PM _{2.5} (AQI) 范围	采样次数 ¹⁾
严重	> 300	10
重度	300 ~ 200	11
中度	200 ~ 150	7
轻度	150 ~ 100	3
良好	100 ~ 50	7
优等	50 ~ 0	4

1) 共计采样 42 次,每次采样设置 3 个平行,使用平皿 1512 个 (真菌气溶胶和细菌气溶胶各 756 个)

1.2 采样方法和培养方法

生物气溶胶的采集使用 FA-I 撞击式采样器 (辽阳, 中国). 该仪器模拟人体呼吸道的解剖结构和空气动力学生理特征,采用惯性撞击原理将悬浮在空气中的微生物粒子分等级地收集到采样介质表面,供微生物学分析. 空气中的带菌粒子按大小分别捕获在各级的培养皿上^[15]: Stage VI: 0.65 ~ 1.1 μm, Stage V: 1.1 ~ 2.1 μm, Stage IV: 2.1 ~ 3.3 μm, Stage III: 3.3 ~ 4.7 μm, Stage II: 4.7 ~ 7.0 μm 和 Stage I: > 7.0 μm. 样品采集时间为 2 min, 气体流量为 28.3 L·min⁻¹, 每次采样前用流量计 (余姚, 中国) 对采样泵的流量进行校准. 每个采样点重复取样 3 次.

培养皿采用 9 cm 平皿,灭菌后在无菌条件下加入 20 mL 培养基. 细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基, 30 ℃ 培养箱内培养 2 d; 真菌采样用孟加拉红培养

基, 25 ℃ 培养箱内培养 3 d. 采集的样品在进行菌落计数时,采用 Positive hole method 方法对菌落数进行相应校正^[15].

1.3 计算方法

1.3.1 生物气溶胶总浓度

根据采样时间和气体流量,利用公式 (1) 计算各级生物气溶胶总浓度.

$$c = \frac{N \times 1\,000}{t \times F} \quad (1)$$

式中, c 为细菌或者真菌气溶胶浓度 (CFU·m⁻³); N 为各级菌落数; t 为采样时间 (min); F 为采样时的气体流量 (L·min⁻¹). 空气温度和相对湿度用温湿度计 (WD-35612, OAKTON, Germany) 检测.

1.3.2 粗颗粒物中生物气溶胶所占比例

因 FA-I 撞击式采样器无 PM_{2.5} 切割器,依据以往报道^[1],本研究将粒径 D_{50} 大于 2.1 μm (Stage III) 定义为粗颗粒物. 粗颗粒物中细菌气溶胶所占比例计算公式如下:

$$CBT = \frac{(B\text{ I} + B\text{ II} + B\text{ III}) \times 100\%}{(B\text{ I} + B\text{ II} + B\text{ III} + B\text{ IV} + B\text{ V} + B\text{ VI})} \quad (2)$$

式中, $B\text{ I}$ 、 $B\text{ II}$ 、 $B\text{ III}$ 、 $B\text{ IV}$ 、 $B\text{ V}$ 和 $B\text{ VI}$ 分别为分布在 Stage I、II、III、IV、V 和 VI 粒径范围中细菌气溶胶的浓度.

粗颗粒物中真菌气溶胶所占比例计算公式如下:

$$CFT = \frac{(F\text{ I} + F\text{ II} + F\text{ III}) \times 100\%}{(F\text{ I} + F\text{ II} + F\text{ III} + F\text{ IV} + F\text{ V} + F\text{ VI})} \quad (3)$$

式中, $F\text{ I}$ 、 $F\text{ II}$ 、 $F\text{ III}$ 、 $F\text{ IV}$ 、 $F\text{ V}$ 和 $F\text{ VI}$ 分别为在 Stage I、II、III、IV、V 和 VI 中真菌气溶胶的浓度.

1.3.3 细颗粒物中细菌气溶胶所占比例

本研究将粒径 D_{50} 小于 2.1 μm (Stage III) 定义为细颗粒物. 细颗粒物中细菌气溶胶所占比例计算公式如下:

$$FBT = \frac{(B\text{ IV} + B\text{ V} + B\text{ VI}) \times 100\%}{(B\text{ I} + B\text{ II} + B\text{ III} + B\text{ IV} + B\text{ V} + B\text{ VI})} \quad (4)$$

细颗粒物中真菌气溶胶所占比例计算公式如下:

$$FFT = \frac{(F\text{ IV} + F\text{ V} + F\text{ VI}) \times 100\%}{(F\text{ I} + F\text{ II} + F\text{ III} + F\text{ IV} + F\text{ V} + F\text{ VI})} \quad (5)$$

1.4 气象指数

实时空气质量指数 PM_{2.5} (AQI), 环境温度和湿度来自于 <http://cdc.cma.gov.cn>.^[16]

1.5 数据统计分析

利用 SPSS 21.0 来计算描述性统计参数,如 t -检验、单因素方差分析和 Spearman's 相关性分析. 当 P 值小于 0.05 时,表明在 95% 的置信区间内具有统计学意义上的显著差异.

2 结果与分析

2.1 北京雾霾暴发初期生物气溶胶浓度和粒径分布

2013 年 1 月,全国各地相继暴发大规模雾霾,北京地区当月暴发雾霾天数为 1954 年以来同期最多^[2],引起国内外的广泛关注. 本研究对雾霾暴发初期 14 d 内(样品采集时间从 2013-01-14 ~ 2013-01-28)空气中生物气溶胶进行采集,并对其中 6 d 的数据进行分析. 具体采样日期、细菌和真菌气溶胶的总浓度、不同粒径范围内的浓度分布以及对应的实时空气质量指数 $PM_{2.5}$ (AQI) 如图 1 所示.

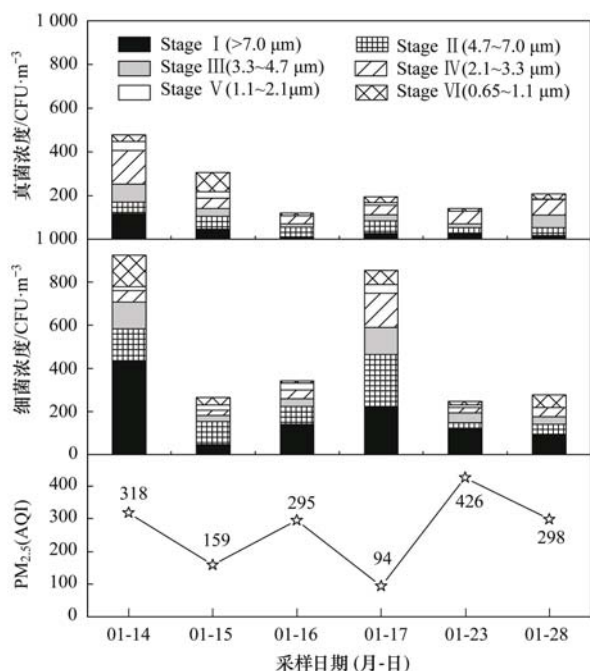


图 1 北京雾霾暴发初期细菌和真菌气溶胶在不同粒径的浓度分布

Fig. 1 Concentration and size distribution of airborne bacteria and fungi in early haze in Beijing

如图 1 所示,当空气污染指数 $PM_{2.5}$ (AQI) 数值在 94 ~ 426 之间,检测到细菌和真菌气溶胶浓度分别是 248 ~ 926 $CFU \cdot m^{-3}$ 和 120 ~ 478 $CFU \cdot m^{-3}$. 对雾霾程度 $PM_{2.5}$ (AQI) 同细菌和真菌气溶胶浓度之间的关系进行分析,没有检测到明显相关性. 同时,在本阶段所调查的 14 d 内,也没有发现雾霾程度与细菌和真菌气溶胶粒径分布规律之间的相关性. 根

据已有研究,在非雾霾天气时,空气中重金属与一周后的生物气溶胶浓度呈负相关^[17],说明空气污染对生物气溶胶的影响可能存在滞后性. 若要明确污染程度与空气中微生物的关系,需要对二者变化规律进行长期检测. 因此,本研究对 2013 年 1 ~ 7 月间不同雾霾程度时,北京市空气中细菌和真菌浓度以及粒径分布特点进行系统检测.

2.2 不同雾霾程度时生物气溶胶浓度和粒径分布特点

首先,对不同雾霾程度条件下,空气中的细菌和真菌气溶胶浓度进行监测. 并记录相应的 $PM_{2.5}$ (AQI)、环境温度和湿度,结果如图 2 所示. 在样品采集的 6 个月内, $PM_{2.5}$ (AQI) 的变化范围为 14 ~ 452,温度范围 $-1.9^{\circ}C \sim 38^{\circ}C$,相对湿度范围 10.3% ~ 79.0%. 细菌和真菌气溶胶的浓度分布范围分别为 253 ~ 2792 $CFU \cdot m^{-3}$ 和 141 ~ 1961 $CFU \cdot m^{-3}$. 整体上,夏季真菌气溶胶的浓度要高于冬季 ($P < 0.05$).

本研究考察了雾霾程度对生物气溶胶粒径分布可能造成的影响. 为方便研究,根据 $PM_{2.5}$ (AQI) 指数将雾霾污染程度分为 4 个等级,即 $PM_{2.5}$ (AQI) 0 ~ 100、100 ~ 200、200 ~ 300 和 > 300 . 将每个范围内检测到的 $PM_{2.5}$ (AQI) 数值进行算数平均计算,平均值分别为 59.5、158.1、259.1 和 359.3. 对 4 个污染程度下细菌和真菌气溶胶在不同粒径范围内的浓度进行分析,结果如图 3 所示.

整体上,没有发现雾霾程度对生物气溶胶粒径分布规律的明显影响(图 3). 首先,在不同程度雾霾天气和非雾霾天气两种条件下,细菌气溶胶主要分布在大粒径范围. 这与以往国内^[18]和国外^[19]学者对非雾霾天气时细菌气溶胶粒径分布规律的研究结果相一致. 这是由于细菌通常附着在颗粒物表面,其浓度会随着颗粒物粒径的增加而增加,而呈现出所报道的分布趋势^[20]. 其次,在所考察的 4 种空气质量条件下,真菌气溶胶在不同粒径范围内都呈现正态分布,这与细菌气溶胶的分布特点有所不同. 在雾霾和非雾霾天,真菌气溶胶均主要分布在 Stage IV (2.1 ~ 3.3 μm) 和 Stage III (3.3 ~ 4.7 μm) 两个范围内. 这与人报道的非雾霾天的分布规律相似,如北京^[9]的最高浓度分布在 2.1 ~ 3.3 μm ,台北^[21]和青岛^[22]的分布在 3.3 ~ 4.7 μm .

2.3 $PM_{2.5}$ (AQI)、环境温度和湿度与生物气溶胶浓度和粒径分布关系

对 2013 年 1 ~ 7 月间, $PM_{2.5}$ (AQI)、环境温度

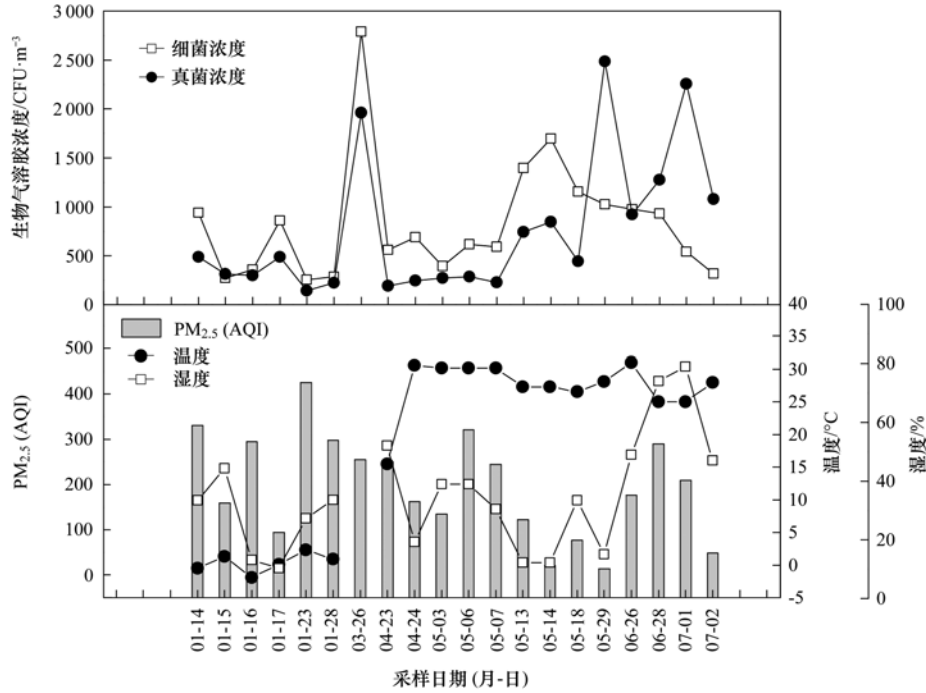
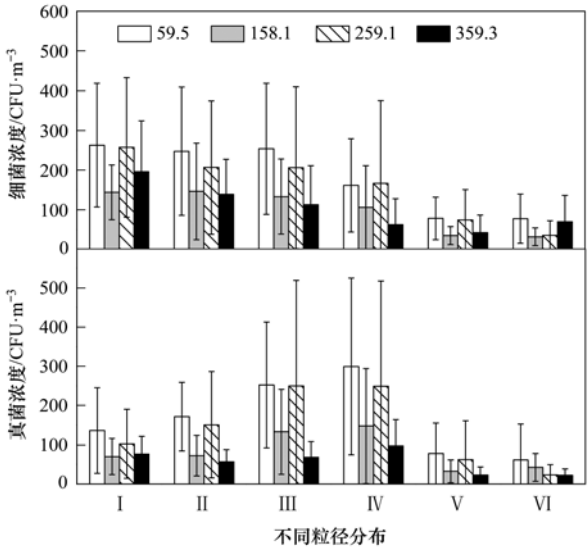


图2 采样日期及相应的细菌和真菌气溶胶浓度、PM_{2.5} (AQI)、温度和湿度

Fig. 2 Sampling date and corresponding concentration of airborne bacteria and fungi, PM_{2.5} (AQI), temperature and relative humidity



Stage VI: 0.65 ~ 1.1 μm , Stage V: 1.1 ~ 2.1 μm , Stage IV: 2.1 ~ 3.3 μm , Stage III: 3.3 ~ 4.7 μm , Stage II: 4.7 ~ 7.0 μm 和 Stage I: > 7.0 μm

图3 PM_{2.5} (AQI) 平均值分别为 59.5、158.1、259.1 和 359.3 时细菌和真菌气溶胶的浓度和粒径分布特点

Fig. 3 Concentration and size distribution of airborne bacteria and fungi when average values of PM_{2.5} (AQI) were 59.5, 158.1, 259.1 and 359.3, respectively

和湿度同生物气溶胶的关系进行了 Spearman 相关性分析,包括在不同粒径范围内生物气溶胶浓度 (B I 到 B VI、F I 到 F VI)、总生物气溶胶浓度 (TB

和 TF)、细颗粒物中细菌气溶胶比例 (FBT)、粗颗粒物中细菌气溶胶比例 (CBT)、细颗粒物中真菌气溶胶比例 (FFT) 和粗颗粒物中真菌气溶胶比例 (CFT). 由细菌气溶胶的粒径分布规律研究结果可知 (图 3), 大部分细菌气溶胶分布在大粒径范围内 (> 2.1 μm), 因此本阶段研究采用 PM_{2.5} (AQI) 和 PM₁₀ (AQI) 两个表示空气质量的参数, 考察雾霾程度同生物气溶胶之间的关系. 结果如表 2 所示.

首先, 考察了 PM_{2.5} (AQI) 同生物气溶胶的关系. 由表 2 可知, PM_{2.5} (AQI) 同细菌和真菌气溶胶的总浓度呈显著负相关 ($P < 0.05$). 其中, 与绝大部分粒径范围内细菌和真菌气溶胶的浓度 (除了 B VI 和 F V) 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 说明空气中的细菌和真菌气溶胶浓度随着雾霾程度的增加而逐渐减小. 这与以往报道的细菌气溶胶浓度正相关于空气颗粒物浓度^[6]的研究结果不同. 这可能是因为空气颗粒物中含大量的有毒有害物质^[23], 尤其是在雾霾天气, 北京空气中污染元素^[24]和无机离子的浓度^[1]分别是非雾霾天的 3.6 ~ 10.0 和 2.0 ~ 2.8 倍. 此时空气颗粒物中高浓度的有害物质可能对生物气溶胶产生危害, 出现 PM_{2.5} (AQI) 同细菌和真菌气溶胶浓度负相关的结果. 表 2 同时显示, PM_{2.5} (AQI) 与 FBT 和 FFT 负相关, 而与 CBT 和 CFT 正相关. 说明随着雾霾程度的增加, 细菌和真菌气溶胶在细颗

表 2 $PM_{2.5}$ (AQI)、 PM_{10} (AQI)、温度和湿度同 BI 到 BVI、FI 到 FVI、TB、TF、FBT、CBT、FFT 和 CFT 的 Spearman 相关系数分析¹⁾
Table 2 Spearman's correlation analysis between the value of $PM_{2.5}$ (AQI), PM_{10} (AQI), ambient temperature and relative humidity and concentration of BI to BVI, FI to FVI, TB, TF and FBT, CBT, FFT and CFT

项目	$PM_{2.5}$ (AQI) ($n=42$)	PM_{10} (AQI) ($n=42$)	温度($n=41$)	湿度($n=41$)
B I	-0.347 *	-0.204	0.074	-0.370 *
B II	-0.465 **	-0.243	0.163	-0.271
B III	-0.497 **	-0.211	0.415 **	-0.226
B IV	-0.489 **	-0.234	0.202	-0.504 **
B V	-0.355 *	-0.103	0.107	-0.286
B VI	-0.292	-0.209	-0.216	-0.273
TB	-0.323 *	-0.120	0.310 *	-0.325 *
F I	-0.477 **	-0.360 *	0.418 **	0.140
F II	-0.405 **	-0.203	0.604 **	0.286
F III	-0.367 *	-0.281	0.492 **	0.250
F IV	-0.467 **	-0.352 *	0.299	0.074
F V	-0.304	-0.251	0.036	0.012
F VI	-0.493 **	-0.260	0.217	-0.375 *
TF	-0.426 **	-0.294	0.461 **	0.222
FBT	-0.153	-0.015	-0.175	-0.333 *
CBT	0.153	0.015	0.175	0.333 *
FFT	-0.095	-0.194	-0.016	-0.127
CFT	0.095	0.194	0.016	0.127

1) * * 表示 $P < 0.01$ (2-tailed), * 表示 $P < 0.05$ (2-tailed), n 为采样次数

颗粒物所占的比例减少,而在粗颗粒物中所占比例增加.造成这一现象的原因可能是在雾霾天气时,空气中中小粒径颗粒物可发生聚集作用形成大粒径颗粒物^[25],从而导致颗粒物中的微生物所占比例发生变化. PM_{10} (AQI)与TB、TF以及各个粒径范围内的细菌和真菌气溶胶均呈负相关,但是相关性并不显著.

接着考察了环境温度对生物气溶胶的影响.结果显示,除BVI外,环境温度与其他粒径范围内的细菌和真菌气溶胶浓度均呈正相关.其中与TB($P < 0.05$)、TF($P < 0.01$)、BIII($P < 0.01$)、FIV($P < 0.01$)、FII($P < 0.01$)和FIII($P < 0.01$)呈现显著正相关.这与以往对非雾霾条件下的研究结果相一致^[22].同时本研究还发现,环境温度与细颗粒物中的生物气溶胶比例呈负相关,而与粗颗粒中的生物气溶胶比例呈正相关.这可能是因为随着温度的升高,在细颗粒物中的细菌气溶胶比例减小,而粗颗粒物中所占比例相应增加.

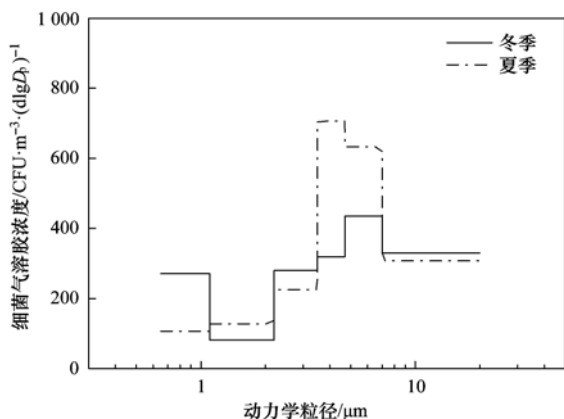
最后,分析了环境相对湿度与生物气溶胶之间的关系.由表2的结果可知,环境湿度对细菌和真菌气溶胶造成的影响有所不同:与真菌呈正相关,这与以往在非雾霾条件下的研究结果相一致^[26];与细菌呈负相关,主要原因可能是空气细菌气溶胶大多是革兰氏阳性菌,这些细菌可以在低湿度下迅速繁殖,而高湿度会抑制其生长^[27].同时发现,在细

颗粒物内的细菌和真菌气溶胶比例均与环境湿度呈负相关,说明细颗粒内的生物气溶胶随着环境湿度的增加而减小.这是由于空气中的细颗粒物会随着环境湿度的升高而发生聚集作用^[28].本研究结果显示,细菌气溶胶在细颗粒物和粗颗粒物中的分布受到湿度的影响更加显著($P < 0.05$).

2.4 冬夏两季雾霾天气生物气溶胶粒径分布特点

由于粒径是评价颗粒物对人体健康危害的重要参数,本研究对 $PM_{2.5}$ (AQI) > 300的严重雾霾天气时,冬夏两季空气中细菌和真菌气溶胶的粒径分布特点进行分析,结果如图4和图5所示.

由图4和图5可知,在重度雾霾天气条件下,冬夏两季空气中细菌和真菌气溶胶的粒径分布特点存在差异.在冬季,细菌和真菌气溶胶的最大浓度分别在 $4.5 \sim 7.0 \mu m$ 和 $2.1 \sim 3.3 \mu m$ 检测到,而在夏季,最高浓度的细菌和真菌气溶胶都分布在 $3.3 \sim 4.5 \mu m$ 范围内.其中,在 $3.3 \sim 7.0 \mu m$ 范围内,夏季的细菌气溶胶浓度高于冬季; $2.1 \sim 7.0 \mu m$ 范围内,夏季的真菌气溶胶浓度高于冬季.空气颗粒物的动力学粒径是决定人类暴露以及后续危害评价的重要参数,不同粒径的生物气溶胶粒子会沉降在人体呼吸道的不同位置.如,Stage I(鼻子和口腔),Stage II(咽),Stage III(气管和支气管),Stage IV(二级支气管),Stage V(末端支气管)和Stage VI(肺泡)^[15].本研究的结果初步显示,重度雾霾天气



冬季:取样 8 次,平均 $PM_{2.5}$ (AQI) = 325.88; 夏季:取样 8 次,平均 $PM_{2.5}$ (AQI) = 315.13,下同

图 4 冬季和夏季重度雾霾污染时细菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 4 Size distribution characteristics of airborne bacteria at summer and winter in heavy haze day

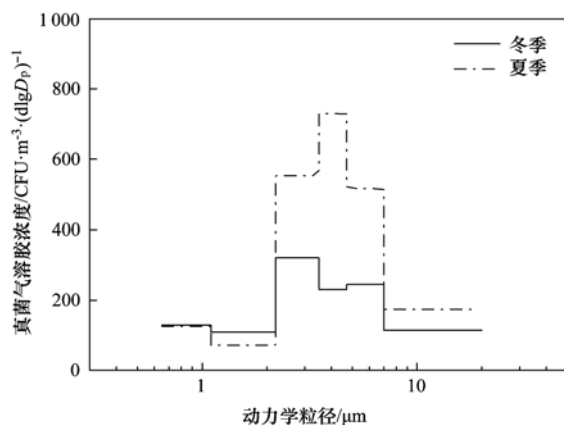


图 5 冬季和夏季重度雾霾污染时真菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 5 Size distribution characteristics of airborne fungi at summer and winter in heavy haze day

时,冬夏两季细菌和真菌气溶胶粒径分布有所改变,对人体健康造成的影响也可能有所差异。然而,如果要详细评价雾霾天气下生物气溶胶对人类健康危害,下一步还需要对颗粒物中不可培养微生物以及相关的化学物质进行研究。

3 结论

本研究结果显示,在 2013 年 1~7 月之间,北京市雾霾程度 $PM_{2.5}$ (AQI) 与细菌和真菌气溶胶总浓度均呈负相关,与细颗粒物和粗颗粒中生物气溶胶所占比例分别呈负相关和正相关。环境温度与细菌和真菌气溶胶总浓度为正相关。相对湿度与细菌气溶胶负相关而与真菌气溶胶正相关。重度雾霾天气时,冬季最大浓度的细菌和真菌气溶胶分别在 4.5

~7.0 μm 和 2.1~3.3 μm 检测到,而在夏季最高浓度都分布在 3.3~4.5 μm 范围内。

参考文献:

- [1] Yu X N, Zhu B, Yin Y, *et al.* A comparative analysis of aerosol properties in dust and haze-fog days in a Chinese urban region [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **99**(2): 241-247.
- [2] 王秦,陈曦,何公理,等. 北京市城区冬季雾霾天气 $PM_{2.5}$ 中元素特征研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(6): 1441-1445.
- [3] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [4] Degobbi C, Lopes F D T Q S, Carvalho-Oliveira R, *et al.* Correlation of fungi and endotoxin with $PM_{2.5}$ and meteorological parameters in atmosphere of Sao Paulo, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2277-2283.
- [5] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(4): 546-552.
- [6] 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.
- [7] Vermani M, Vijayan V K, Kausar M A, *et al.* Quantification of airborne *Aspergillus* allergens: redefining the approach [J]. *The Journal of Asthma; Official Journal of the Association for the Care of Asthma*, 2010, **47**(7): 754-761.
- [8] Boreson J, Dillner A M, Peccia J. Correlating bioaerosol load with $PM_{2.5}$ and PM_{10cf} concentrations: a comparison between natural desert and urban-fringe aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(35): 6029-6041.
- [9] 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.
- [10] Yamamoto N, Bibby K, Qian J, *et al.* Particle-size distributions and seasonal diversity of allergenic and pathogenic fungi in outdoor air [J]. *International Society for Microbial Ecology*, 2012, **6**(10): 1801-1811.
- [11] Liao C M, Luo W C. Use of temporal/seasonal-and size-dependent bioaerosol data to characterize the contribution of outdoor fungi to residential exposures [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **347**(1-3): 78-97.
- [12] 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.
- [13] Gavett S H, Koren H S. The role of particulate matter in exacerbation of atopic asthma [J]. *International Archives of Allergy and Immunology*, 2001, **124**(1-3): 109-112.
- [14] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [15] Andersen A A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles [J]. *Journal of Bacteriology*, 1958, **76**(5): 471-484.

- [16] Wang Y, Zhuang G H, Sun Y L, *et al.* The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6579-6591.
- [17] Adhikari A, Reponen T, Grinshpun S A, *et al.* Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone: A two-year study [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140**(1): 16-28.
- [18] 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.
- [19] Lighthart B, Shaffer B T. Viable bacterial aerosol particle size distributions in the midsummer atmosphere at an isolated location in the high desert chaparral [J]. *Aerobiologia*, 1995, **11**(1): 19-25.
- [20] 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.
- [21] Lin W H, Li C S. Size characteristics of fungus allergens in the subtropical climate [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1996, **25**(2): 93-100.
- [22] 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.
- [23] Xu W Z, Chen H, Li D H, *et al.* A case study of aerosol characteristics during a haze episode over Beijing [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **18**: 404-411.
- [24] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [25] Kulmala M, Laakso L, Lehtinen K E J, *et al.* Initial steps of aerosol growth [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, **4**: 2553-2560.
- [26] Wang Z, Reponen T, Grinshpun S A, *et al.* Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, **32**(5): 661-674.
- [27] de Goffau M C, Yang X M, van Dijk J M, *et al.* Bacterial pleomorphism and competition in a relative humidity gradient [J]. *Environment Microbiolog*, 2009, **11**(4): 809-822.
- [28] Madelin T M, Johnson H E. Fungal and actinomycete spore aerosols measured at different humidities with an aerodynamic particle sizer [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1992, **72**(5): 400-409.

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

国内外公开发行人