

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM_{2.5}中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O₃分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 刚佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH₄吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性

杨唐^{1,2}, 韩云平^{1,2*}, 李琳^{1,2}, 刘俊新¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘要: 粒径分布和微生物种群结构是雾-霾天气溶胶与人体健康密切相关的典型特征. 采用安德森六级采样器在人体平均呼吸高度(近地面 1.5 m)处对北京某地雾-霾天及晴天分别进行气溶胶样品采集, 从不同粒径气溶胶中的可培养细菌、真菌浓度及种群结构角度展开研究. 结果表明, 雾-霾天不同粒径气溶胶中可培养微生物浓度呈现不均匀分布状态; 不同粒径气溶胶中微生物浓度、种群结构差异性均明显高于晴天. 雾-霾天条件下, 在粒径大于 3.3 μm 的气溶胶中, 芽孢杆菌(*Bacillus* sp.) 占据优势地位, 在粒径小于 3.3 μm 的气溶胶中, 芽孢杆菌(*Bacillus* sp.) 和解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) 占优势地位. 而当雾-霾过后, 解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) 在所有粒径的生物气溶胶中均占优势地位. 雾-霾天条件下, 在粒径大于 3.3 μm 的气溶胶中共检出 5 种优势真菌, 分别是链格孢菌(*Alternaria* sp.)、意大利青霉(*Penicillium italicum*)、蓝状菌(*Talaromyces stollii*)、枝孢菌(*Cladosporium* sp.) 和 *Davidiella* sp.; 而当雾-霾过后, 仅链格孢菌(*Alternaria* sp.) 被检测为优势菌. 无论雾-霾天还是晴天, 在粒径小于 3.3 μm 的气溶胶中真菌均主要以意大利青霉(*Penicillium italicum*) 和蓝状菌(*Talaromyces stollii*) 为主. 在人体平均呼吸高度处, 雾-霾天与晴天不同粒径气溶胶中微生物浓度和种群结构存在明显差异. 雾-霾天人体平均呼吸高度处微生物浓度高, 且种群结构较为复杂, 其微生物特性对人体健康的潜在风险不容忽视.

关键词: 雾-霾天; 生物气溶胶; 呼吸高度; 粒径分布; 种群结构

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1680-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807163

Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days

YANG Tang^{1,2}, HAN Yun-ping^{1,2*}, LI Lin^{1,2}, LIU Jun-xin¹

(1. Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Size distribution and microbial population structure are typical characteristics of bioaerosols that are relevant to human health. The concentrations and population structure of bioaerosols associated with size-segregated airborne particulate matter at human average respiratory height were studied using a 6-stage Andersen impactor during and after fog-haze days in the area of Beijing. The results showed that the size distribution of the cultured microbial populations was uneven during fog-haze days, and that the microbial concentration and the difference in the population structure of the size-segregated airborne particulate matter were higher during than after the fog-haze days. During the fog-haze days, *Bacillus* sp. was the dominant bacteria present in bioaerosols of $>3.3 \mu\text{m}$, whereas *Bacillus* sp. and *Bacillus amyloliquefaciens* were the dominant bacteria in bioaerosols of $<3.3 \mu\text{m}$. In contrast, after the fog-haze days, *Bacillus amyloliquefaciens* was dominant in all the bioaerosol sizes. Five species (*Alternaria* sp., *Penicillium italicum*, *Talaromyces stollii*, *Cladosporium* sp., and *Davidiella* sp.) were detected as the dominant fungi in the bioaerosols $>3.3 \mu\text{m}$ during the fog-haze days, and only *Alternaria* sp. was detected in the bioaerosols $>3.3 \mu\text{m}$ after fog-haze. *Penicillium italicum* and *Talaromyces stollii* were also detected in the bioaerosols of $<3.3 \mu\text{m}$ during and after the fog-haze. There were significant differences in the concentration and population structure of the size-segregated airborne particulate matter at human average respiratory height collected during and after the fog-haze days. The high concentration of microorganisms and the relatively complex population at human average respiratory height on haze days indicate that the potential risks of the microbiological characteristics of the bioaerosols to human health cannot be ignored.

Key words: fog-haze day; bioaerosols; respiratory height; size distribution; population structure

近年来随着空气污染的日益严重, 越来越多的学者开始关注雾-霾^[1~3]. 有研究已经证实, 雾-霾的形成与大气中不同粒径颗粒物的浓度密切相关^[4~9]. 更为重要的是, 有研究证实颗粒物的粒径大小导致其在肺部的沉降位置和速率不同^[10~13]. 例如, 1~5 μm 的颗粒物主要粘附于气管、支气管、细支气管; 而小于 1 μm 的颗粒物在肺泡里的沉积效率最高^[13],

颗粒物的这种沉降差异也将直接导致其对人体健康

收稿日期: 2018-07-19; 修订日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51308527); 环境保护公益性行业科研专项(201509008); 中国科学院生态环境研究中心青年科学基金项目(RCEES-QN-20130006F)

作者简介: 杨唐(1990~), 男, 博士, 主要研究方向为生物气溶胶扩散特征及控制技术, E-mail: tyang37@163.com

* 通信作者, E-mail: yphan@cees.ac.cn

影响的不同. 因此, 世界卫生组织在 2015 年将颗粒物列为了全球对人体健康具有危害的污染物之一, 并称其和抽烟对人体造成的危害相当^[14].

近年来越来越多的研究发现, 在雾-霾天颗粒物中, 除化学组分之外, 微生物也是重要的组分之一, 这些包含微生物等活性成分的颗粒物被称之为生物气溶胶^[12]. 采用培养及分子生物学技术等, 对户外气溶胶中微生物组分的研究已逐步展开^[15~18]. 结果表明, 户外气溶胶中微生物种群具有多样性及复杂性; 气溶胶的浓度已不是决定其危害的唯一因素, 微生物种群结构也同等重要^[18], 尤其是在人体平均呼吸高度处(近地面高度 1.5 m 处)^[19,20]. 有研究对雾-霾天 1.5 m 处总颗粒物进行采集并分析其微生物种群结构, 结果发现, 雾-霾天气与雾-霾过后的气溶胶中总微生物种群存在明显差异^[21]. 目前关于这种差异性还仅体现在气溶胶总微生物种群上, 不同粒径气溶胶中微生物种群在雾-霾天及过后是否存在差异仍不明确, 揭示雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶中微生物种群特征, 将对于探明雾-霾天气溶胶对人体健康的危害以及对其进行进一步防护具有重要的理论及现实意义.

基于此, 本研究采用安德森六级采样器, 分别在雾-霾天及雾-霾过后人体平均呼吸高度处采集气溶胶样品, 采用克隆文库技术分析其种群结构. 通过比较不同气象条件下人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶中微生物的浓度及组成特征, 初步揭示气象条件对人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶中微生物浓度、种群结构的影响, 以期未来对气溶胶的危害潜力及控制技术提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 采样地点及生物气溶胶的采集

本研究的采样地点位于北京市(经度:116.34°E, 纬度:40.01°N). 根据《气象标准汇编》(QX/T 113-2010)中霾观测的辨识条件, 以能见度和相对湿度数据作为参考, 区分雾-霾天和晴天. 采样于 2016 年 1 月 1~4 日(雾-霾天)和 2016 年 1 月 4~6 日(晴天)进行. 雾-霾天每次采样时间为 3 min, 采样间隔为 57 min, 每天总采样持续时间为 8 h; 晴天每次采样时间为 3 min, 采样间隔为 57 min, 每天总采样持续时间为 12 h, 采样间隔中进行样品储存、采样器酒精消毒和培养基准备等. 采样器选择安德森六级撞击式采样器(228~9530 K, SKC Gulf Coast Inc., USA), 采样点设置于人体平均呼吸高度(近地面 1.5 m 高度)处(图 1). 细菌和真菌分别采用 LB 培养基和孟加拉红培养基(Aobo xing

Biotech, Co., China)培养. 样品采集过程中选用安德森六级撞击式采样器配套气泵, 流量为 28.3 L·min⁻¹, 采集的粒径分布范围^[19]为: >7、4.7~7.0、3.3~4.7、2.1~3.3、1.1~2.1 和 0.65~1.1 μm. 采样前, 采样器所有部件均进行高温灭菌. 细菌和真菌各设置 2 个平行采样器同时采集, 最终结果为 2 次平均数, 单位为每立方米空气中的菌落数(CFU·m⁻³). 共收集到雾-霾天细菌和真菌不同粒径的样品 288 个, 晴天样品细菌和真菌不同粒径的样品 285 个. 细菌在 30℃ 下培养 24 h, 真菌在 30℃ 下培养 7 d. 采用正孔校正法确定菌落数浓度^[18].

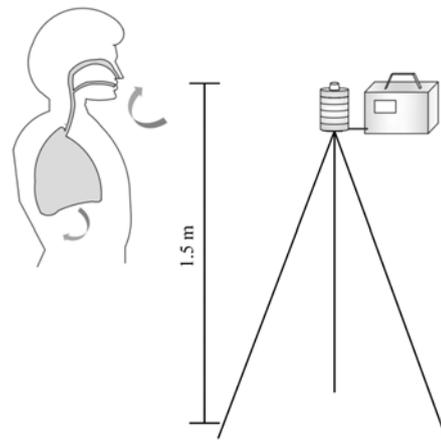


图 1 采样器设置示意

Fig. 1 Schematic of the sampling setup

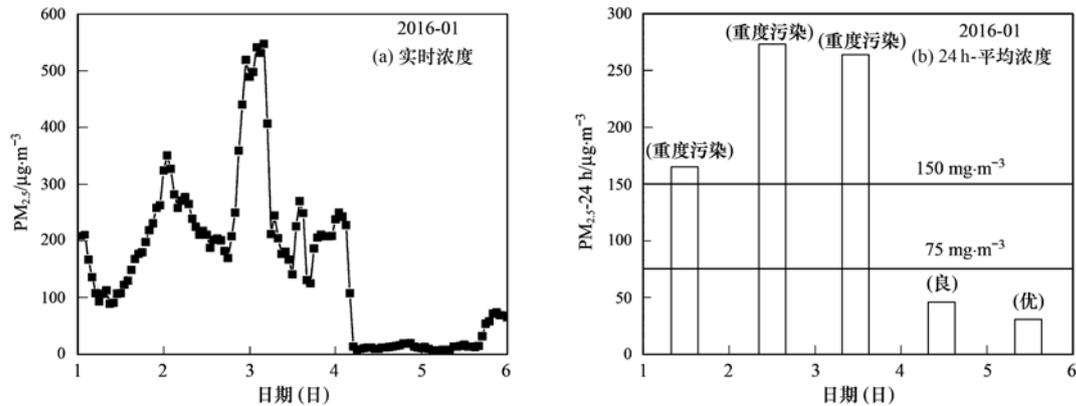
采样期间, 实时观测气象条件如表 1 所述. 温度和湿度采用温湿度计(WD~35612, Oakton, Germany)进行记录, 风速和光照度采用便携式风速仪(HD2303, Delta Ohm, Italy)和手持式照度计(HD2302.0, Delta Ohm)进行记录. 采样期间, 中国国家气象局发布的实时 PM_{2.5} 浓度和 24 h 平均浓度如图 2 所示.

表 1 采样期间的气象条件参数

项目	雾-霾天	晴天
温度/℃	-1.00~3.00	2.00~8.00
湿度/%	63.50~86.50	35.00~40.00
风速/m·s ⁻¹	0.02~0.07	1.10~7.83
光照度/W·m ⁻²	2.54~5.60	65.16~438.50

1.2 DNA 提取和聚合酶链式反应(PCR)扩增

培养后, 使用 1.5 mL 的 1×磷酸缓冲盐溶液冲洗每个培养基表面, 同时使用三角刮刀刮涂^[18]. 为了保证足够的微生物量, 收集可培养的菌液, 分别将雾-霾天气和晴天内的同一粒径的样品混合均匀. 在无菌条件下, 采用核酸自动提取仪(TanBead, Chinese Taipei)分别提取其总 DNA, 并采用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的提取纯度. 共得到 24

图2 采样期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化Fig. 2 Variation of the $PM_{2.5}$ mass concentration on the sampling dates

个细菌 DNA 样品和 24 个真菌 DNA 样品. 细菌和真菌通用引物 F16S- 27/R16S- 1492^[22] 和 ITS1/ITS4^[23], 分别用来扩增细菌 16S rDNA 片段和真菌 ITS 片段. PCR 扩增^[21] 和测序委托上海美吉生物医药科技有限公司进行.

1.3 构建克隆文库

经手动去除载体序列后, 分别采用 Bellerophon (<http://greengenes.lbl.gov/>) 进行嵌合体剔除和 DNAMAN 软件进行序列相似性分析, 将相似度高于 97% 的序列归并为一个操作单元 (OTU), 然后挑选每个操作单元的代表性序列在 NCBI 基因库中进行序列比对, 获得生物气溶胶微生物组成结构. 克隆文库的覆盖度 (C) 和多样性 (Shannon index, H) 分别采用公式(1)和公式(2)进行计算.

$$C = \left(1 - \frac{n_1}{N}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, N 指 16S rDNA 克隆文库的库容; n_1 指在 16S rDNA 克隆文库中仅出现一次的 OTUs 的数量; C 值大于等于 75% 方可认为挑取的克隆数足以反映真实的群落结构.

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, P_i 指第 i 个 OTU 在克隆文库库容中所占的比例; S 表示克隆文库中 OTUs 的总数目.

1.4 数据统计分析

微生物种群多样性热图、非参度量多维统计分析 (NMDS) 和相似性分析 (SIMPER、ANOSIM) 采用 R 语言进行统计分析, 描述性统计参数 (paired t -test) 采用 SPSS 21.0 计算.

2 结果与分析

2.1 人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶中细菌和真菌的浓度变化特征

对雾-霾天及其雾-霾过后晴天人体平均呼吸高

度处不同粒径气溶胶中细菌、真菌浓度进行分析, 结果如图 3 所示. 细菌和真菌浓度在各个粒径气溶胶范围内, 均呈现雾-霾天高于晴天的趋势 (paired t -test, $P = 0.031$). 在雾-霾天条件下, 细菌、真菌浓度在不同粒径气溶胶中都呈现不均匀分布状态. 对于细菌浓度而言, 在雾-霾天条件下, 细菌气溶胶浓度随粒径降低呈先降低后升高趋势. 在粒径 $> 7.0 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 细菌浓度为 $107 \sim 843 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$; 随着粒径减小, 细菌浓度逐渐呈升高趋势, 当粒径为 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 时, 其中细菌浓度可高

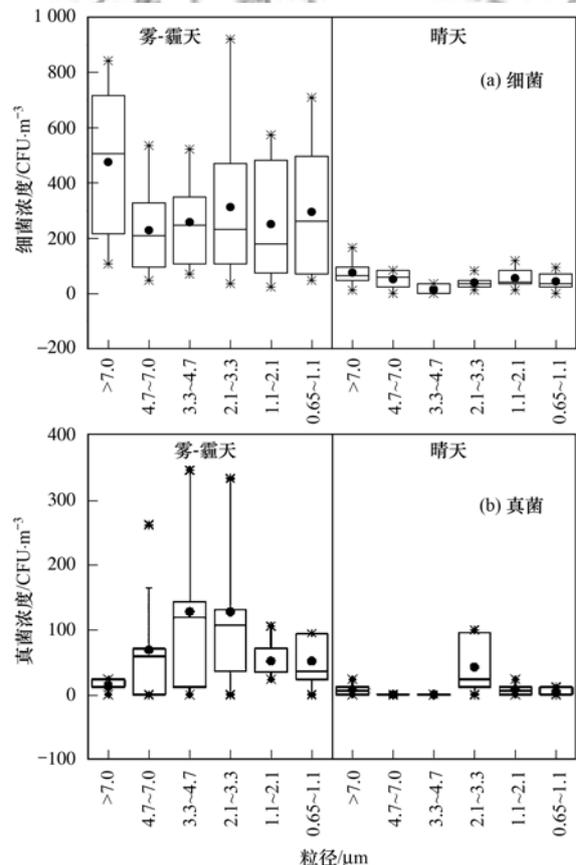


图3 不同粒径生物气溶胶中微生物浓度

Fig. 3 Concentrations of microorganisms associated with the size-segregated bioaerosols

达 $922 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 。但是, 但雾-霾消散后, 晴天不同粒径生物气溶胶中细菌浓度基本保持平均分布状态, 最高浓度也仅为 $166 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

相对细菌浓度而言, 真菌浓度在不同粒径气溶胶中的分布趋势则略有差异, 尤其是在雾-霾天气条件下。随着气溶胶粒径减小, 真菌浓度呈现先升高后降低的趋势。在 $4.7 \sim 7.0$ 、 $3.3 \sim 4.7$ 和 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 其浓度分别为 $35 \sim 261$ 、 $11 \sim 346$ 和 $35 \sim 333 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而当雾-霾消散后, 不同粒径气溶胶中真菌浓度较低, 最高浓度也仅为 $100 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

结合中国国家气象局空气质量实时预报(图2)和《环境空气质量标准》(GB 3095-2012), 可以看出, 本研究过程中, 雾-霾天期间, $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 平均浓度均超过了 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 为重度污染; 而晴天的 $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 平均浓度低于 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 为优或良。综合以上结果说明, 当空气中颗粒物浓度较高时, 近地面处气溶胶中微生物的浓度也相应大幅度增高。

2.2 人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶中细菌、真菌种群特征

采用克隆文库技术对人体平均呼吸高度处气溶胶中细菌及真菌种群进行了研究, 总共获得 1 500 个细菌 OTU 和 900 个真菌 OTU, 所有文库的覆盖度均大于 90%, 证明本研究构建的克隆文库提供了准确可靠的微生物种群特征。

2.2.1 细菌种群结构

可培养细菌种属检测结果(图4和图5)表明,

与气溶胶中细菌浓度相对应, 在粒径大于 $7.0 \mu\text{m}$ 和小于 $2.1 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 雾-霾天细菌多样性明显高于晴天。雾-霾天条件下, 粒径大于 $7 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 检出的芽孢杆菌属分别为 31.48% 的芽孢杆菌 (*Bacillus* sp.)、15.87% 的枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 和 9.52% 的巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*); 当雾-霾消散后, 同样在粒径大于 $7 \mu\text{m}$ 的气溶胶中检出的为 2.09% 的芽孢杆菌 (*Bacillus* sp.)、29.17% 的解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*) 和 2.09% 的高地芽孢杆菌 (*Bacillus altitudinis*), 而枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 和巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*) 则均未检出。粒径在 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 雾-霾天和晴天均检出 4 种芽孢杆菌细菌; 粒径在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 雾-霾天和晴天则分别检出 5 种和 4 种芽孢杆菌属细菌。而在粒径介于 $2.1 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 细菌多样性则呈现相反特征。粒径在 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 雾-霾天仅检出两种芽孢杆菌细菌, 分别为 34.71% 的芽孢杆菌 (*Bacillus* sp.) 和 27.27% 的解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*); 而晴天共检出 4 种, 分别为 29.16% 的苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis*)、16.67% 的蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*)、10.42% 的解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*) 和 2.09% 的枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)。粒径 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 雾-霾天和晴天分别检出 4 种和 6 种芽孢杆菌属的

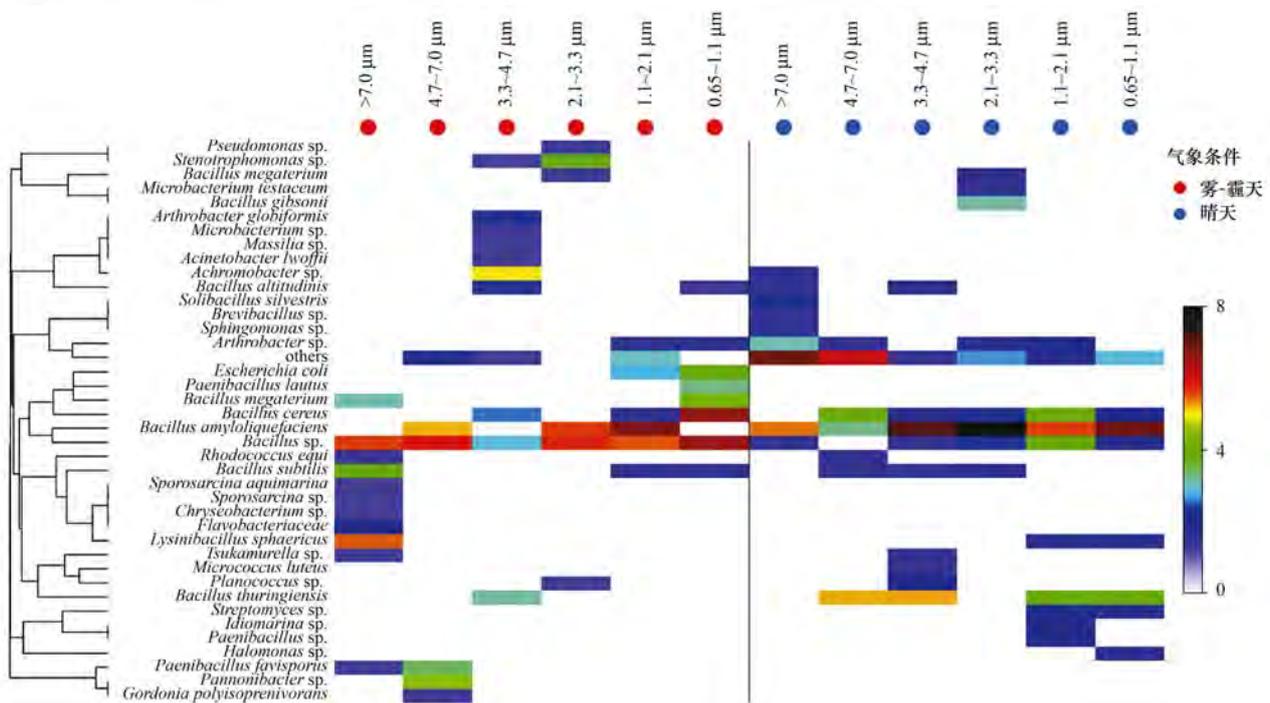


图4 不同粒径生物气溶胶中细菌分布热图

Fig. 4 Heat-map of the bacteria associated with the size-segregated bioaerosols

细菌.

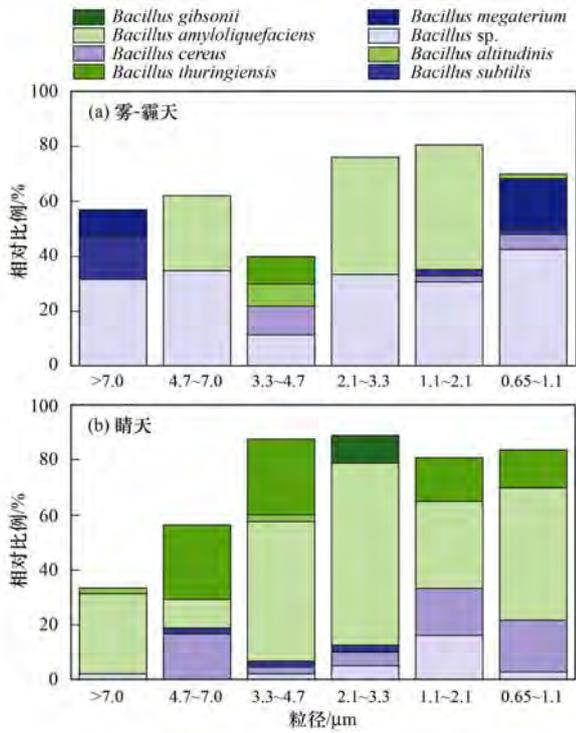


图 5 芽孢杆菌属细菌在不同粒径生物气溶胶中的相对比例
Fig. 5 Relative proportions of *Bacillus* associated with the size-segregated bioaerosols

对不同气象条件下气溶胶中细菌结构相似性进行分析, 结果如图 6 所示. 根据相似性百分数分析 (SIMPER) 进行组间比较, 发现雾-霾天和晴天的细菌结构存在较高的差异性, 差异度为 72.88%

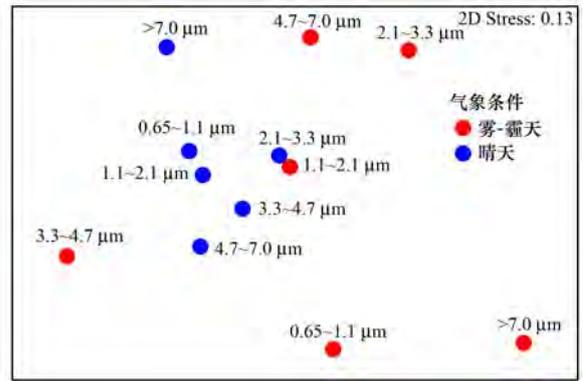


图 6 生物气溶胶中细菌 NMDs 分析结果

Fig. 6 Result of nonmetric multidimensional scaling ordination (NMDs) of the bacteria in the bioaerosols

(Global Test; $R=0.243$; $P=0.006$). 雾-霾天各粒径气溶胶的细菌结构相似性为 30.18% (ANOSIM), 雾-霾消散后, 各粒径气溶胶的细菌结构的相似度则更高, 为 51.43%, 说明雾-霾天气溶胶中细菌种群结构更为复杂.

2.2.2 真菌种群结构

真菌检测结果表明, 在所有粒径气溶胶中, 雾-霾天真菌多样性明显高于晴天 (图 7). 雾-霾天, 在粒径大于 $7.0 \mu\text{m}$ 的气溶胶中, 检出 6 种真菌, 分别是 47.37% 的链格孢菌 (*Alternaria* sp.)、22.63% 的子囊菌 (*Pezizomycotina* sp.)、20.00% 的球囊霉菌 (*Glomus* sp.)、5.00% 的 *Davidiella* sp.、2.50% 的枝孢菌 (*Cladosporium* sp.) 和 2.50% 的意大利青霉

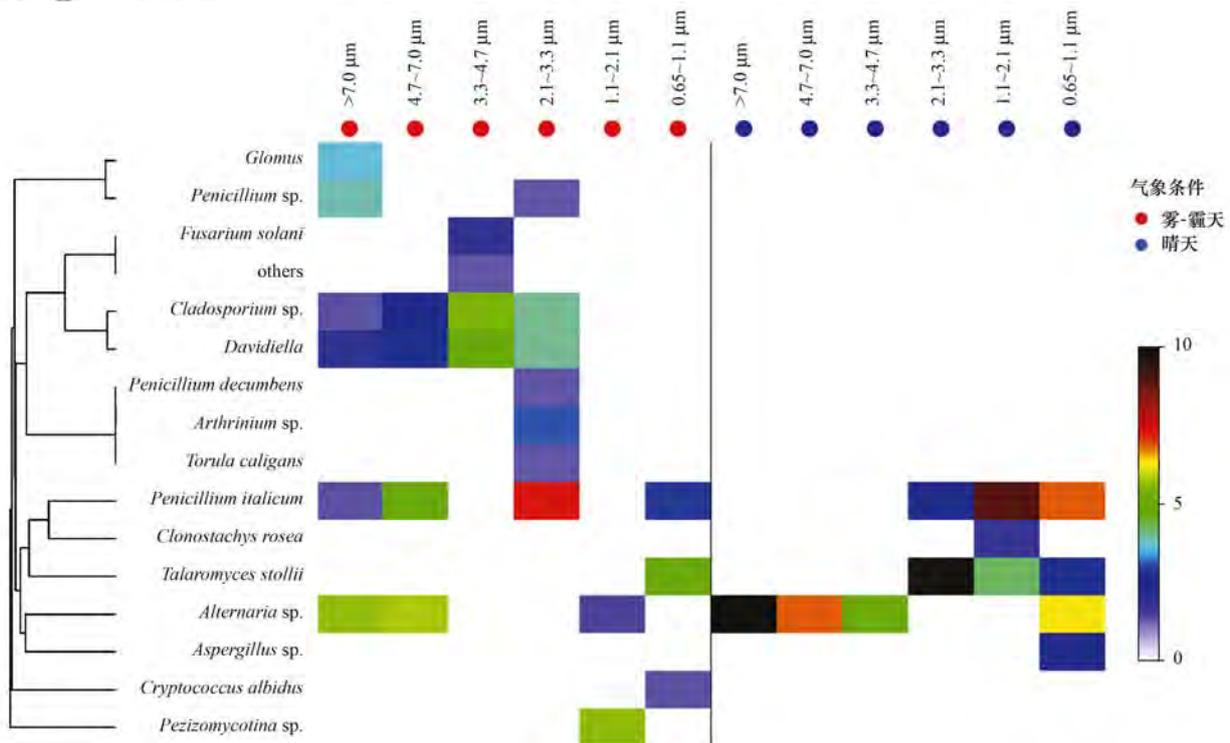


图 7 不同粒径生物气溶胶中真菌分布热图

Fig. 7 Heat-map of the fungi associated with the size-segregated bioaerosols

(*Penicillium italicum*); 在粒径为 4.7 ~ 7.0 μm 的气溶胶中, 检出 4 种真菌, 分别是 47.12% 的链格孢菌 (*Alternaria* sp.)、33.32% 的意大利青霉 (*Penicillium italicum*)、10.87% 的 *Davidiella* sp 和 8.70% 的枝孢菌 (*Cladosporium* sp.); 在粒径为 3.3 ~ 4.7 μm 的气溶胶中, 检出 3 种真菌, 分别是 56.34% 的枝孢菌 (*Cladosporium* sp.)、36.53% 的 *Davidiella* sp. 和 4.76% 的腐皮镰刀菌 (*Fusarium solani*)。而当雾-霾消散后, 在同样这 3 级粒径气溶胶中, 检出的均为链格孢菌 (*Alternaria* sp., 100%)。当气溶胶粒径小于 3.3 μm 时, 晴天气溶胶中真菌多样性有所增加, 并且两种气象条件下优势真菌种属逐步趋于一致。在粒径为 2.1 ~ 3.3 μm 的气溶胶中, 意大利青霉 (*Penicillium italicum*) 在雾-霾天和晴天均占据优势地位; 在粒径为 0.65 ~ 1.1 μm 的气溶胶中, 意大利青霉 (*Penicillium italicum*) 和蓝状菌 (*Talaromyces stollii*) 是其优势真菌。

对不同气象条件下气溶胶中真菌结构相似性进行分析, 结果如图 8 所示。根据相似性百分数分析 (SIMPER) 进行组间比较, 发现雾-霾天和晴天不同粒径的真菌结构存在较高的差异性, 差异度为 81.70% (Global Test; $R = 0.74$; $P = 0.02$)。雾-霾天各粒径气溶胶的真菌结构相似度为 14.48% (ANOSIM), 当雾-霾消散后, 各粒径气溶胶的真菌结构相似度明显高于雾-霾天, 为 25.39%, 说明雾-霾天气溶胶中真菌种群结构更为复杂。

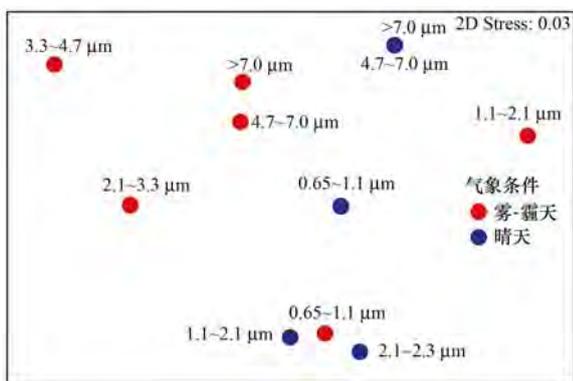


图 8 生物气溶胶中真菌 NMDS 分析结果

Fig. 8 Result of nonmetric multidimensional scaling ordination (NMDS) of the fungi in the bioaerosols

3 讨论

连续的雾-霾天及雾-霾消散后晴天的不同粒径气溶胶中可培养微生物浓度及种群结构存在明显差异。首先, 雾-霾天不同粒径气溶胶中微生物浓度均明显高于晴天, 这与 $\text{PM}_{2.5}$ 水平是一致的。根据相

关研究中规定安德森六级撞击式采样器粒径小于 3.3 μm 的颗粒为可吸入性颗粒^[24], 在本研究中的雾-霾天粒径小于 3.3 μm 的气溶胶中可培养细菌及真菌浓度为总浓度的 50% 左右。因此, 雾-霾天气溶胶中微生物对人体健康的潜在风险不容忽视。其次, 在粒径大于 7.0 μm 的气溶胶中, 雾-霾天主要检出的为厚壁菌门细菌 (>75%), 而当雾-霾消散后, 厚壁菌门细菌的含量下降至 40.18%, 降低了约 49.78%。而在小于 7.0 μm 的气溶胶中, 雾-霾天粒径 3.3 ~ 4.7、2.1 ~ 3.3、1.1 ~ 2.1 和 0.65 ~ 1.1 μm 的气溶胶中, 变形菌门细菌含量分别为 95.5%、45%、23.53% 和 45%。当雾-霾消散后, 未检出可培养变形菌门细菌。对于真菌种群而言, 雾-霾天不同粒径气溶胶中均检出了隶属于子囊菌门、担子菌门和球囊菌门的真菌, 而雾-霾消散后则只检出隶属于子囊菌门的真菌。雾-霾天及晴天不同粒径气溶胶微生物特性的差异可为后续雾-霾天近地面处气溶胶的控制提供一定的参考依据。

雾-霾天的相对湿度 (63.50% ~ 86.50%) 高于晴天 (35.00% ~ 40.00%), 较高的湿度利于气溶胶中微生物的生长^[25]。已有研究表明, 低风速会影响颗粒物的扩散与传播^[26]。本研究中, 雾-霾天的风速仅为 0.02 ~ 0.07 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (而晴天的风速可达到 1.10 ~ 7.83 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 极易造成雾-霾天气溶胶颗粒物及其上微生物的富集。对于粒径大于 1 μm 的生物气溶胶, 在其扩散过程中, 重力作用远重要于布朗运动^[27]。本研究采样位置设置在近地面高度 1.5 m 处, 低风速下的不同粒径气溶胶的沉降速率是不同的, 进而影响人体平均高度不同粒径的微生物浓度。

不同于以往户外气溶胶研究主要针对其中化学组分来展开, 且样品采集位置较高。本研究主要与人体健康直接相关的人平均呼吸高度处不同粒径的气溶胶中微生物的浓度和种群结构角度展开, 并且得出初步的结果。但是, 目前本研究仍存在以下问题, 需进一步深入研究: ①样品采集时间较短。下一步应展开长期的、不同地域的、不同高度的样品采集与分析, 获得长期不同气象条件下气溶胶中微生物的浓度及种类变化的基础大数据, 进而综合分析气象条件与气溶胶微生物特征之间的时空相关关系, 为雾-霾的控制提供理论基础; ②气溶胶样品采集方法单一。下一步应展开不同样品采集方法 (例如安德森六级采样器、八级采样器、SKC 液相撞击采样器、总颗粒物采样器等) 的采集效率研究, 进一步细化不同研究目的条件下采样器的选择, 为气溶胶样品中微生物的准确收集提供依据; ③微生

物种群结构分析方法需进一步优化. 本研究主要针对可培养微生物而言, 因而选择了引物扩增片段较长(1 500 bp)的引物, 通过克隆文库技术进行分析. 下一步应在不同粒径气溶胶总微生物群落研究方面着重展开, 可采用二代高通量技术、宏基因组技术对气溶胶中总微生物种群、病毒种类、抗生素抗性基因等与人体健康相关的组成展开更为细致精确的研究.

综合以上结果与讨论, 由于气象条件的影响, 雾-霾天人体平均呼吸高度处的不同粒径气溶胶中微生物浓度明显高于晴天, 且其中微生物种群与晴天存在明显差异, 这些均有可能加剧雾-霾对人体健康的潜在危害. 因此, 在雾-霾控制时, 考虑其中微生物组分具有重要意义. 同时, 应加强雾-霾天户外人员的生物防护措施, 防止其受到进一步危害.

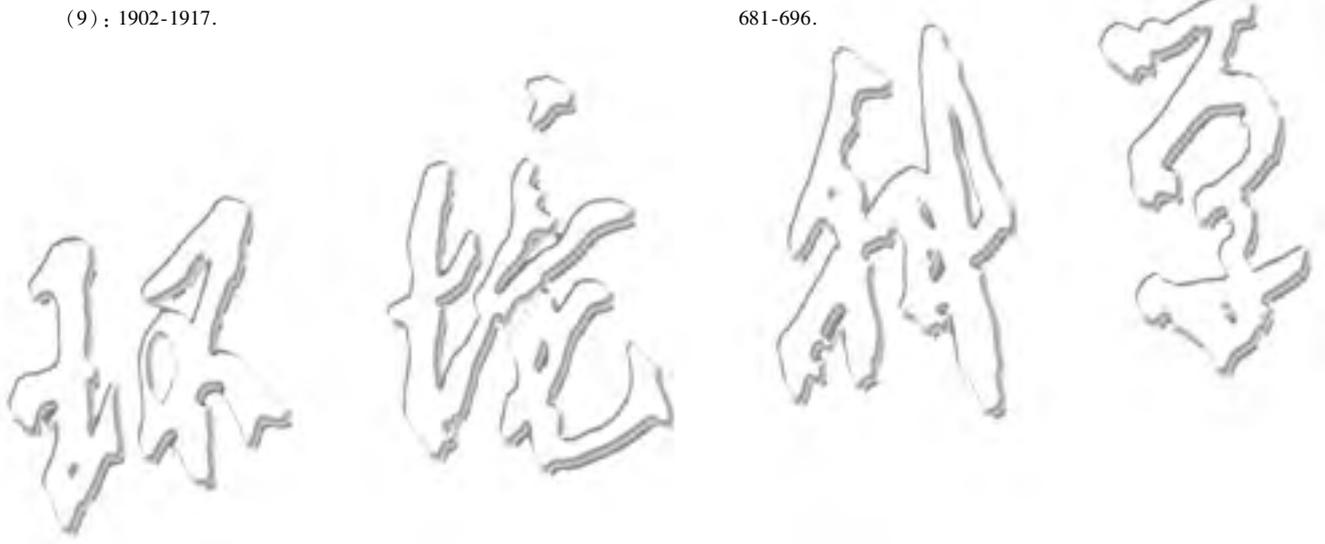
4 结论

本研究针对雾-霾天及雾-霾过后晴天人体平均呼吸高度的气溶胶中微生物浓度和种群结构展开初步研究. 结果表明, 雾-霾天不同粒径气溶胶中微生物浓度均远高于晴天, 而且其中微生物种群结构也与晴天存在明显差异, 这些差异与气象参数的变化有关. 同时这些差异可能与其对人体健康潜在风险具有一定相关性. 因此, 进一步深入细致研究不同气象条件下、不同地域气溶胶中微生物特征对下一步气溶胶风险控制具有重要的意义.

参考文献:

- [1] 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 等. 北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 $PM_{2.5}$ 变化特征对气象因素的响应[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2419-2427.
Zhang N, Xiong H G, Ge X X, *et al.* Response of human respiratory height $PM_{2.5}$ variation characteristics to meteorological factors during winter haze days in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2419-2427.
- [2] 何楷强, 苑春刚, 张可刚, 等. 雾霾天气下室内外颗粒物粒径分布特征[J]. 环境化学, 2018, **37**(3): 410-418.
He K Q, Yuan C G, Zhang K G, *et al.* Size distribution of indoor and outdoor particulate matters during haze pollution[J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(3): 410-418.
- [3] 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3144-3149.
Hu L F, Zhang K, Wang H B, *et al.* Concentration and particle size distribution of microbiological aerosol during haze days in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3144-3149.
- [4] Li Y P, Lu R, Li W X, *et al.* Concentrations and size distributions of viable bioaerosols under various weather conditions in a typical semi-arid city of Northwest China[J]. Journal of Aerosol Science, 2017, **106**: 83-92.
- [5] Liaw S B, Chen X J, Yu Y, *et al.* Effect of particle size on particulate matter emissions during biosolid char combustion under air and oxyfuel conditions[J]. Fuel, 2018, **232**: 251-256.
- [6] 谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰. 青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2667-2678.
Xie D D, Qi J H, Zhang R F. Formation and size distribution of the secondary aerosol inorganic ions in different intensity of haze in Qingdao, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2667-2678.
- [7] Dong L J, Qi J H, Shao C C, *et al.* Concentration and size distribution of total airborne microbes in hazy and foggy weather[J]. Science of the Total Environment, 2015, **541**: 1011-1018.
- [8] Chew B N, Campbell J R, Hyer E J, *et al.* Relationship between aerosol optical depth and particulate matter over Singapore: effects of aerosol vertical distributions[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(11): 2818-2830.
- [9] 纪赵惠子, 张晓凯, 邱军, 等. 济南市雾霾天大气颗粒物能谱分析与粒径形状因子[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, **38**(5): 1340-1347.
Jizhao H Z, Zhang X K, Qiu J, *et al.* Energy spectrum analysis and particle shape factor of atmospheric particulate matter in the hazy weather of Ji'nan[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, **38**(5): 1340-1347.
- [10] 胡元洁. 室内外大气颗粒物和典型有机污染物的环境行为及人体呼吸暴露风险[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2018. 175-176.
- [11] Liu L Q, Breitner S, Schneider A, *et al.* Size-fractionated particulate air pollution and cardiovascular emergency room visits in Beijing, China[J]. Environmental Research, 2013, **121**: 52-63.
- [12] Gao M, Jia R Z, Qiu T L, *et al.* Seasonal size distribution of airborne culturable bacteria and fungi and preliminary estimation of their deposition in human lungs during non-haze and haze days[J]. Atmospheric Environment, 2015, **118**: 203-210.
- [13] University of Florida and Washington University. Respiratory deposition [EB/OL]. <http://aerosol.ees.ufl.edu/respiratory/section01.html>, 2017-12-07.
- [14] World Health Organization (WHO). Climate and health country profiles-2015: a global overview [EB/OL]. <http://www.who.int/mediacentre/news/statements/2015/climate-change/en>, 2015-11-17.
- [15] 李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 等. 沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3169-3177.
Li H T, Qi J H, Dong L J, *et al.* Influence of dust events on the concentration and size distribution of microorganisms in bioaerosols[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3169-3177.
- [16] 孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 等. 青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4147-4155.
Meng X B, Li M Z, Li H T, *et al.* Microbial activity in bioaerosols in winter at the coastal region of Qingdao [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4147-4155.
- [17] Lee B U, Lee G, Heo K J. Concentration of culturable bioaerosols during winter[J]. Journal of Aerosol Science, 2016, **94**: 1-8.
- [18] Xu G S, Han Y P, Li L, *et al.* Characterization and source analysis of indoor/outdoor culturable airborne bacteria in a municipal wastewater treatment plant [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **74**: 71-78.

- [19] Mentese S, Rad A Y, Artsoy M, *et al.* Seasonal and spatial variations of bioaerosols in indoor urban environments, Ankara, Turkey[J]. *Indoor and Built Environment*, 2012, **21**(6): 797-810.
- [20] Niazi S, Hassanvand M S, Mahvi A H, *et al.* Assessment of bioaerosol contamination (bacteria and fungi) in the largest urban wastewater treatment plant in the Middle East [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(20): 16014-16021.
- [21] Han Y P, Zhang M Z, Li L, *et al.* Microbial population structure in near-ground aerosols during fog-haze days in northern China [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, **10**(9): 1113-1121.
- [22] Han Y P, Li L, Liu J X. Characterization of the airborne bacteria community at different distances from the rotating brushes in a wastewater treatment plant by 16S rRNA gene clone libraries[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(1): 5-15.
- [23] 王艳发, 魏士平, 崔鸿鹏, 等. 青藏高原冻土区土壤垂直剖面中微生物的分布与多样性[J]. *微生物学通报*, 2016, **43**(9): 1902-1917.
- Wang Y F, Wei S P, Cui H P, *et al.* Distribution and diversity of microbial community along a vertical permafrost profile, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Microbiology China*, 2016, **43**(9): 1902-1917.
- [24] Uhrbrand K, Schultz A C, Koivisto A J, *et al.* Assessment of airborne bacteria and noroviruses in air emission from a new highly-advanced hospital wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2017, **112**: 110-119.
- [25] Han Y P, Wang Y J, Li L, *et al.* Bacterial population and chemicals in bioaerosols from indoor environment; Sludge dewatering houses in nine municipal wastewater treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **618**: 469-478.
- [26] Li X, Jiang L, Hoa L P, *et al.* Size distribution of particle-phase sugar and nitrophenol tracers during severe urban haze episodes in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **145**: 115-127.
- [27] Pillai S D, Ricke S C. Review/Synthèse bioaerosols from municipal and animal wastes; background and contemporary issues [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2002, **48**(8): 681-696.



CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)