

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究

孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华*

(中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 为了研究生物气溶胶中微生物活性水平和活性粒径分布特征, 于 2015 年 11 月~2016 年 1 月在青岛近海运用分级生物气溶胶采样器连续采集了生物气溶胶样品, 并用荧光素二乙酸酯 (fluorescein diacetate, FDA) 水解法进行了活性测定. 结果表明, 采样期间青岛地区气溶胶中微生物活性水平 (以荧光素钠计) 范围为 21.89~108.59 ng·m⁻³, 平均值为 59.43 ng·m⁻³. 微生物活性的粒径分布呈现活性随粒径增大而增大, 粗粒径 (>2.1 μm) 高于细粒径 (<2.1 μm) 的特征, 在 >7.0 μm 粗粒子上所占比例最高, 平均为 24.06%. 冬季微生物活性在一天当中变化较大, 并未呈现出明显的昼间变化规律. 相关性分析显示采样期间微生物活性与风速之间存在显著正相关关系 ($r = 0.445$, $n = 33$, $**P < 0.01$), 与温度、湿度和紫外线强度等气象因素以及 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂、O₃、SO₂ 等因子无显著相关性. 气团来源对微生物活性具有明显影响. 晴天微生物活性平均水平为 100.33 ng·m⁻³, 霾天微生物活性降低, 平均水平降为 56.53 ng·m⁻³, 随着雾-霾天持续出现, 活性迅速降低至晴天水平的 37.7%, 可见持续雾-霾天对微生物活性的影响更大.

关键词: 生物气溶胶; 微生物活性; 粒径分布; 霾; 青岛

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4147-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605074

Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao

MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, GAO Dong-mei, QI Jian-hua*

(Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to study the level and size distribution of microbial activity of atmospheric bioaerosols, bioaerosol samples were collected from November 2015 to January 2016 using size-fractionated bioaerosol samplers at the coastal region of Qingdao, and the microbial activity was measured using the fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis method. The results showed that the level of microbial activity was in the range of 21.89-108.59 ng·m⁻³ sodium fluorescein during the sampling period, with an average of 59.43 ng·m⁻³ sodium fluorescein in Qingdao. Size distribution of microbial activity exhibited a tendency, the activity increased with increasing particle size. The microbial activity on particles with coarse size (>2.1 μm) was higher than that on fine size, with the highest average proportion of 24.06% for coarse size larger than 7.0 μm. The daily variation of microbial activity was different for different samples, which showed no significant diurnal variation in winter. The correlation analysis showed that microbial activity was significantly correlated with wind velocity ($r = 0.445$, $n = 33$, $**P < 0.01$) during the sampling period. However, microbial activity showed no significant correlation with the meteorological factors, such as temperature, relative humidity and UV intensity during the sampling period. Moreover, there was no significant correlation of microbial activity with air quality factors, such as AQI, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂, O₃ and SO₂. Source of air mass had significant impact on microbial activity. The average level of microbial activity was 100.33 ng·m⁻³ sodium fluorescein on sunny days, and the level decreased to 56.53 ng·m⁻³ sodium fluorescein on hazy days. When the haze was mixed with fog and this special circumstance lasted for several days, the microbial activity reduced to 37.7% of the level of sunny days. Therefore, consecutive hazy weather had great influence on microbial activity.

Key words: bioaerosols; microbial activity; size distribution; haze; Qingdao

生物气溶胶是来源于陆地或水生环境中各类生物活动所产生的各种大气颗粒物, 包括真菌、细菌、病毒、花粉、植物和动物裂解碎片, 以及各种带有生命活性的物质^[1]. 全球范围内生物气溶胶粒子的年排放量为 56~1 000 Tg^[2]. Matthias-Maser 等^[3]发现在受城市和农村共同影响的地区, 生物气溶胶的数浓度平均值高达 30% 的比例. 而在一些偏远地区, 生物气溶胶体积比可达到 28%^[4].

微生物是生物气溶胶的一个重要组分, 其浓度因时间和地理位置的不同而存在时空差异^[5~7]. 活性是微生物的一个重要指标, 表征微生物进行新陈

代谢或正常生理活动的的能力, 其能力取决于各种物理、化学和生物因素, 以及环境中的营养状况^[8]. Kourtev 等^[9]于 2005 年与 2008 年研究发现在美国中西部大气云水样品中有 76% 的细菌具有生理活性, 代谢活跃的细胞可以通过转变有机碳种类组成^[10,11]或氮的组成^[12]而改变云的化学组成, 因而微生物活性可能会间接对云的形成造成影响, 进而影

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41375143)

作者简介: 孟祥斌 (1992~), 男, 主要研究方向为气溶胶微生物, E-mail: 28257634@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: qjianhua@ouc.edu.cn

响全球气候变化. 此外,在复杂的微生物群落中,存活细胞的比例会限制微生物新陈代谢作用、繁殖能力以及存在潜在的环境健康风险,因此对微生物的活性进行研究是很有必要的.

由于大气不是微生物的良好生境,生物气溶胶中的微生物活性测定存在很大困难. Qi 等^[13]提出一种测定生物气溶胶中微生物活性的荧光素二乙酸酯(fluorescein diacetate, FDA)水解法,该法可成功应用于微生物活性的分析,测得2012年5~12月青岛地区大气环境中微生物活性水平(以荧光素钠计,下同)在 $10.7 \sim 85.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 对于生物气溶胶中微生物活性的研究极其有限,其时空分布特征及变化规律尚未被揭示,粒径分布尚未被报道,而影响微生物活性的环境因素也需要进行进一步探索. 沿海地区生物气溶胶组成及浓度受海陆相互作用的影响^[14,15],具有相对独特的地理环境和气候条件,空气中有些海洋细菌经远距离传输可保持存活状态^[16]. 因此,在沿海地区进行研究有助于了解全球生物气溶胶信息,了解海洋对气溶胶中微生物活性的影响. 本文以青岛作为研究区域,于2015年11月至2016年1月连续采集了生物气溶胶样品,运用FDA法测定了样品中微生物的活性,分析了生物气溶胶中微生物活性的水平和粒径分布特征,初步探讨了特殊天气、环境因子和气团来源对微生物活性的影响.

1 材料与方 法

1.1 采样地点概况

生物气溶胶样品采集于青岛市崂山区中国海洋大学教学区六区楼顶($36^{\circ}16'N, 120^{\circ}50'E$),离地面高度9.0 m左右,四周绿地面积可达50%(图1).

1.2 样品采集过程

生物气溶胶采样仪器为辽阳康洁仪器研究所生产的FA-1型六级筛孔撞击式空气微生物采样器. 其采样流量为 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,按空气动力学直径大小划分为6个粒径范围: $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 、 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 、 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 、 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 和 $>7.0 \mu\text{m}$. 为了方便讨论,本文中 $>2.1 \mu\text{m}$ 的粒子称为粗粒子.

采样时使用三脚架,距离基础地面1.5 m;两个采集平行样品的采样器相距约1.5 m. 常规采样开始于早上08:00,微生物活性样品采样持续时间为40 min,将生物气溶胶收集在已灭菌涂有40%聚乙二醇溶液的聚碳酸酯滤膜(孔径为 $0.22 \mu\text{m}$,直径为

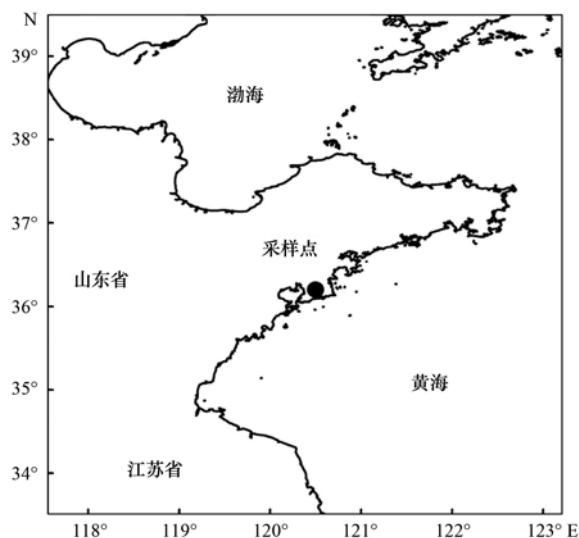


图1 生物气溶胶采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling site for bioaerosols

80 mm)上;总微生物浓度样品采样持续时间为30 min,将生物气溶胶收集在已灭菌的聚碳酸酯滤膜(孔径为 $0.22 \mu\text{m}$,直径为80 mm)上. 常规样品每5 d采集一次,遇到特殊天气加采生物气溶胶样品.

1.3 样品处理过程

生物气溶胶中微生物活性测定采用已有报道方法^[13,17]:采样之前将实验需要的所有材料器具进行高压蒸汽灭菌处理($120^{\circ}\text{C}, 20 \text{ min}$). 用75%酒精擦拭超净台和采样器,之后在超净台中进行实验操作. 将聚碳酸酯膜置于采样器平板上,并均匀涂上 $150 \mu\text{L}$ 聚乙二醇溶液,组装好采样器. 样品采集结束后,将聚碳酸酯膜取出并剪碎,置于盛有20 mL生理盐水($8.5\% \sim 9.0\% \text{ NaCl}$ 溶液)的锥形瓶中,接着使用恒温振荡培养箱在 $37^{\circ}\text{C}, 150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡30 min. 之后往锥形瓶中加入 $200 \mu\text{L}$ $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ FDA溶液,在 30°C 下避光静置反应150 min. 待反应结束后,将样品放入离心机以 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速离心5 min,使用分子荧光光度计(Hitachi,日立荧光光谱仪F-4600,日本),设定激发波长为488 nm,发射波长为530 nm,测定样品溶液中的荧光强度. 同时以空白滤膜代替样品,进行上述操作. 因为荧光素钠能释放出一种黄色荧光物质,这种物质和FDA水解反应的终产物所释放出的荧光物质相同,所以本实验选择荧光素钠作为微生物活性测定的标准物质. 实验时配置一定浓度梯度($0 \sim 10 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)的荧光素钠标准溶液,在 30°C 下避光放置150 min后测定荧光强度值,得到标准曲线 $F = 6.578c + 0.344$, $R^2 = 0.997$ (式中, c 表示荧光素钠浓度, F 表

示荧光强度). 扣除空白后的样品荧光强度值, 通过荧光素钠标准曲线, 换算为单位体积测定液中的荧光素钠浓度, 之后按下式将其换算为单位体积空气里生物气溶胶中的微生物活性水平:

$$M_{a(\text{空气})} = 1000 \cdot V \cdot M_{a(\text{溶液})} / Q \cdot t$$

式中, $M_{a(\text{空气})}$ 为单位体积空气中生物气溶胶微生物活性水平 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$); $M_{a(\text{溶液})}$ 为单位体积溶液中生物气溶胶微生物活性水平 ($\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$); V 为样品溶液体积 (mL); Q 为采样流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为采样时间 (min).

生物气溶胶中总微生物浓度测定采用已有报道的方法^[18]: 将采集的生物气溶胶样品迅速转移到盛有 25 mL 生理盐水和 250 μL 吐温-80 的 250 mL 锥形瓶中, 制成菌悬液, 然后放入恒温振荡培养箱中, 以 120 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速, 振荡培养 30 min. 随后, 将菌悬液抽滤到 0.2 μm 的核孔滤膜上, 用 10 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 4', 6-二脒基-2-苯基吲哚 (4', 6-diamidino-2-phenylindole, DAPI) 进行染色, 15 min 后制片. 在荧光显微镜蓝光道油镜条件下观察, 随机选取 10 个视野, 记录每个视野中蓝色的细胞个数. 参照文献^[10]中提供的公式将其换算为单位体积空气里生物气溶胶中总微生物浓度水平.

1.4 数据统计分析方法

本文中涉及的气象数据 (气温、相对湿度、风速、气压等) 来源于青岛气象局在线数据 (<http://qdqx.qingdao.gov.cn/zdz/ystj.aspx>). 根据中国气象局 MICAPS 地面填图资料, 对天气类型 (晴、雨、雾、霾、沙尘等) 进行划分和统计.

运用统计软件对实验所得到的数据进行分析. 通过相关性分析探究各类环境因素对微生物活性的影响程度, 其相关性程度以 Spearman 相关性系数进行表示. $P \leq 0.05$ 说明显著相关, $P > 0.05$ 说明相关不显著. 运用因子分析探究各因素对微生物活性的综合影响中的贡献程度. 选择特征根 ≥ 1 的因子, 且因子的累计贡献率应达到 70% ~ 85%.

后向轨迹采用美国国家海洋与大气局 (NOAA) 大气资源实验室的 HYSPLIT4 模型.

2 冬季生物气溶胶中微生物活性的分布特征

2.1 生物气溶胶中微生物活性水平

运用 FDA 法测定了 2015 年 11 月 14 日至 2016 年 1 月 5 日青岛地区气溶胶中微生物活性, 平行样品的标准偏差平均为 0.145, 证明该方法稳定性较好. 采样期间微生物活性水平范围为 21.89 ~

108.59 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 59.43 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 总微生物浓度水平范围为 $8.76 \times 10^4 \sim 5.68 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $2.92 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. 如图 2 所示. 微生物活性最高值出现在 2015 年 11 月 27 日, 在采样之前, 青岛整夜大风, 最高风速高达 $9.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大风将地表颗粒物吹到空中, 增加了气溶胶中微生物的浓度, 使其活性相应增加. 最低值出现在 2015 年 11 月 16 日, 分析其原因是当时降雨刚刚结束, 降雨会冲刷空气中的颗粒物, 起到净化空气的作用, 相应导致其活性降低. Qi 等^[13]研究发现, 青岛地区 2012 年 11 ~ 12 月期间, 生物气溶胶中微生物活性范围为 10.7 ~ 40.3 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 相比于 2012 年同期数据, 2016 年的微生物活性水平更高, 这可能是由于近年来青岛生物气溶胶浓度随大气颗粒物浓度增加而增加^[19], 导致空气中微生物浓度有所增加, 微生物活性也相应地有所升高.

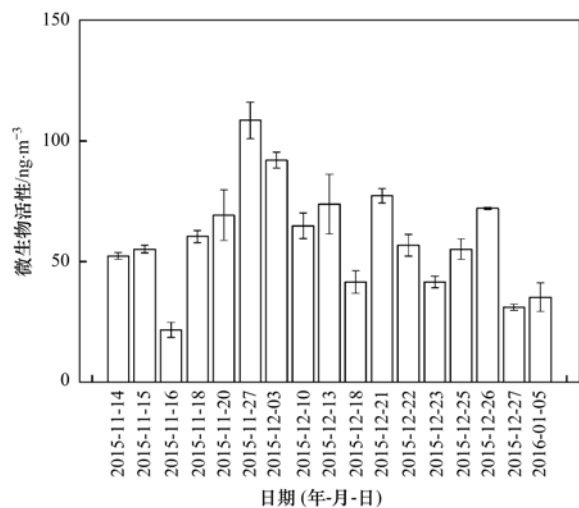


图 2 青岛生物气溶胶微生物活性变化

Fig. 2 Variation of microbial activity of atmospheric bioaerosols

2.2 生物气溶胶中微生物活性的粒径分布特征

粒径对生物气溶胶在大气中的存在状态、大气传输过程等都会产生影响. 2015 年 11 月 14 日至 2016 年 1 月 5 日期间青岛生物气溶胶中微生物活性与总微生物浓度的粒径分布如图 3 所示. 微生物活性和总微生物浓度的粒径分布均呈现出粗粒径 ($> 2.1 \mu\text{m}$) 高于细粒径 ($< 2.1 \mu\text{m}$) 的特征. 微生物活性在 $> 7.0 \mu\text{m}$ 粒径上所占据的比例最高, 平均为 24.06%, 明显高于其他粒级. 微生物活性在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 粒径上所占比最低, 平均为 12.87% (表 1). 微生物活性粒径分布呈现活性随粒径减小而降低的趋势. 微生物活性的高值主要分布在粗粒径上, 这是因为生物气溶胶中微生物主要

表 1 青岛生物气溶胶微生物各粒径上活性所占百分比平均值

Table 1 Average percentage of microbial activity on each particle size in Qingdao

粒径/ μm	0.65 ~ 1.1	1.1 ~ 2.1	2.1 ~ 3.3	3.3 ~ 4.7	4.7 ~ 7.0	> 7.0
数值/%	12.87	14.09	14.13	15.58	19.26	24.06

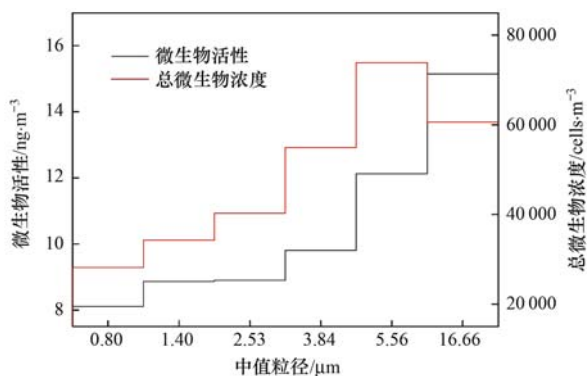


图 3 青岛生物气溶胶微生物活性与总微生物浓度的粒径分布

Fig. 3 Size distribution of microbial activity and concentration of total microbes in Qingdao

分布在粗粒子中^[10].

不同类型的微生物具有不同的粒径范围,病毒等通常小于 $0.2 \mu\text{m}$; 真菌孢子大多是单独悬浮在大气中,粒径呈对数正态分布, $1.0 \sim 6.0 \mu\text{m}$ 的粒子约占 70.0%; 空气细菌大多附着在大气颗粒上,呈偏态分布,大于 $2.0 \mu\text{m}$ 的粒子约占总数的 80.0%^[20]. 通常,粗粒径颗粒上会附着大量的细菌,粗颗粒物可以为细菌提供更好的庇护作用,减少它受紫外线环境暴露的影响,同时为它们提供生命所必须的碳源和能源,因而有利于微生物的存活,增强其活性. 而细颗粒物表面积较小,微生物难以附着,并且细颗粒物作为污染物的载体,吸附多种化学组分,具有更高的毒性作用^[21],不利于微生物存活. 徐文兵^[22] 研究发现青岛地区生物气溶胶中细菌、真菌和总微生物主要分布于粗粒子中,因此粗颗粒物上微生物活性较高.

11 月与 12 月微生物活性的月均粒径分布相似,仍然是粗粒径高于细粒径的特征. 不同之处在于 12 月 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 比例高于 11 月. 分析原因是进入 12 月青岛地区受供暖影响,大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 含量增多导致.

2.3 生物气溶胶中微生物活性的昼间变化

为了了解生物气溶胶中微生物活性的昼间变化,于 2015 年 11 月的 14 日、16 日、18 日、20 日的 08:00、12:00、15:00、19:00 分别采集生物气溶胶微生物样品,测定了其活性,结果如图 4 所示.

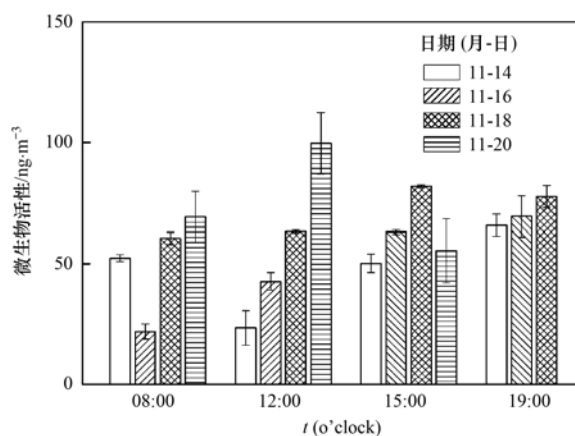


图 4 青岛生物气溶胶微生物活性的昼间变化

Fig. 4 Variation of microbial activity during the daytime in Qingdao

可见,微生物活性在一天当中变化较大,不同样品并未呈现出明显的变化规律. 微生物活性受到来源、天气条件和气象因素的影响,而一天中不同时间,这些影响微生物的主要影响因素也是存在差异的^[23]. 本研究认为微生物活性昼间变化较复杂的原因,一方面是活性受到天气类型、温度、湿度、风速、紫外线等气象因素和环境污染物质等诸多影响. 另一方面采集到的样品较少,气溶胶微生物活性的昼间变化规律有待进一步研究.

3 青岛气溶胶微生物活性影响因素分析

3.1 利用 Spearman 相关分析对微生物活性影响因素进行分析

为了研究微生物活性的影响因素,将采样期间内的气象因素和环境污染因子与活性水平进行相关性分析. 表 2 给出了研究过程中生物气溶胶中微生物活性与这些因子之间的 Spearman 相关系数.

如表 2 所示,冬季采样期内青岛 AQI 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 、 O_3 、 SO_2 这些污染指标与微生物活性无显著相关,可能与这些污染物的浓度并未达到对微生物损害的阈值有关. 温度、湿度和紫外线强度与微生物活性也无显著相关关系,只有风速与活性存在显著负相关关系.

采样期间内,相关性分析显示微生物活性与温度之间不存在显著相关关系. 采样期间内温度变化幅度较大,由 11 月 20 日的 11.5°C 降低至 11 月 27

表 2 采样期间生物气溶胶中微生物活性与气象因素和环境质量因子之间的 Spearman 相关系数¹⁾

Table 2 Spearman correlation coefficient between meteorological factors, air quality factors and microbial activity during the sampling period

项目	微生物活性($n=33$)
温度	-0.294
相对湿度	-0.289
风速	0.445 **
AQI	-0.034
PM _{2.5}	-0.047
PM ₁₀	-0.018
CO	-0.155
NO ₂	-0.172
O ₃	0.038
SO ₂	-0.015
UV254	0.204
UV297	0.195
UV365	0.168
UV420	0.151

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关(双尾检验); * 表示在 0.05 水平上显著相关(双尾检验)

日的 -5.2°C , 一周内降温幅度达到 16.7°C , 又于 12 月 2 日升至 6.6°C , 5 日内升温幅度为 11.8°C . 通常低温会导致细胞膜流动性降低, 微生物的酶促反应活动减缓, 而高于微生物承受的临界温度值则会导致生物蛋白质变性和失活^[24]. 类似大幅度的温差变化在整个实验过程中出现多次, 强烈的温差变化影响着微生物活性对于温度的响应, Qi 等^[13]的研究也没有发现气温与微生物活性之间存在明显的相关性, 与本研究的结果相同. 为更好地了解温度对微生物活性的影响, 仍然需要积累大量数据, 对生物气溶胶的影响因素进行进一步研究.

微生物活性与相对湿度之间同样不存在显著相关关系, 但除去特殊天气下的样品, 微生物活性与相对湿度之间呈现出显著负相关关系, Spearman 相关系数为 -0.560 ($n=24$, $**P<0.01$). 有研究表明青岛地区相对湿度在 $31\% \sim 89\%$ 范围内, 生物气溶胶中微生物活性水平与相对湿度存在显著相关关系^[17], 与本研究得到的结果相同. 同时有研究发现雾天、霾天等特殊天气对微生物浓度和活性具有很大影响^[18,25], 笔者认为特殊天可能会影响微生物活性与相对湿度之间的相关性.

本研究结果显示, 采样期间微生物活性与风速之间存在显著正相关关系, Spearman 相关性系数为 0.445 ($n=33$, $**P<0.01$). 风对生物气溶胶的影响比较复杂. 一方面, 高风速通过吹动会加速微生物的释放过程, 加速土壤及植物的表面活动^[26]增加

空气中的微生物浓度; 另一方面, 高风速会促进局地生物气溶胶的扩散与输送, 从而减少空气中微生物的浓度. 风速对生物气溶胶影响的主导作用随研究区域、研究期间的环境条件不同而不同. 有研究指出, 风速与孢子的释放和扩散显著相关^[23], 胡庆轩等^[27]研究发现, 大风能增加大气细菌气溶胶浓度, 且与风速呈明显的正相关关系, 同时大风使大气细菌粒子的浓度增加 45.8 倍. 在本研究期间, 风速与微生物活性亦呈现显著正相关, 因此在本研究期间风速主要促进了微生物的释放, 从而使微生物活性升高.

3.2 利用因子分析对微生物活性影响因素进行分析

为了研究微生物活性影响因素之间的综合作用, 将采样期间内的气象因素和环境污染因子进行因子分析. 经过分析, 提取出 3 个主成分. 表 3 给出所有因子得分系数.

表 3 采样期间气象因素和环境质量因子得分系数

Table 3 Component score coefficient between meteorological factors, and air quality factors during the sampling period

项目	成分 1	成分 2	成分 3
温度	0.044	-0.016	0.428
相对湿度	0.177	-0.045	0.380
风速	-0.136	-0.050	-0.142
AQI	0.174	0.025	0.017
PM _{2.5}	0.173	0.021	0.006
PM ₁₀	0.169	0.022	0.018
CO	0.161	-0.004	-0.030
NO ₂	0.157	-0.051	0.033
O ₃	-0.092	0.044	0.154
SO ₂	0.014	0.022	-0.348
UV254	0.005	0.244	-0.065
UV297	0.011	0.244	0.017
UV365	0.008	0.247	-0.007
UV420	-0.003	0.251	-0.027

3 个成分的方差贡献率分别为 39.19%、28.42% 和 15.89%, 累积方差贡献率为 83.50%. 从表 3 中可以看出在成分 1 中相对湿度、风速、AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂ 的影响较大; 成分 2 中 UV254、UV297、UV365、UV420 的影响较大; 成分 3 中温度、相对湿度、风速、O₃ 和 SO₂ 的影响较大.

可见, 生物气溶胶中微生物活性水平的影响因素比较复杂, 活性的变化可能是多种气象因素和环境污染因子综合作用的结果. 因此对气象因素和环境污染因子对生物气溶胶中微生物活性水平影响的研究, 还有待于积累不同天气、不同区域的大量数据, 通过对长期、大量样品的分析, 同时借助于一定

的模型预测,得出不同气象因素和环境污染因子对生物气溶胶中微生物活性影响的结论。

4 青岛气溶胶中气团来源对微生物活性的影响

为了研究气团来源对微生物活性的影响,对所有样品做了大气后向轨迹分析,如图5所示。

从图5中可以看出采样期间青岛地区气溶胶来

源大多来源于陆地,根据陆地来源差异,将气团来源分为来自北方、南方和海洋这3类。来自北方的气团主要来自俄罗斯或蒙古,经京津等北方地区经山东半岛西北部到达青岛;来自南方的气团主要从长江中下游平原传输到青岛;另有部分气团来自海上,从不同方向到达青岛。将这3类来源的微生物活性和浓度进行了对比,如表4。

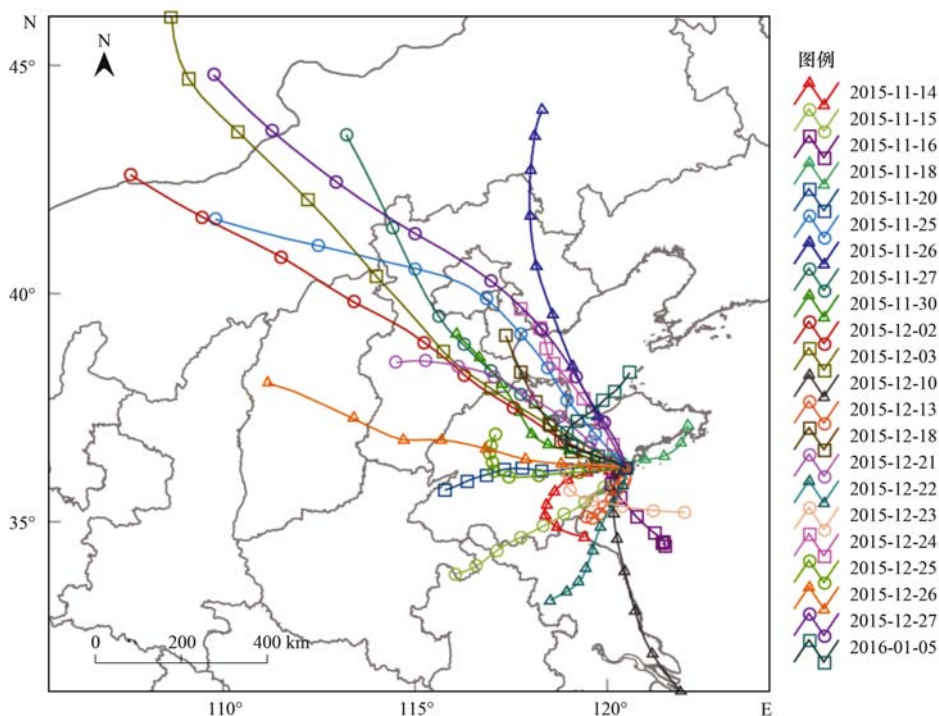


图5 采样期间青岛地区后向轨迹图

Fig. 5 Back trajectory during sampling period in Qingdao

表4 青岛不同气团来源生物气溶胶中微生物活性、浓度和PM浓度

Table 4 Microbial activity, concentration and PM data of bioaerosols from different sources in Qingdao

来源	活性	浓度	PM _{2.5}	PM ₁₀
北方	70.29	3.37×10^5	110	131
南方	59.16	3.08×10^5	93	129
海洋	21.89	2.76×10^5	52	80

可以看出不同气团来源的微生物活性、总微生物浓度、PM_{2.5}和PM₁₀存在明显差异,均呈现来自北方>来自南方>来自海洋的趋势。海洋源生物气溶胶活性和浓度低于陆地源生物气溶胶,尤其是活性只有陆地源的33.8%。分析其原因可能是海洋受人类活动影响较小,污染水平较低,海洋上空空气相对于陆地较为洁净,因此来源于海洋的生物气溶胶微生物活性和总微生物浓度较低。由于青岛地处胶东半岛南部,南面靠海,因此来自南方的大部分生物气

溶胶会经过海洋上空洁净空气的稀释,相对于来自北方的气溶胶活性和浓度有所降低。而来自北方的气团传输距离较长,传输过程中,下风向区域环境中微生物的汇入使得微生物浓度和活性较高。

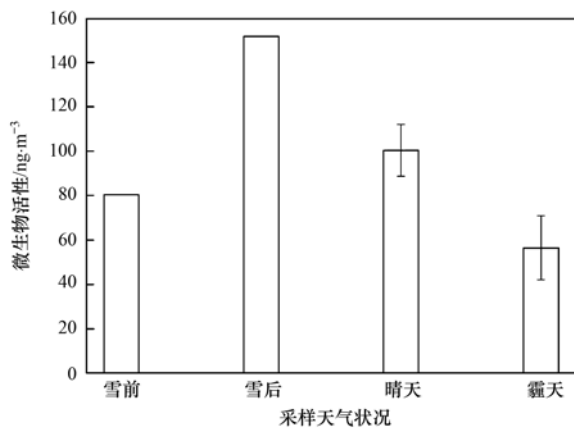
由于本研究数据量较少且对于海洋上空气溶胶的相关研究极其有限,今后仍需进行大量研究以探究不同来源生物气溶胶对于微生物活性的影响。

5 青岛气溶胶中微生物活性在特殊天气下的变化

5.1 特殊天气下生物气溶胶中微生物活性水平

在采样期间出现了雪天、霾天等特殊天气,采集了此类特殊天气下的生物气溶胶样品,测定了其活性,将非特殊天所测得微生物活性水平作为参照,初步分析了冬季降水和霾对微生物活性的影响,如图6所示。

于11月25日15时测得雪前微生物活性为 $80.25 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,总微生物浓度为 2.21×10^5



雪后只有一组平行样,误差棒表示不同日期采集的多组平行样品的标准偏差

图 6 青岛生物气溶胶微生物活性在特殊天和正常天状况下的对比

Fig. 6 Comparison of microbial activity between special days and normal days in Qingdao

cells·m⁻³; 11月26日16:00降雪过后测得微生物活性为151.91 ng·m⁻³,总微生物浓度为2.39 × 10⁵ cells·m⁻³. 由于雪后风速高于雪前,根据前述相关性分析可知,高风速有利于空气中微生物浓度增加,因此出现了雪后微生物活性升高现象.当然,采集到的样品较少,降水对微生物活性的影响还有待于进一步研究.

相对于雪天,霾天出现次数较多,因此将霾天和相邻晴天多组微生物活性水平取平均进行对比分析.晴天微生物活性平均水平为100.33 ng·m⁻³,霾天微生物活性平均水平降为56.53 ng·m⁻³,相对于晴天降低了43.7%;晴天总微生物浓度平均水平为2.52 × 10⁵ cells·m⁻³,霾天总微生物浓度平均水平为2.96 × 10⁵ cells·m⁻³,相对于晴天升高17.4%.可见霾天活性低于晴天,霾天浓度高于晴天,初步分析其原因可能是由于霾天AQI升高,空气中颗粒物的含量增多相应导致总微生物浓度升高,但空气中所含污染物累积抑制了微生物活性,使微生物活性水平降低.

5.2 生物气溶胶微生物活性在连续雾-霾天下的变化

青岛地区于2015年12月21~26日出现连续雾-霾天气,本课题组进行了连续观测,得到了生物气溶胶中微生物活性在连续雾-霾天下的变化.连续7d的微生物活性、总微生物浓度、温度、相对湿度、风速AQI和PM_{2.5}的变化对比见图7.

这连续观测的7d内,不仅出现霾,还出现多次雾-霾混合和转化,相对湿度范围在70%~97%,变

化较小,没有出现典型霾天时的低湿度.2015年12月21日青岛出现了重度雾、霾混合天气,风速较低,相对湿度较高,PM_{2.5}和AQI很高,总微生物浓度微生物为3.21 × 10⁵ cells·m⁻³,微生物活性为77.36 ng·m⁻³荧光素钠,比晴天时微生物活性降低22.9%.在随后两天,风速一直很低,温度升高,霾天消散得很慢,AQI和PM_{2.5}逐步降低,总微生物浓度有所降低,活性也随之降低至37.81 ng·m⁻³荧光素钠.到了12月23日08:00,出现雾天,相对湿度增加,PM_{2.5}和AQI略有增加,总微生物浓度跃升至4.84 × 10⁵ cells·m⁻³,活性略微增加至41.84 ng·m⁻³.12月24日,风速很低,又出现霾天.AQI和PM_{2.5}显著增加,但活性变化不大,为41.65 ng·m⁻³,总微生物浓度有所降低.12月25日霾天又转化为雾天,AQI和PM_{2.5}略有降低,活性略有升高,但是总微生物浓度显著降低.12月26日08:00,AQI依然高达236,但雾-霾逐渐消散,天空逐渐放晴,雾-霾消散会使得空气中有毒物质含量减少,但此时空气中仍然悬浮着大量颗粒物,总微生物浓度略有升高,微生物活性逐渐升至72.15 ng·m⁻³.12月27日出现大风降温天气,温度、湿度显著降低,风速增加至6.2 m·s⁻¹,雾-霾彻底消散,AQI和PM_{2.5}迅速降低至35和14,微生物活性也降低到31.37 ng·m⁻³,比晴天时微生物活性降低68.7%,为整个连续雾-霾过程中最低值,然而此时总微生物浓度升高到了整个过程中的最高值.大风降温天气对生物气溶胶浓度有着双重影响.一方面,风速增大使地面的尘埃和泥沙在风的动力作用下进入空气中增加了气溶胶中总微生物浓度,同时又可以使生物气溶胶颗粒在风的扰动下随气流在垂直和水平方向上扩散,使气溶胶中总微生物浓度降低.分析其原因可能是由于在采样期间内大风降温的综合作用体现为增加总微生物浓度并且对空气中细颗粒物有显著的净化作用.虽然反映微生物数量的总微生物浓度增加了,但是在大风强降温天气中温度降低幅度很大,限制了微生物的生长繁殖,因此微生物活性显著降低^[28].可见,从12月21~26日雾-霾天结束,随着雾、霾的出现和持续,微生物活性逐渐降低,和风速的变化相似,随着风速增加,霾天缓慢消散,微生物活性又有增加的趋势,这与之前的微生物活性与风速存在正相关一致.霾天初现时,微生物活性较晴天低,降低了22.9%,但随着雾-霾天持续出现,可能由于环境中污染物的持续积累,不利于微生物存活,活性迅速降低了68.7%.可见,持续雾-

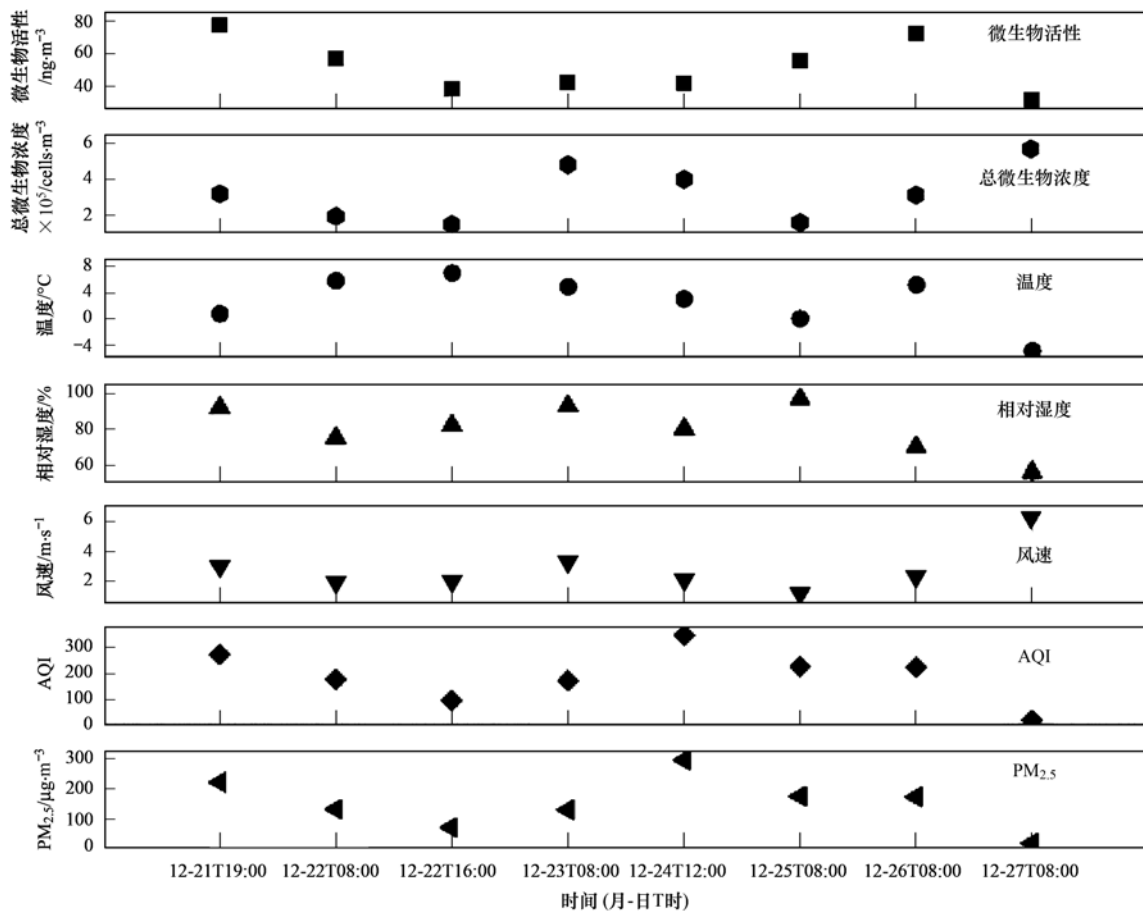


图7 青岛生物气溶胶微生物活性在连续雾-霾天下的变化

Fig. 7 Variation of microbial activity in consecutive hazy days mixed with fog in Qingdao

霾天对微生物活性的影响更大更复杂。

6 结论

冬季青岛地区气溶胶中微生物活性水平在 $21.89 \sim 108.59 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 较 2012 年有所升高, 微生物活性日变化较大, 并未呈现出明显的变化规律。微生物活性的粒径分布呈现活性随粒径增大而增大, 粗粒径高于细粒径的特征。霾天对微生物活性有很大影响, 活性显著降低, 且持续雾-霾天对微生物活性影响更加复杂。本研究期间微生物活性与风速存在显著正相关关系, 与其他气象和空气污染因子无显著相关性。不同气团来源的微生物活性存在明显差异。要全面了解影响微生物活性的主要环境因素, 有待于在不同地区不同时间收集更多样品, 进行深入研究。

参考文献:

- [1] Ariya P A, Amyot M. New Directions; the role of bioaerosols in atmospheric chemistry and physics [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (8): 1231-1232.
- [2] Jaenicke R. Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere [J]. *Science*, 2005, **308** (5718): 73.
- [3] Matthias-Maser S, Jaenicke R. The size distribution of primary biological aerosol particles with radii $>0.2 \mu\text{m}$ in an urban/rural influenced region [J]. *Atmospheric Research*, 1995, **39** (4): 279-286.
- [4] Matthias-Maser S, Obolkin V, Khodzer T, *et al.* Seasonal variation of primary biological aerosol particles in the remote continental region of Lake Baikal/Siberia [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **34** (22): 3805-3811.
- [5] Bowers R M, Clements N, Emerson J B, *et al.* Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near-surface atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (21): 12097-12106.
- [6] Kaarakainen P, Meklin T, Rintala H, *et al.* Seasonal variation in airborne microbial concentrations and diversity at landfill, urban and rural sites [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2008, **36** (7): 556-563.
- [7] Qi J H, Shao Q, Xu W B, *et al.* Seasonal distribution of bioaerosols in the coastal region of Qingdao [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2014, **13** (1): 57-65.
- [8] Green V S, Stott D E, Diack M. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: optimization for soil samples [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38** (4): 693-701.
- [9] Kourtev P S, Hill K A, Shepson P B, *et al.* Atmospheric cloud

- water contains a diverse bacterial community[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(30): 5399-5405.
- [10] Amato P, Demeer F, Melaouhi A, *et al.* A fate for organic acids, formaldehyde and methanol in cloud water: their biotransformation by micro-organisms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(15): 4159-4169.
- [11] Deguillaume L, Leriche M, Amato P, *et al.* Microbiology and atmospheric processes: chemical interactions of primary biological aerosols[J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**(4): 1073-1084.
- [12] Hill K A, Shepson P B, Galbavy E S, *et al.* Processing of atmospheric nitrogen by clouds above a forest environment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D11): D11301.
- [13] Qi J H, Zhong X, Shao Q, *et al.* Microbial activity levels in atmospheric bioaerosols in Qingdao[J]. *Aerobiologia*, 2015, **31**(3): 353-365.
- [14] Chow J C, Watson J G, Green M C, *et al.* Cross-border transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(11): 1833-1843.
- [15] Marks R, Jankowska K, Michalska M, *et al.* Sea to air bacteria transfer over the baltic sea coast and Gulf of Gdańsk[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, **28**(S1): S593-S594.
- [16] Marks R, Kruczalak K, Jankowska K, *et al.* Bacteria and fungi in air over the Gulf of Gdańsk and Baltic sea [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, **32**(2): 237-250.
- [17] 邵倩. 青岛地区生物气溶胶中微生物活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Shao Q. Microbial activity in bioaerosols in Qingdao area [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [18] 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.
- [19] 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*, 2016, **541**: 1011-1018.
- [20] 祁建华, 高会旺. 生物气溶胶研究进展: 环境与气候效应[J]. *生态环境*, 2006, **15**(4): 854-861.
- Qi J H, Gao H W. Environment and climate effect of bioaerosol: a review [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(4): 854-861.
- [21] 张文丽, 徐东群, 崔九思. 空气细颗粒物(PM_{2.5})污染特征及其毒性机制的研究进展[J]. *中国环境监测*, 2002, **18**(1): 59-63.
- Zhang W L, Xu D Q, Cui J S. The characteristics and toxic mechanism of fine particle pollution (PM_{2.5}) in air [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(1): 59-63.
- [22] 徐文兵. 青岛近海地区生物气溶胶季节分布特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Xu W B. Seasonal distribution of bioaerosol in the qingdao coastal region [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [23] Kurkela T. The number of *Cladosporium conidia* in the air in different weather conditions [J]. *Grana*, 1997, **36**(1): 54-61.
- [24] Slonczewski J L, Foster J W. *Microbiology: an evolving science* [M]. New York, USA: W. W. Norton & Company, 2009.
- [25] 钟茜. 青岛生物气溶胶中微生物活性分布特征及其影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Zhong Q. Distribution characteristics and influencing factors of microbial activity in bioaerosols in Qingdao [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [26] Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **326**(1-3): 151-180.
- [27] 胡庆轩, 车凤翔, 陈振生, 等. 大风对大气细菌粒子浓度和粒度分布的影响[J]. *中国环境监测*, 1991, **7**(6): 5-8.
- [28] 刘苗苗. 青岛近海秋冬季生物气溶胶分布特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- Liu M M. Study on distribution of bioaerosol in fall and winter in Qingdao coastal region [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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