

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.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征

宫静^{1,2}, 祁建华^{1,2*}, 李鸿涛¹

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266071)

摘要: 为了解生物气溶胶中总微生物浓度的月季分布和粒径分布特征, 于2016年9月~2017年7月期间在青岛近海连续采集了大气生物气溶胶分级样品, 并利用DAPI染色-荧光显微镜计数方法测定了生物气溶胶中总微生物浓度。结果表明, 采样期间青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度范围为 $1.86 \times 10^5 \sim 2.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $(6.84 \pm 4.83) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。大气中总微生物浓度的季节变化为春季和冬季较高, 夏季较低, 秋季最低, 统计分析显示秋季和春季、夏季大气中总微生物浓度具有明显的季节变化差异($P < 0.05$)。生物气溶胶中总微生物月均浓度在 $2.65 \times 10^5 \sim 1.12 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 最高值出现在2017年2月, 最低值出现在2016年9月。2015~2017年青岛秋冬季大气中总微生物浓度一日中变化较大, 但并未呈现出明显的日变化规律($P > 0.05$)。生物气溶胶中总微生物的粒径分布呈现偏态分布, $>7.0 \mu\text{m}$ 粒径所占比例最高, 可达20.5%~27.3%; 粒径分布随月份不同而有变化, 呈现双峰分布和偏态分布两类。相关性分析显示, 总微生物浓度与AQI、CO、PM_{2.5}和PM₁₀等因子呈显著正相关($P < 0.05$), 与温度、风速和风向等气象因素以及NO₂、SO₂和O₃等因子无显著相关($P > 0.05$)。多元线性回归模拟结果显示, 生物气溶胶总微生物浓度中20.6%的变化与相对湿度和PM_{2.5}相关。

关键词: 生物气溶胶; 总微生物浓度; 季节分布; 粒径分布; 气象参数

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3477-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901262

Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao

GONG Jing^{1,2}, QI Jian-hua^{1,2*}, LI Hong-tao¹

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to determine the concentrations and size distributions of total airborne microbes in atmospheric bioaerosols, bioaerosol samples were collected in the coastal region of Qingdao, China, from Sep. 2016 to Jul. 2017 using size-fractionated bioaerosol samplers. The concentrations of total airborne microbes were then measured using an epifluorescence microscope after staining with DAPI (4', 6-diamidino-2-phenylindole). The results showed that the concentrations of total airborne microbes were in the range of $1.86 \times 10^5 \sim 2.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ in Qingdao during the sampling period, with an average of $(6.84 \pm 4.83) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. The concentrations of total airborne microbes showed seasonal variation, with the highest values occurring in spring and winter, and the lowest values in summer and fall. Statistical analysis showed that the concentrations of total airborne microbes in autumn had a significant seasonal difference with spring and summer ($P < 0.05$). The monthly averaged concentrations of total airborne microbes ranged from $2.65 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1.12 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, with the highest values in Feb. 2017 and the lowest in Sep. 2016. Total microbe concentrations also varied greatly over a diurnal timescale in fall and winter during the period of 2015 to 2017, but this variation was not statistically significant ($P > 0.05$). Overall, the size distribution of total airborne microbes was skewed, with the highest ratio occurring at $>7.0 \mu\text{m}$ with a ratio of 20.5%-27.3%. The monthly averaged size distribution of total airborne microbes varied between months, showing two main distribution types, specifically bimodal and skewed patterns, respectively. Spearman's rank correlation analysis showed that the AQI and the concentrations of CO, PM_{2.5}, and PM₁₀ had a significant positive correlation with the concentrations of total airborne microbes ($P < 0.05$), while air temperature, wind speed and direction, NO₂, SO₂, and O₃ were not significantly correlated with the airborne microbe concentration during the sampling period ($P > 0.05$). Multiple linear regression showed that 20.6% of the variation in the total microbe concentrations in bioaerosols correlated with relative humidity and PM_{2.5}.

Key words: bioaerosols; total microbial concentration; seasonal distribution; size distribution; meteorological parameters

生物气溶胶指大气中粒径在 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 含有或附着有微生物或生物大分子等具有生命活性物质的气溶胶粒子, 包括细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉、细胞碎片和生物膜等^[1~3]。生物气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 数浓度约占大气气溶胶的25%, 而且数浓度的变动范围很大, 9 d内其占比可从16%变化到50%^[3, 4]。生物气溶胶中的微生物

能够在大气中形成休眠体, 从而可以在大气中存活较长时间, 并能够借助空气介质进行扩散和传输,

收稿日期: 2019-01-31; 修订日期: 2019-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775148); 中央高校基本科研业务费专项(201762006)

作者简介: 宫静(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气生物气溶胶, E-mail: gongjing@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者, E-mail: qjianhua@ouc.edu.cn

从而引发人类各种急、慢性疾病以及动植物疾病^[5]。除了人体健康效应外,生物气溶胶中的微生物可以通过吸收和反射太阳光来影响全球气候系统^[6],还能作为云凝结核(CCN)^[7]和冰核(IN)^[8],导致云滴和冰晶的形成,从而间接影响全球气候变化。因此,研究生物气溶胶中的微生物,对了解生物气溶胶的气候和健康效应是非常必要的,其相关研究也逐渐成为大气科学领域研究的热点。

微生物是生物气溶胶中的重要一类,包括真菌、细菌和放线菌等。许多研究集中于生物气溶胶中的微生物,目前在微生物的季节和粒径分布研究方面取得了一定的进展。根据文献报道,大气生物气溶胶中的总微生物浓度值在 $10^4 \sim 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[9~12],但不同地区和时间总微生物浓度变化较大,即便在同一地区不同年份也存在较大差异,比如青岛 2009 年 6 月~2010 年 6 月总微生物浓度为 $8.50 \times 10^4 \sim 1.66 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[11],2013 年 10 月~2014 年 8 月的总微生物浓度在 $8.49 \times 10^4 \sim 2.11 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间^[12];而西安 2016 年 4 月~2017 年 2 月总微生物浓度在 $7.70 \times 10^4 \sim 1.42 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间^[13]。已有研究显示,大部分地区生物气溶胶中微生物浓度在秋季较高,如青岛^[11]、科罗拉多州北部^[14]、台湾省^[15]和北京^[16]。然而,微生物浓度的季节变化在不同地区也有显著差异,Zhen 等^[17]发现北京细菌的浓度在春季和秋季浓度较高,而西安秋冬季微生物的浓度最高^[13]。Genitsaris 等^[18]发现希腊塞萨洛尼基夏季空气中的细菌达到最高值 $4.1 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见,微生物浓度受到许多生物和非生物因素的影响,包括微生物来源、人为活动和环境条件,具有明显的时空差异,需要在不同地区长期监测。

生物气溶胶中的微生物浓度在不同粒径段上的分布往往是不均匀的,且粒径分布受到研究区域、时间及空气中微生物种类的影响。青岛总微生物粒径呈两种分布模式:峰值在 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 粒径上的单峰分布^[11]和峰值分别在 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 粒径上的双峰分布^[12]。西安^[19]、广州^[20]和青岛^[11]生物气溶胶中可培养真菌主要分布在 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$,然而北京^[21]和新加坡^[22]可培养真菌分别主要分布在 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 和 $1.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 。莫高窟中可培养细菌主要分布在 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ ^[15];在从台湾省中坜市到板桥的火车车厢空气中的细菌浓度主要分布在 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ ^[23];希腊哈尼亚的大气中异养细菌呈现双峰分布,峰值出现在 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $>7.0 \mu\text{m}$ 两个粒径段^[24]。但总体来说,微生物浓度集中分布在粗颗粒物上,已有报道的范围在

$68.0\% \sim 80.0\%$ ^[12, 19, 20, 25, 26]。

有研究发现微生物浓度及粒径的季节变化和地域差异主要是受气候和地理环境的影响^[11, 27],特别是气象和环境因素,例如温度、湿度和风速及 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度等的影响^[28, 29]。生物气溶胶中微生物生存和繁殖的最适温度在 $20.0 \sim 30.0^\circ\text{C}$ 之间^[11, 30, 31],适宜的温度会加速水体、污泥和土壤中的微生物的释放^[29]。相对湿度对生物气溶胶中微生物浓度的影响较复杂,一方面相对湿度在 $40\% \sim 60\%$ 之间时适宜植物向空气中释放真菌孢子^[32],另一方面当相对湿度超过 70% ,生物气溶胶中革兰氏阴性细菌的死亡率随着相对湿度的增加而增加,如黏质沙雷氏菌(*Serratia marcescens*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)和鸡白痢沙门氏菌(*Salmonella pullorum*)^[33]。而生物气溶胶中革兰氏阳性细菌的死亡率在 $50\% \sim 70\%$ 的相对湿度下较高,如白色葡萄球菌(*Staphylococcus albus*)、溶血性链球菌(*Streptococcus haemolyticus*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)^[34]。大气中的细菌等微生物附着在大气环境中的颗粒物上,颗粒物的增加也会导致微生物浓度增加^[35],并且粗颗粒比细颗粒上微生物更丰富^[36]。总体来看,气象和环境因素对生物气溶胶中总微生物浓度的影响研究较少,有待进一步研究。

综上,目前对生物气溶胶中微生物浓度的季节和粒径分布研究已经取得了一定进展,且主要集中于可培养菌,对沿海地区生物气溶胶中总微生物浓度的时间分布及粒径分布特征的研究很有限。而沿海地区生物气溶胶因受海陆相互作用的影响具有相对独特的性质,对于了解生物气溶胶在陆海传输及海洋对生物气溶胶的影响具有重要意义。本文以位于黄海之滨的青岛作为研究区域,于 2016 年 9 月~2017 年 7 月连续采集了生物气溶胶分级样品,系统分析了生物气溶胶中总微生物浓度的日月季变化特征及粒径分布特征,初步探讨了气象和环境空气质量因子对总微生物浓度及粒径的影响。

1 材料与方法

1.1 采样地点

大气生物气溶胶样品采集于中国青岛,采样点如图 1 所示。采样器安装于中国海洋大学教学楼楼顶($36^\circ10'\text{N}$, $120^\circ30'\text{E}$, 离地面 9.0 m),采样器距楼顶 1.5 m ,距离海边约 7.0 km 。采样点周围的树木和草地面积约占总面积的 50% ,附近无工业排放源。

1.2 采样方法

运用 FA-1 撞击式生物采样器(辽阳康洁仪器研究所)采集生物气溶胶样品,将生物气溶胶采集

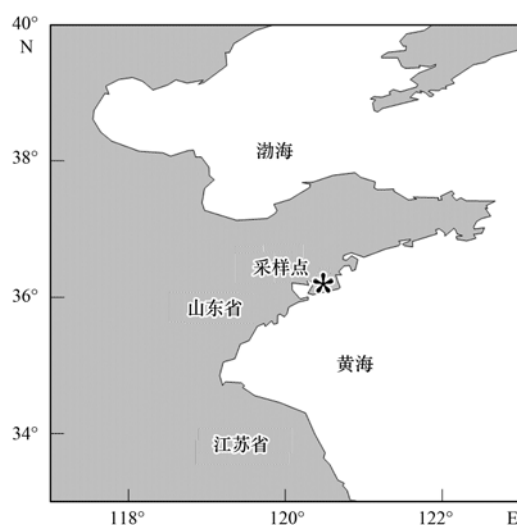


图1 生物气溶胶采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling site for bioaerosols

在直径 80 mm、孔径 0.2 μm 并灭菌的聚碳酸酯滤膜上, 采样流量为 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 每个样品采样 30 min. 2016 年 9 月~2017 年 7 月于每月 5、10、15、20 和 25 日 08:00 采集生物气溶胶样品. FA-1 采样器分六级, 切割粒径范围分别为: >7.0 、 $4.7 \sim 7.0$ 、 $3.3 \sim 4.7$ 、 $2.1 \sim 3.3$ 、 $1.1 \sim 2.1$ 和 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$. 由于采样器的切割范围限制, 本文讨论中将 $>2.1 \mu\text{m}$ 的粒子定义为粗颗粒. 采样期间用北京师范大学光学仪器厂产紫外辐射计 UV-B [UV-254 (230 ~ 290 nm)、UV-297 (250 ~ 350 nm)] 和 UV-A [UV-365 (320 ~ 400 nm) 和 UV-420 (380 ~ 460 nm)] 测定紫外辐射强度.

为了了解青岛生物气溶胶中微生物浓度在 1 d 内的变化情况, 于 2015~2017 年秋冬季进行了生物气溶胶中总微生物浓度日变化的观测. 2015 和 2016 年样品分别采集于每天的 08:00、12:00、15:00 和 19:00; 2017 年样品分别采集于每天的 08:00、11:00、14:00 和 17:00.

1.3 样品处理

采样前, 将采样所用的所有实验材料 [采样膜、离心管、枪头 (10 mL、1 mL)、超纯水和生理盐水 (0.85% ~ 0.9%) 等], 在灭菌锅中进行高温高压灭菌 (121 $^{\circ}\text{C}$, 15 min), 灭菌完成后将采样膜等放入烘箱于 60.0 $^{\circ}\text{C}$ 烘干. 微生物采样器用 75% 的酒精擦拭, 然后放入无菌操作台中紫外灭菌 15 min, 灭菌后将烘干的滤膜放入采样器中. 采样完成后, 将样品膜转入内含 20 mL 0.85% ~ 0.9% 生理盐水的 50 mL 离心管中, 置恒温振荡培养箱于 37.0 $^{\circ}\text{C}$ 在 150 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡 30 min, 制成菌悬液. 振荡完成后, 用 Whatman 黑色核孔滤膜过滤 5 mL 菌悬液, 在样品溶液中加入 600 μL 4', 6-二脒基-2-苯基吲哚

(4', 6-diamidino-2-phenylindole, DAPI) 染色剂, 避光染色 8 min, 在负压条件下, 抽滤至滤膜刚好呈湿润状态, 再将滤膜贴在经过紫外灭菌过的载玻片上, 立即在荧光显微镜下蓝光油镜条件下观察, 记录具有细菌形态呈亮蓝色的菌个数并计算大气中总微生物浓度^[11, 12, 37].

1.4 气象数据和空气质量数据来源

气象参数 [温度 (temperature, T)、相对湿度 (relative humidity, RH)、风向和风速 (wind velocity, WV)] 来源于青岛市气象局 (<http://qdx.qingdao.gov.cn/>). 空气质量指数 (AQI) 和主要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 浓度下载于青岛市环境保护局 (<http://www.qepb.gov.cn/m2/>). 使用 Spearman 相关性分析生物气溶胶与气象参数和空气环境质量指数之间的相关性. $P > 0.05$ 被认为无显著相关性, 而 $P < 0.05$ 被认为是统计学上显著相关. 并采用多元线性回归分析来预测气象和环境因素对大气微生物浓度的影响, 该线性回归模型方程见式 (1)^[38]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中, Y 为总微生物浓度 ($\text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$); $X_1 \sim X_i$ 分别为 $T(^{\circ}\text{C})$ 、 $\text{RH}(\%)$ 和 $\text{WV}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 等气象因子及 AQI 、 $\text{PM}_{10}(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 和 $\text{PM}_{2.5}(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 等环境因素; β_0 为描述不考虑气象和环境因素影响的微生物一般水平的常数; $\beta_1 \sim \beta_i$ 分别为 T 、 RH 和 WV 等气象因子及 AQI 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等环境因素的回归系数; ε 为不可观测的随机误差.

2 结果与讨论

2.1 青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度月季分布特征

2016 年 9 月~2017 年 7 月期间, 本研究测得青岛大气生物气溶胶中总微生物浓度范围在 $1.86 \times 10^5 \sim 2.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 平均值为 $(6.84 \pm 4.83) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 中位值为 $5.77 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. 与 Dong 等^[12] 报道的 2013 年 10 月~2014 年 8 月青岛的平均值 $7.20 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 和西安总微生物浓度平均值 $4.03 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[13] 接近, 略高于 2009 年 6 月~2010 年 6 月青岛总微生物浓度的平均值 $1.31 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[11]. 这是由于在不同地区微生物的源和环境条件不同, 使得微生物浓度随着研究时间和地点的不同而变化^[14].

2.1.1 青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度的季节变化

青岛生物气溶胶中总微生物浓度在春季和冬季

较高, 浓度分别为 $(8.68 \pm 1.21) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(7.43 \pm 6.94) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季较低, 秋季最低, 浓度分别为 $(7.40 \pm 2.16) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(3.93 \pm 9.51) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2). 统计性分析显示, 秋季和春季、夏季生物气溶胶中总微生物浓度具有明显的季节变化差异 ($P < 0.05$), 春季、夏季和冬季之间没有明显的季节变化差异 ($P > 0.05$). Dong 等^[12] 同样发现青岛生物气溶胶中总微生物浓度冬季较高, 夏季最低, 但 Li 等^[11] 发现青岛 2009 年 7 月 ~ 2010 年 6 月生物气溶胶中总微生物浓度秋季最高, 冬季最低. 这表明, 即便在同一研究区域, 生物气溶胶浓度的季节差异也有较大变化. 生物气溶胶浓度的季节差异是微生物来源、种类、气象条件和大气中污染物浓度等环境因素的季节差异造成的.

首先, 大气中微生物浓度受到局地源的影响, 如土壤和植被等^[27, 39]. 有研究表明, 局地源(植被和土壤)影响大气生物气溶胶中微生物丰富度^[40, 41], 并影响大气中微生物浓度的季节性变化. 春季耕作, 使得土壤中的微生物更易进入空气中, 导致空气中微生物浓度增加. 采样点区域的主要植被类型是针叶林、落叶阔叶林和灌草丛^[42, 43], 其叶片指数随生长季的到来而呈现增长的趋势, 也会使植物释放的微生物增加. 同时, 春季万物复苏, 植物生长、开花等生命活动释放的微生物也较多, 如采样期间, 5 月 13 日周围大气漂浮的柳絮较多, 测

得的总微生物浓度也较高. 已有研究显示, 夏季大气中来自植被的假单胞菌科 (Pseudomonadaceae), 鞘脂杆菌科 (Sphingobacteriaceae) 和鞘脂单胞菌科 (Sphingomonadaceae) 的浓度会增加^[44], 表明夏季植被茂盛的叶片表面作为细菌来源环境的重要性. 秋季随着叶片衰老, 大气中源于植物叶片上的细菌浓度降低, 但作为土壤源细菌指标的芽孢杆菌目 (Bacillales) 浓度相对增加, 表明土壤作为大气中微生物来源的相对重要性的增加^[40]. 冬季, 落叶阔叶林叶子脱落, 大气中来源植被的微生物浓度很低. 从微生物的土壤和植被源分析, 春季、夏季大气中微生物源较多, 秋季和冬季较少.

其次, 气象条件的季节差异影响着生物气溶胶浓度的变化. 春季逐渐变暖, 温度在 $1.0 \sim 15.0^\circ\text{C}$ 的范围内, 平均温度为 $(12.2 \pm 5.8)^\circ\text{C}$, 温度逐渐适宜微生物的生存繁殖^[39]. 方治国等^[31] 发现最适宜微生物生长繁殖的温度范围为 $20.0 \sim 30.0^\circ\text{C}$. 但是, 夏季温度范围在 $19.0 \sim 31.0^\circ\text{C}$ 之间, 温度的平均值为 $(24.8 \pm 3.6)^\circ\text{C}$, 气温适宜微生物生长繁殖. 秋季平均温度为 $(14.4 \pm 8.2)^\circ\text{C}$, 与春季接近, 较为适宜微生物生长繁殖; 而冬季温度较低, 不利于空气中微生物存活. 除温度外, 风速对微生物浓度也有着复杂影响, 一方面有利于地表微生物悬浮进入空气中, 另一方面有利于微生物在空气中扩散. Xu 等^[45] 发现当风速超过 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 真菌浓度在西风的影响下逐渐增加. 本研究中冬季盛行西北风,

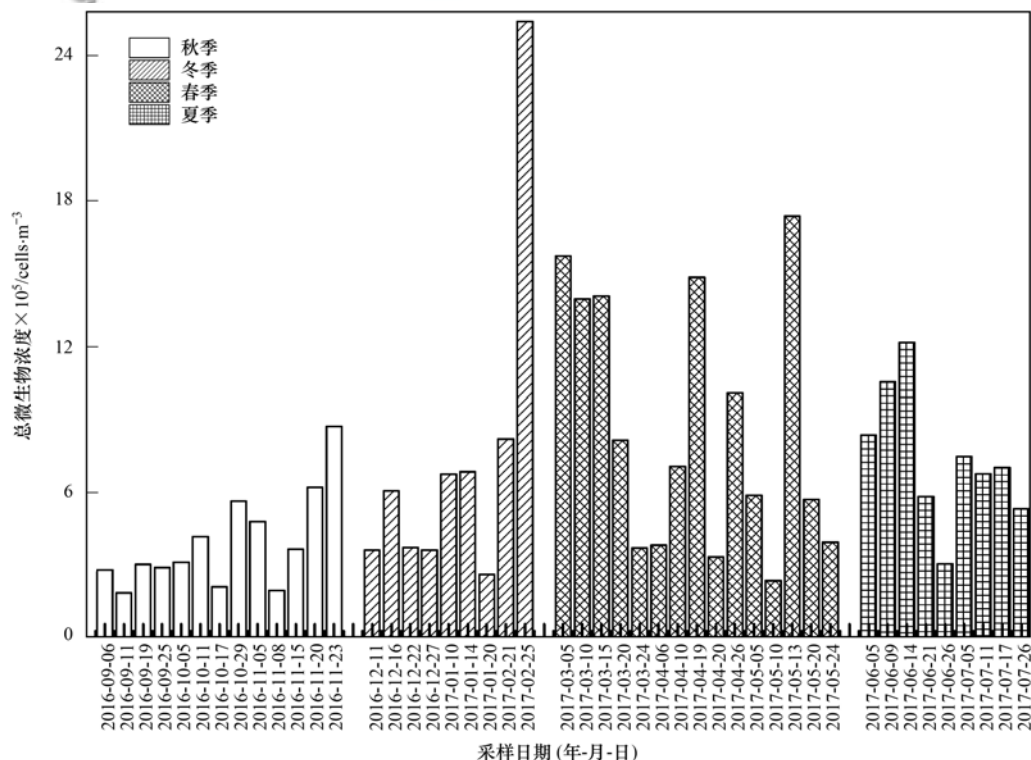


图 2 2016 年 9 月 ~ 2017 年 7 月青岛生物气溶胶中总微生物浓度变化

Fig. 2 Concentration variation of total microbes in bioaerosols samples in Qingdao from Sep. 2016 to Jul. 2017

平均风速为 $(4.7 \pm 2.9) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在 4 个季节中最高，这可能是本文观测到冬季大气生物气溶胶中总微生物浓度高于夏季和秋季的原因。Dong 等^[12]和 Xie 等^[13]的研究同样发现冬季微生物浓度较高，并认为这与大气颗粒物浓度较高有关。另外，湿润的环境适宜大气中微生物的生长繁殖^[30]，但相对湿度的季节变化不明显(表 1)，不是影响研究区域微生物浓度季节差异的主要因素。可见，微生物受到气温、风速和紫外辐射等不同气象因素的综合影响，变化复杂。

再次，大气中的颗粒物浓度也会影响微生物的浓度，因为微生物可以附着在大气环境中的颗粒物上^[35]。生物气溶胶中微生物浓度与 PM 浓度的相关性分析显示，总微生物浓度与 PM₁₀ 浓度呈显著正相关性($P < 0.01$)，Alghamdi 等^[46]也发现微生物浓度与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度呈正相关关系($P < 0.05$)。这可能是由于颗粒物能保护附着的微生物，抵抗紫外辐射等不利的大气环境因素，并为其生存繁殖提供碳源和氮源等能量源^[36]。如表 1 所示，冬季 PM₁₀ 浓度在 4 个季节中最高，平均为 $(95 \pm 56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，其次为春季和夏季。秋季颗粒物浓度最低，除 9 月 6 日的样品外其余样品采集日的 AQI 值均低于 100。从颗粒物浓度的影响来看，冬季微生物浓度受到颗粒物浓度的影响较高，秋季较低。为进一步理解颗粒物浓度对微生物浓度的影响，本研究计算了单位质量 PM₁₀ 颗粒上的微生物负荷。春季微生物负荷平均值为 $(12\,042 \pm 6\,567) \text{ cells} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ，为 4 个季节中最高，其次是夏季，说明这 2 个季节有较强的微生物源，而冬季微生物负荷均值较低，为 $(9\,237 \pm$

$4\,064) \text{ cells} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ，秋季低至 $(8\,501 \pm 5\,025) \text{ cells} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ，说明这 2 个季节微生物来源较弱，与前述的土壤植被源分析一致。

综上，大气生物气溶胶中的微生物浓度受到排放源、气象条件和颗粒物浓度的综合影响。春季微生物来源丰富、温度适宜微生物的生长繁殖，适宜的温度也会加速水体、污泥和土壤中的微生物的释放^[29]，而且颗粒物浓度较高，三方面的有利条件使得大气中微生物的浓度在四季最高。冬季虽然颗粒物浓度最高，但是温度较低，微生物源少，因此浓度低于春季。而夏季微生物源丰富、温度适宜，但由于紫外辐射等其他气象条件以及低颗粒物浓度的影响，微生物浓度低于春季。秋季低颗粒物浓度和微生物来源导致微生物浓度最低。这也解释了已有研究观测到微生物浓度的季节变化特征存在地域和年度差异性的原因，四季的气象条件本就存在地域差别，加上颗粒物浓度和微生物来源的差异性使得不同研究者得出不同的季节变化特征，而即便气象条件不存在较大年变化，但是微生物来源和颗粒物浓度随年份不同而有差异，这些因素的综合影响导致同一地域的微生物浓度季节变化也存在一定的差异。为了进一步探究三类因素对微生物浓度的影响，本研究比较了大气中微生物浓度与颗粒物浓度及气象条件的相关性，微生物浓度与空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度呈显著正相关关系($P < 0.05$)，而与温度、湿度和风速的相关性较弱，初步说明大气中颗粒物浓度对空气中微生物浓度的影响强于气象因素的影响。由于缺乏微生物源排放的数值，目前尚无法准确评估源对微生物浓度的影响，需要进一步研究。

表 1 2016 年 9 月~2017 年 7 月青岛大气生物气溶胶中总微生物浓度、微生物负荷及相关参数季节变化¹⁾

Table 1 Seasonal average of total microbe concentrations, microbial loading, and related parameters in atmospheric bioaerosols in Qingdao from Sep. 2016 to Jul. 2017

季节	TMC $\times 10^5$ /cells·m ⁻³	TML /cells·μg ⁻¹	T /°C	RH /%	WV /m·s ⁻¹	AQI	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	PM ₁₀ /μg·m ⁻³	CO /μg·m ⁻³	NO ₂ /μg·m ⁻³	SO ₂ /μg·m ⁻³	O ₃ /μg·m ⁻³
秋季	3.93	8 501	14.4	71	3.5	57	34	54	632	38	14	64
冬季	7.43	9 237	0.7	72	4.2	88	64	95	1 127	57	36	24
春季	8.68	12 042	12.2	67	3.1	63	38	71	743	39	12.	74
夏季	7.40	11 068	24.8	76	2.8	61	35	73	575	33	11	85

1) TMC:总微生物平均浓度; TML:单位质量 PM₁₀上微生物负荷

2.1.2 青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度的月变化

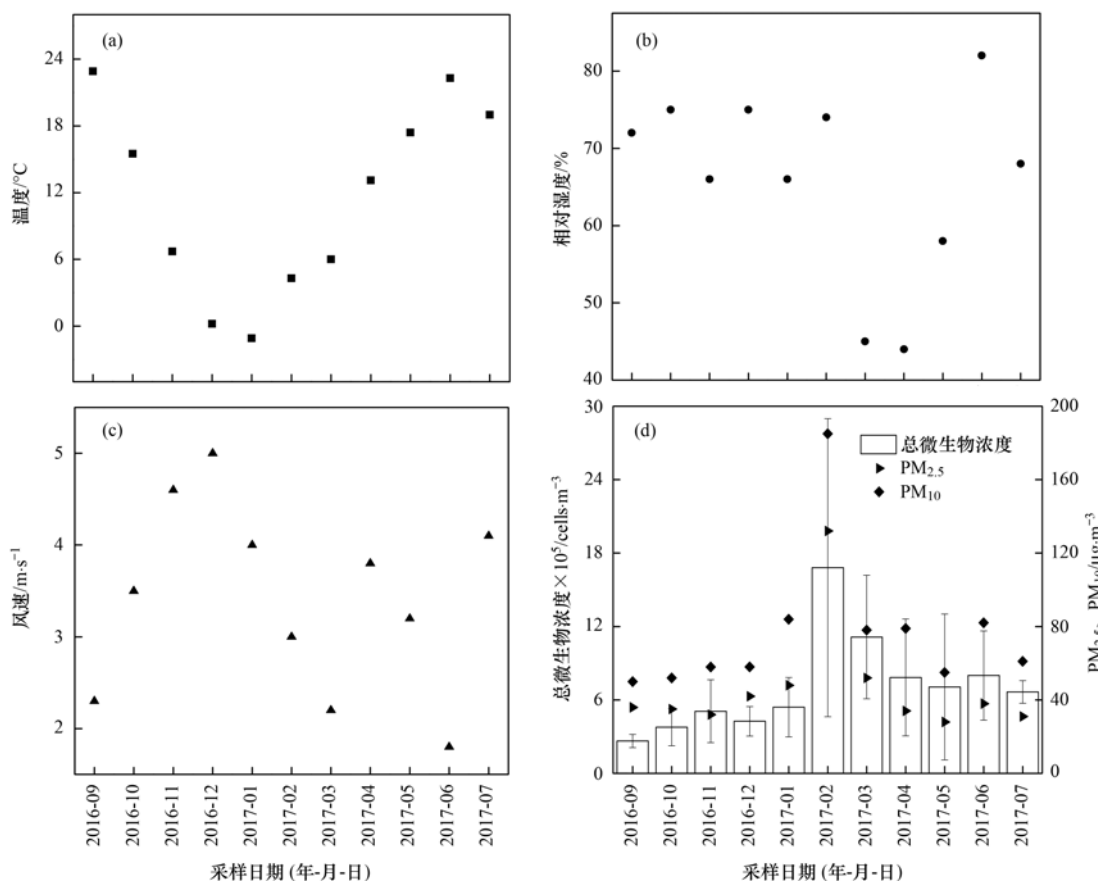
2016 年 9 月~2017 年 7 月，青岛生物气溶胶中总微生物浓度及对应的温度、相对湿度、风速等相关参数示于图 3。总微生物月平均浓度变化范围为 $2.65 \times 10^5 \sim 1.12 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ，最高值出现在 2017 年 2 月，最低值出现在 2016 年 9 月[图 3(d)]。2016 年 9~11 月，总微生物逐渐增加，到 12

月总微生物浓度略有下降，随后逐渐增加，到 2017 年 2 月达到最高值。3 月进入春季，总微生物浓度开始下降，4~7 月总微生物浓度相差不大，在 $6.65 \times 10^5 \sim 8.00 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内波动。

对比图 3(d)中总微生物浓度与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的变化，可以发现，总微生物浓度的月变化与颗粒物浓度的变化非常一致。相关性分析显示，总微生物浓度与 PM₁₀ 浓度呈显著正相关($P < 0.01$)，

颗粒物浓度的增加会导致总微生物浓度的增加^[25]. 2016年9月空气中颗粒物浓度最低, 仅 $(50 \pm 37) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 总微生物月平均浓度也最低, 随着颗粒物浓度的增加, 生物气溶胶中总微生物浓度月平均值逐渐增加, 到11月浓度达到较高值, 这与交通和燃煤供暖导致的颗粒物浓度增加^[24]有关. Dong等^[12]也发现开始供暖时, 大气中总微生物浓度明显增加, 增加到 $1.15 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. 2016年12月虽然 PM_{10} 浓度也较高, 但相对湿度较高[图3(b)], 达到75%, 而当相对湿度高于70%, 生物气溶胶中革兰氏阴性细菌的死亡率增加^[33], 以及温度接近 0°C [图3(a)]且风速[图3(c)]较大等环境条件均不

适合微生物的生存, 因此总微生物浓度有所降低. 而2017年1月开始, 温度增加、风速降低, 颗粒物浓度增加, 相应总微生物浓度逐渐上升, 并在2月达到最高值. 进入春季, 微生物来源增多, 温度逐月增加, 越来越适宜微生物的生长繁殖, 但大气中颗粒物浓度逐渐减少, 大气中微生物的载体减少, 暴露空气中的微生物直接接触大气中不利于存活的环境因素, 从而浓度出现逐月下降, 3月>4月>5月. 6~7月温度增高、紫外辐射加强, 一方面温度在 $19.0 \sim 31.0^\circ\text{C}$ 范围, 适宜于微生物生长, 另一方面紫外辐射加强会不利于微生物生存, 因此出现总微生物浓度的小幅波动.



(a) 温度的月变化, (b) 相对湿度的月变化, (c) 风速的月变化, (d) 总微生物浓度及 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的月变化

图3 2016年9月~2017年7月青岛生物气溶胶中总微生物浓度及相关参数的月变化

Fig. 3 Monthly average concentrations of total microbes and related parameters in bioaerosol samples in Qingdao from Sep. 2016 to Jul. 2017

2.1.3 青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度的日变化

图4为2015~2017年秋冬季节1d内4个时间段总微生物浓度变化, 每日的浓度变化存在一定差异. 如表2所示, 2015~2017年秋冬季节1d内4个时间段总微生物平均浓度随时间的变化均呈现先下降后上升的趋势. 总的来看, 青岛总微生物浓度1d内最高值较多出现在早上(08:00~9:00)或下午(17:00~19:00), 中午(11:00~15:00)相对较

低. 虽然秋冬季微生物的土壤植被源的影响减弱, 但微生物还受到日光辐射、大气稳定度等气象条件和颗粒物浓度的影响. 总微生物浓度与风速呈显著负相关($P < 0.01$), 研究期间大部分样品采样时早上风速较小, 在 $1.7 \sim 5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 湍流较弱, 不利于微生物的稀释扩散. 另外08:00为上班高峰期, 机动车辆较多, 汽车排放的颗粒使得大气中颗粒物浓度增加^[24], 从而微生物浓度较高. 中午光照相对较强, 混合层厚度大大增加, 风速增大到1.9

~7.0 m·s⁻¹，大气对微生物的稀释扩散和水平运输加强^[47]；同时日光辐射较早上增加会使得生物气溶胶中微生物的浓度降低^[48]。下午风速下降到1.1~5.9 m·s⁻¹之间，紫外辐射及风速减弱后总微生物浓度又有所回升。但这些样品的微生物浓度无显著日变化($P>0.05$)，由于本文样本有限，总微生物浓度的日变化还有待进一步研究。

2.2 青岛近海生物气溶胶中总微生物粒径分布变化

2016 年 9 月~2017 年 7 月期间，青岛沿海地区生物气溶胶中微生物浓度的粒径分布特征如图 5 (a)所示。除个别样品外，总微生物浓度呈现随着粒径增加而增加的偏态分布，即微生物浓度在>7.0 μm 粒径上最高，平均占总微生物浓度的 24.0%，在 0.65~1.1 μm 粒径上最低，平均占总微生物浓度的 10.4%。

2.2.1 青岛近海生物气溶胶中总微生物粒径分布的季节变化

为了研究粒径分布的季节变化，将 2016 年 9 月~2017 年 7 月期间采集的样品按季节计算了平均粒径分布比例[图 5(b)]。青岛沿海地区生物气溶胶中总微生物浓度粒径分布的季节差异不大，基本呈现在粗粒子所占比例较大的偏态分布，只是不同季节各粒径上的总微生物浓度占比有所差异。春季，0.65~1.1 μm 粒径上的浓度比例为 11.9%，1.1~4.7 μm 范围内各粒径段的比例相差不大，在 15.9%~18.5% 之间，>7.0 μm 粒子上占比最高，

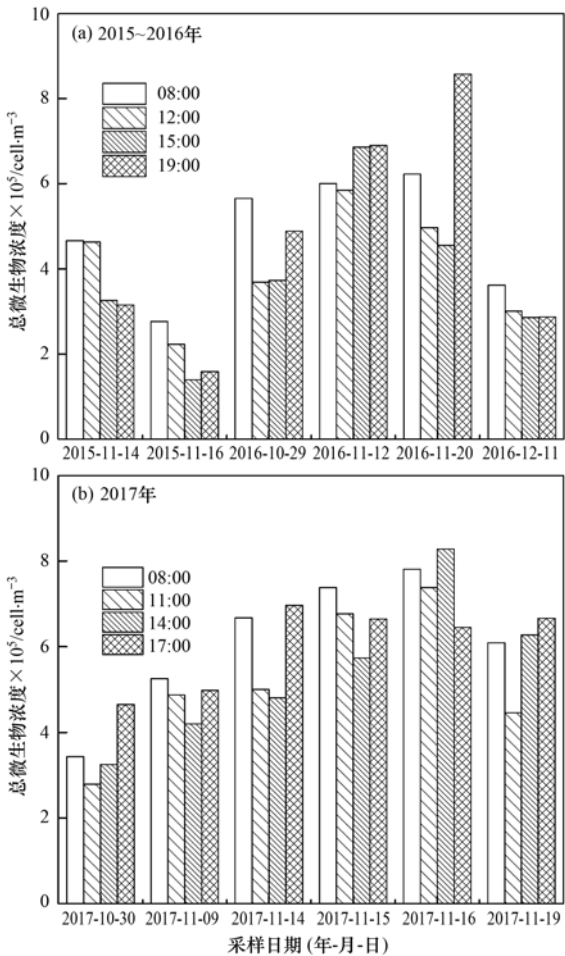


图4 2015~2017 年青岛秋冬季生物气溶胶中总微生物浓度的日变化
Fig. 4 Diurnal variation of total microbe concentrations in bioaerosols samples in fall and winter from 2015 to 2017

表2 2015 年~2017 年不同时段总微生物平均浓度 ×10⁵/cells·m⁻³

Table 2 Average concentrations of total microbes during different sampling periods in 2015, 2016 and 2017 ×10 ⁵ /cells·m ⁻³				
项目	08:00	12:00	15:00	19:00
TMC (2015 年)	3.71 ±1.34	3.43 ±1.70	2.33 ±1.32	2.37 ±1.11
TMC (2016 年)	5.38 ±1.19	4.38 ±1.27	4.50 ±1.72	5.81 ±2.47
项目	08:00	11:00	14:00	17:00
TMC (2017 年)	6.11 ±1.60	5.36 ±1.66	5.26 ±1.77	5.94 ±0.98

为 20.5%。夏季，细颗粒物上总微生物占比下降，0.65~1.1 μm 粒径段上的浓度比例降至 9.9%，粗颗粒上总微生物占比增加，4.7~7.0 μm 和>7.0 μm 粒子上所占比例较高，分别为 23.3% 和 23.8%。秋季，细粒径段上总微生物占比与夏季接近，2.1~4.7 μm 粒径段的比例有所增加，在 15.6%~18.5%，>7.0 μm 粒子上占比仍然最高，为 27.3%。冬季，总微生物浓度最高比例 24.9% 也分布在>7.0 μm 粒径，最低比例 9.9% 在 1.1~2.1 μm 粒径段。总的来看，青岛 4 个季节大气生物气溶胶中总微生物浓度在>7.0 μm 粒子上占比最高。总微生物浓度主要分布在粗粒子上，春、夏、秋和

冬季分别为 72.0%、75.7%、78.6% 和 80.0%，秋冬季略高于春夏季。这是因为粗颗粒物能为微生物提供庇护，并为微生物生命活动提供碳源、氮源等能量源^[36]，这也与青岛沿海地区秋冬季 PM₁₀ 浓度较高的结果一致。

2.2.2 青岛近海生物气溶胶中总微生物粒径分布的月变化

图 6 为 2016 年 9 月~2017 年 7 月期间，青岛沿海地区生物气溶胶中微生物浓度粒径分布的月变化。虽然总微生物主要分布在粗粒子上，但不同月份微生物浓度粒径分布存在一定差异。研究期间，总微生物月粒径分布可分为两类：一类样品的月均

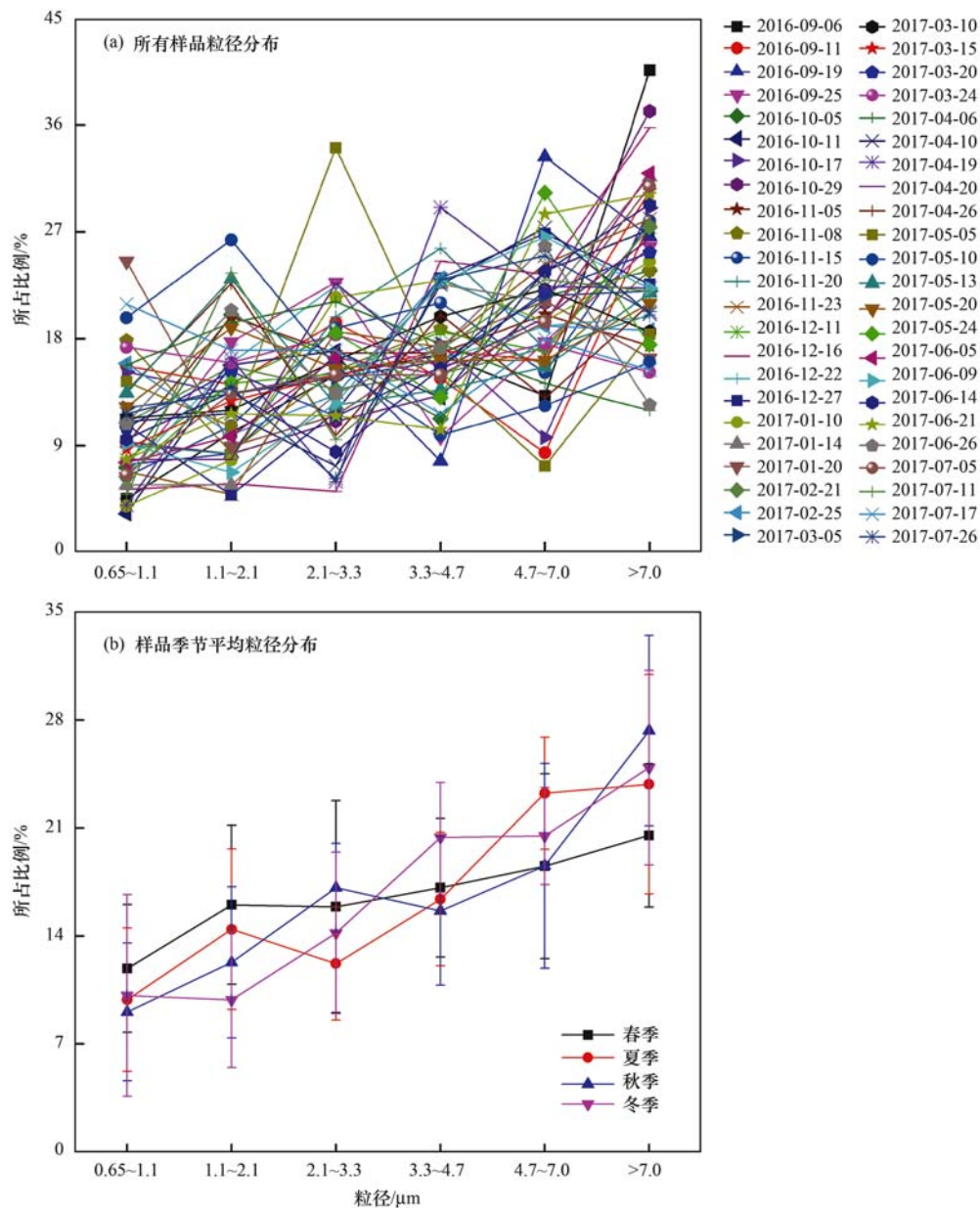


图5 2016年9月~2017年7月青岛生物气溶胶中总微生物的粒径分布

Fig. 5 Size distributions of total microbes in bioaerosol samples in Qingdao from Sep. 2016 to Jul. 2017

粒径分布呈现偏态分布[图6(a)],如2016年10~12月、2017年1~3和6月,最高浓度分布在 $>7.0\ \mu\text{m}$ 粒径,比例在22.3%~29.3%;另一类样品的总微生物粒径呈双峰分布[图6(b)],如2016年9月、2017年4、5和7月,但每月粒径分布的峰值存在差异.9和5月的峰值分别在 $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 和 $>7.0\ \mu\text{m}$,4月的峰值分别在 $1.1\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 和 $3.3\sim 4.7\ \mu\text{m}$,7月峰值分别在 $1.1\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 和 $>7.0\ \mu\text{m}$,且峰值范围在15.6%~30.2%.相关性分析发现, $2.1\sim 3.3$ 、 $3.3\sim 4.7$ 和 $>7.0\ \mu\text{m}$ 粒径上总微生物浓度与PM的浓度呈显著正相关关系($P<0.01$ 或 $P<0.05$).这表明附着在不同粒径段上的总微生物浓度会由于空气中颗粒物粒径分布的不同而有所不同.

2.2.3 青岛近海生物气溶胶中总微生物粒径分布的日变化

2015~2017年生物气溶胶中总微生物浓度在不同时段内的粒径分布如图7所示.总微生物粒径分布的日变化随年份和时段不同而有较大变化.2015年08:00和15:00的样品呈现峰值在 $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 和 $4.7\sim 7.0\ \mu\text{m}$ 的双峰分布[图7(a)],12:00和19:00的样品呈现峰值分别在 $4.7\sim 7.0\ \mu\text{m}$ 和 $3.3\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 的单峰分布.2016年08:00和15:00的样品呈现峰值在 $3.3\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 和 $>7.0\ \mu\text{m}$ 的双峰分布[图7(b)],而12:00和19:00的样品也呈双峰分布,但峰值分布与其不同,分别在 $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 和 $>7.0\ \mu\text{m}$.2017年11:00的样品呈峰值在 $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 和 $4.7\sim 7.0\ \mu\text{m}$ 的双峰分布[图

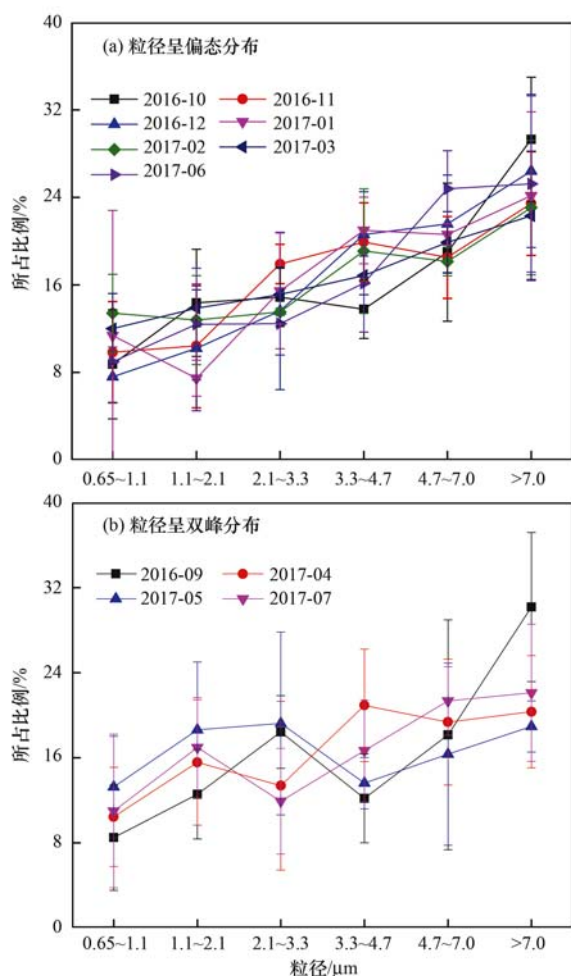


图6 2016年9月~2017年7月青岛生物气溶胶中总微生物月均粒径分布

Fig. 6 Monthly averaged size distributions of total microbes in bioaerosols samples in Qingdao from Sep. 2016 to Jul. 2017

7(c)], 其余时段均呈现高值在 $>7.0 \mu\text{m}$ 的偏态分布. 这可能是由于不同时段微生物的源排放、大气中颗粒物浓度以及气象因素的变化导致不同粒径上微生物浓度变化. 统计分析显示, 每级粒径上总微生物浓度没有明显的日变化差异 ($P > 0.05$). 总的来看, 在4个时间段总微生物主要分布在粗粒径上. 但粗粒径上总微生物所占比在不同时间段不同, 2015~2017年中午(11:00~15:00)总微生物在粗粒径上所占比例最低, 为56.1%~74.8%. 相关性分析显示, 细粒径上总微生物浓度与温度呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而粗细粒径上总微生物浓度与相对湿度和风速均呈显著负相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$). 研究期间, 中午温度较高 ($3.4 \sim 18.2^\circ\text{C}$), 湿度较低 (23%~82%), 风速较大 ($1.9 \sim 7.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 因此出现中午粗粒径上总微生物占比最低的现象.

2.3 气象和环境空气质量因子对总微生物浓度与粒径的影响

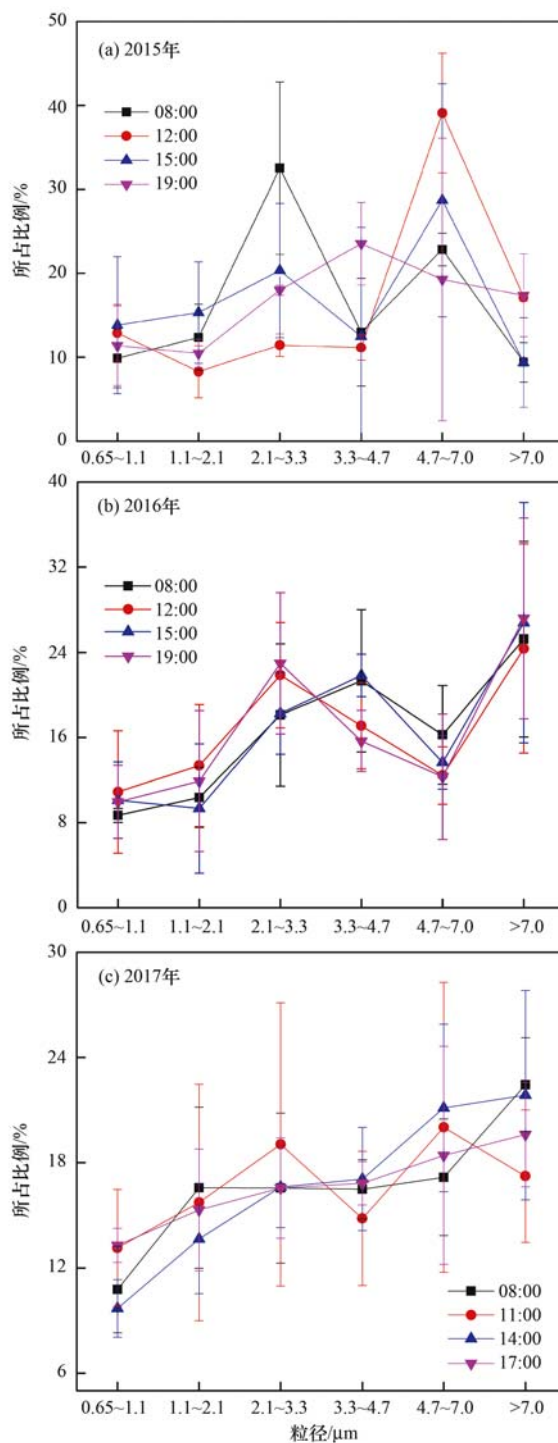


图7 2015~2017年青岛秋冬季生物气溶胶中总微生物粒径分布日变化

Fig. 7 Diurnal size distributions of total microbes in bioaerosols samples in fall and winter from 2015 to 2017

2.3.1 Spearman's 相关性分析

为了解气象和环境因子对总微生物浓度和粒径的影响, 分析2016年9月~2017年7月青岛不同粒径生物气溶胶中总微生物浓度与气象因素、颗粒物质量浓度 (PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)、气体污染物质量浓度 (SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO) 的 Spearman's 相关性 (表3).

结果显示, 研究期间温度、风速和风向与总微

生物浓度无显著相关($P > 0.05$) (见表 3), 这与 Dong 等^[12]的研究相一致. 这可能是由于采样期间的温度和风速变化幅度较小, 采样期间风速平均值为 $(3.4 \pm 2.2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有 37 d 风速 $\leq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这说明研究期间气温和风速风向不是影响微生物浓度变化的主要因素, 但气温和风速对 2015 ~ 2017 年秋冬季粗细粒径上总微生物浓度有一定影响.

相对湿度与不同粒径的总微生物浓度呈负相关, 尤其是对 $1.1 \sim 2.1 \text{ }\mu\text{m}$ 粒径段总微生物浓度影响更显著($P < 0.05$), 这与之前的研究^[49, 50]相一致. 有研究发现枝孢菌属在青岛生物气溶胶中占绝对优势, 主要集中在 $0.65 \sim 4.7 \text{ }\mu\text{m}$ 粒径上^[49], 而且枝孢菌属与相对湿度呈负相关^[51]. 研究期间, 2017 年 3 ~ 5 月相对湿度范围在 41% ~ 100%, 有 9 d 样品的相对湿度低于 70%, 相应观测到 $1.1 \sim 2.1 \text{ }\mu\text{m}$ 粒径上总微生物浓度均较高, 在 $2.63 \times 10^4 \sim 4.01 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间.

如前所述, 大气中的微生物可以附着在大气环境中的颗粒物上, 生物气溶胶中微生物浓度会因颗粒物排放的增加而增加^[35]. 相关性分析显示, 总微生物浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度呈显著正相关($P < 0.05$), 与 Jeon 等^[35]的研究相一致. 2 月 25 日 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度明显增加, 分别为 $133 \text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $199 \text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 总微生物浓度增加到 2.54×10^6

$\text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 并且粗颗粒物($> 2.1 \text{ }\mu\text{m}$)上的浓度明显高于细颗粒物($< 2.1 \text{ }\mu\text{m}$).

CO 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 是大气中重要的气体污染物, 相关性分析显示总微生物浓度与 SO_2 、 NO_2 和 O_3 不相关, 只有 $0.65 \sim 1.1 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.1 \sim 3.3 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.3 \sim 4.7 \text{ }\mu\text{m}$ 粒径段中总微生物浓度与 CO 质量浓度呈显著正相关($P < 0.05$). 在青岛^[12]和西安^[13]同样发现总微生物浓度与 CO 呈正相关, 可能是 CO 可以被某些微生物转变并利用.

紫外光按照波长范围可分为 UV-A ($315 \sim 400 \text{ nm}$)、UV-B ($280 \sim 315 \text{ nm}$) 和 UV-C ($100 \sim 280 \text{ nm}$). UV-A 和 UV-B 能够透过臭氧保护层和云层到达地球, 而 UV-C 被臭氧层吸收, 只有微量到达地球表面. 闫岩等^[52]发现 UV-C 可以在数秒内通过破坏微生物的脱氧核糖核酸结构杀死细菌和病毒; 而 UV-A 和 UV-B 杀灭微生物的速度较慢. 分析结果显示, 除了 $1.1 \sim 2.1 \text{ }\mu\text{m}$ 粒径段上的总微生物浓度与 UV-420 ($380 \sim 460 \text{ nm}$) 呈显著正相关($P < 0.05$), 总微生物浓度与紫外辐射强度没有显著的相关性. 这可能与大气中存在具有色素的细菌有关, 空气中大约有 65% 具有色素的细菌, 主要包括葡萄球菌属 (*Staphylococcus*)、李斯特菌属 (*Listeria*) 和微球菌属 (*Micrococcus*)^[53], 这些色素能保护细菌减少紫外辐射的影响^[54, 55].

表 3 青岛生物气溶胶中总微生物浓度及每级粒子上的浓度与环境因素之间的 Spearman's 相关系数¹⁾

Table 3 Spearman's correlation coefficient between the concentrations of total microbes, concentrations at each particle size and environmental factors								
粒径/ μm	T	RH	WV	风向	AQI	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	CO
0.65 ~ 1.1	-0.101	-0.266	-0.080	0.045	0.363 *	0.356 *	0.383 **	0.295 *
1.1 ~ 2.1	0.092	-0.296 *	-0.197	0.018	0.171	0.210	0.190	0.188
2.1 ~ 3.3	-0.166	-0.138	-0.112	0.120	0.386 **	0.392 **	0.407 **	0.305 *
3.3 ~ 4.7	-0.232	-0.135	-0.073	0.176	0.357 *	0.349 *	0.389 **	0.370 *
4.7 ~ 7.0	-0.143	-0.167	-0.147	0.100	0.285	0.264	0.335 *	0.280
> 7.0	-0.133	-0.101	-0.216	0.026	0.349 *	0.368 *	0.359 *	0.275
总微生物浓度	-0.135	-0.193	-0.155	0.092	0.352 *	0.357 *	0.381 **	0.319 *
粒径/ μm	NO_2	SO_2	O_3	UV-254	UV-297	UV-365	UV-420	
0.65 ~ 1.1	0.095	-0.023	-0.074	0.090	-0.033	-0.044	0.176	
1.1 ~ 2.1	-0.041	-0.054	0.208	0.156	0.104	0.213	0.429 **	
2.1 ~ 3.3	0.145	0.096	-0.110	-0.019	-0.135	-0.160	0.043	
3.3 ~ 4.7	0.197	0.081	-0.152	-0.061	-0.195	-0.229	-0.053	
4.7 ~ 7.0	0.170	0.066	-0.117	0.051	-0.090	-0.101	0.078	
> 7.0	0.163	0.119	-0.028	-0.083	-0.177	-0.104	0.058	
总微生物浓度	0.144	0.060	-0.057	0.014	-0.108	-0.088	0.119	

1) 风向和 UV; $n = 44$; 其他: $n = 46$; * 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)

2.3.2 多元线性回归分析

根据生物气溶胶中总微生物浓度与气象和环境因素之间的相关性分析结果, 本文通过逐步多元线性回归进一步鉴定和量化影响大气中总微生物浓度的主要因素. 模拟出的多元线性回归模型方程见式 (2):

$$\text{TMC} = 754\,380.015 - 5\,753.036\text{RH} + 7\,323.291\text{PM}_{2.5}$$

$$R^2 = 0.206; N = 46; F = 5.581; P < 0.01 \tag{2}$$

式中, R^2 是确定系数, N 是样品数, P 是显著概率水平.

多元线性回归分析结果表明, 相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 是影响生物气溶胶中总微生物浓度的主要因素. 生物气溶胶中总微生物浓度与相对湿度呈显著负相关 ($P < 0.01$), 与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈显著正相关 ($P < 0.01$). Gao 等^[21] 的研究运用多元线性回归模型也发现北京冬季生物气溶胶中真菌浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈显著正相关. 由公式(2)看出, 相对湿度每下降 1%, 总微生物浓度下降 $2273 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度每增加 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 总微生物浓度增加 $7323 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. 生物气溶胶中总微生物浓度中 20.6% 的变化与相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关.

3 结论

(1) 青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度的季节变化趋势为春季和冬季较高, 夏季次之, 秋季最低. 统计性分析结果表明春季、夏季和秋季空气中总微生物浓度具有明显的季节变化差异. 这主要是与生物气溶胶中微生物来源、气象条件和空气中颗粒物浓度等环境因素的季节差异有关.

(2) 在研究期间, 生物气溶胶中总微生物浓度不存在日变化差异, 但本研究样本有限, 有待进一步研究.

(3) 生物气溶胶中总微生物粒径分布主要呈现双峰分布和偏态分布两类, 随月份不同而有所变化, 总微生物主要分布在粗粒径上.

(4) 相关性分析结果表明, 青岛近海生物气溶胶中总微生物浓度与温度、风速和风向等气象因素以及 NO_2 、 SO_2 和 O_3 等因子无显著相关, 与 AQI 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 等因子呈显著正相关. 多元线性回归分析结果进一步表明相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 是影响生物气溶胶中总微生物浓度的主要因素.

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] Urbano R, Palenik B, Gaston C J, *et al.* Detection and phylogenetic analysis of coastal bioaerosols using culture dependent and independent techniques [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(2): 301-309.
- [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] White C C, Kenny C M, Jennings S G. A study of marine and continental bioaerosol in the west of Ireland [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1999, **30**(1): S809-S810.
- [5] Ho J, Duncan S. Estimating aerosol hazards from an anthrax letter [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, **36**(5-6): 701-719.
- [6] Möhler O, DeMott P J, Vali G, *et al.* Microbiology and atmospheric processes: the role of biological particles in cloud physics [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2007, **4**(4): 2559-2591.
- [7] Bauer H, Giehl H, Hittenberger R, *et al.* Airborne bacteria as cloud condensation nuclei [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D21): 4658.
- [8] Pratt K A, DeMott P J, French J R, *et al.* *In situ* detection of biological particles in cloud ice-crystals [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(6): 398-401.
- [9] Hara K, Zhang D Z. Bacterial abundance and viability in long-range transported dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 20-25.
- [10] Murata K, Zhang D Z. Transport of bacterial cells toward the Pacific in Northern Hemisphere westerly winds [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **87**: 138-145.
- [11] Li M F, Qi J H, Zhang H D, *et al.* Concentration and size distribution of bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3812-3819.
- [12] 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.
- [13] Xie Z S, Li Y P, Lu R, *et al.* Characteristics of total airborne microbes at various air quality levels [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **116**: 57-65.
- [14] Bowers R M, McCubbin I B, Hallar A G, *et al.* Seasonal variability in airborne bacterial communities at a high-elevation site [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 41-49.
- [15] Wang Y F, Wang C H, Hsu K L. Size and seasonal distributions of airborne bioaerosols in commuting trains [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(35): 4331-4338.
- [16] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China [J]. *Microbial Ecology*, 2007, **54**(3): 487-496.
- [17] Zhen Q, Deng Y, Wang Y Q, *et al.* Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 703-712.
- [18] Genitsaris S, Stefanidou N, Katsiapi M, *et al.* Variability of airborne bacteria in an urban Mediterranean area (Thessaloniki, Greece) [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **157**: 101-110.
- [19] Li Y P, Fu H L, Wang W, *et al.* Characteristics of bacterial and fungal aerosols during the autumn haze days in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 439-447.
- [20] Chen X Y, Ran P X, Ho K, *et al.* Concentrations and size distributions of airborne microorganisms in Guangzhou during summer [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, **12**(6): 1336-1344.
- [21] Gao M, Qiu T L, Jia R Z, *et al.* Concentration and size distribution of viable bioaerosols during non-haze and haze days in Beijing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(6): 4359-4368.
- [22] Zuraimi M S, Fang L, Tan T K, *et al.* Airborne fungi in low and high allergic prevalence child care centers [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(15): 2391-2400.
- [23] Wang W F, Ma Y T, Ma X, *et al.* Seasonal variations of airborne bacteria in the Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, **64**(4): 309-315.
- [24] Raisi L, Aleksandropoulou V, Lazaridis M, *et al.* Size distribution of viable, cultivable, airborne microbes and their relationship to particulate matter concentrations and

- meteorological conditions in a Mediterranean site [J]. *Aerobiologia*, 2013, **29**(2): 233-248.
- [25] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [26] 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.
- [27] Lighthart B, Shaffer B T. Bacterial flux from chaparral into the atmosphere in mid-summer at a high desert location [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(7): 1267-1274.
- [28] Burrows S M, Elbert W, Lawrence M G, *et al.* Bacteria in the global atmosphere-Part 1: review and synthesis of literature data for different ecosystems[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(23): 9263-9280.
- [29] 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.
- [30] Heo K J, Kim H B, Lee B U. Concentration of environmental fungal and bacterial bioaerosols during the monsoon season [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, **77**: 31-37.
- [31] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 城市生态系统空气微生物群落研究进展 [J]. *生态学报*, 2004, **24**(2): 315-322.
- Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Progresses of airborne microbial communities in urban ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2): 315-322.
- [32] Leach C M, Hildebrand P D, Sutton J C. Sporangium discharge by *Peronospora destructor*: influence of humidity, red-infrared radiation, and vibration [J]. *Phytopathology*, 1982, **72**(8): 1052-1056.
- [33] Webb S J. Factors affecting the viability of air-borne bacteria: I. Bacteria aerosolized from distilled water [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1959, **5**(6): 649-669.
- [34] Won W D, Ross H. Effect of diluent and relative humidity on apparent viability of airborne *Pasteurella pestis* [J]. *American Society for Microbiology*, 1966, **14**(5): 742-745.
- [35] Jeon E M, Kim H J, Jung K, *et al.* Impact of Asian dust events on airborne bacterial community assessed by molecular analyses [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(25): 4313-4321.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Mouli P C, Mohan S V, Reddy S J. Assessment of microbial (bacteria) concentrations of ambient air at semi-arid urban region: influence of meteorological factors [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2005, **3**(2): 139-149.
- [39] Smets W, Moretti S, Denys S, *et al.* Airborne bacteria in the atmosphere: presence, purpose, and potential [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **139**: 214-221.
- [40] Bowers R M, McLetchie S, Knight R, *et al.* Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(4): 601-612.
- [41] Gandolfi I, Bertolini V, Bestetti G, *et al.* Spatio-temporal variability of airborne bacterial communities and their correlation with particulate matter chemical composition across two urban areas [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(11): 4867-4877.
- [42] 李宝华. 青岛崂山植被调查报告 [J]. *防护林科技*, 2004, (S1): 138-140.
- [43] 孔祥安, 李广海, 郑锋先, 等. 青岛崂山主要植被类型及物种丰富度研究 [J]. *中国农学通报*, 2009, **25**(10): 241-245.
- Kong X A, Li G H, Zheng F X, *et al.* Study on the main vegetation types and species abundance of Laoshan mountain in Qingdao [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(10): 241-245.
- [44] Yashiro E, Spear R N, McManus P S. Culture-dependent and culture-independent assessment of bacteria in the apple phyllosphere [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, **110**(5): 1284-1296.
- [45] Xu C H, Wei M, Chen J M, *et al.* Fungi diversity in PM_{2.5} and PM₁ at the summit of Mt. Tai: abundance, size distribution, and seasonal variation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(18): 11247-11260.
- [46] Alghamdi M A, Shamy M, Redal M A, *et al.* Microorganisms associated particulate matter: a preliminary study [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **479-480**: 109-116.
- [47] 赵德山, 洪钟祥. 北京地区气溶胶及其化学元素浓度和气象条件的关系 [J]. *大气科学*, 1983, **7**(2): 153-161.
- [48] Chi M C, Li C S. Fluorochrome in monitoring atmospheric bioaerosols and correlations with meteorological factors and air pollutants [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2007, **41**(7): 672-678.
- [49] 韩晨, 谢绵测, 祁建华, 等. 青岛市不同空气质量下可培养生物气溶胶分布特征及影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(9): 1264-1271.
- Han C, Xie M C, Qi J H, *et al.* Size distribution characteristics of culturable bioaerosols in relation to air quality levels in Qingdao [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1264-1271.
- [50] Tong Y Y, Lighthart B. The annual bacterial particle concentration and size distribution in the ambient atmosphere in a rural area of the Willamette Valley, Oregon [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, **32**(5): 393-403.
- [51] Ballero M, de Giannis N, Lombardini S, *et al.* Comparative study about airborne spores in Cagliari and Perugia [J]. *Aerobiologia*, 1992, **8**(1): 141-147.
- [52] 闫岩, 酆和生, 任志峰. 紫外杀菌技术的研究现状 [J]. *石化技术*, 2011, **18**(4): 60-63.
- Yan Y, Li H S, Ren Z F. Progress of research in UV sterilization technology [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2011, **18**(4): 60-63.
- [53] Tong Y Y, Che F X, Xu X Z, *et al.* Population study of atmospheric bacteria at the Fengtai district of Beijing on two representative days [J]. *Aerobiologia*, 1993, **9**(1): 69-74.
- [54] Tong Y Y, Lighthart B. Solar radiation is shown to select for pigmented bacteria in the ambient outdoor atmosphere [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, **65**(1): 103-106.
- [55] Tuveson R W, Larson R A, Kagan J. Role of cloned carotenoid genes expressed in *Escherichia coli* in protecting against inactivation by near-UV light and specific phototoxic molecules [J]. *Journal of Bacteriology*, 1988, **170**(10): 4675-4680.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)