

目次

“大气十条”实施期间南京市PM_{2.5}化学组成与来源的演变特征 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM_{2.5}组分差异 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM_{2.5}-O₃复合污染数值响应解析 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄蔚铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 于滨杭, 姬建梅, 王丽宇, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征

魏文淑^{1,2}, 祁建华^{1,2*}, 常成^{1,2}

(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试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266237)

摘要: 细菌是大气生物气溶胶中最丰富、分布最广的微生物。利用 FA-1 撞击式生物采样器连续采集了 2020 年 9 月至 2021 年 8 月青岛近海大气生物气溶胶分级样品, 并利用 BacLight™ 试剂染色-荧光显微镜计数方法测定了死/活细菌浓度, 分析其浓度与粒径的季节分布特征, 并研究了雾、霾和沙尘等特殊天气对细菌浓度及粒径分布的影响。结果表明, 采样期间青岛近海生物气溶胶中细菌浓度为 $(1.06 \pm 0.68) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中活细菌和死细菌浓度分别为 $(8.20 \pm 4.88) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(9.74 \pm 6.72) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。细菌浓度分布具有季节差异, 死细菌浓度春季、冬季最高, 夏季最低; 活细菌浓度则表现为春季最高, 夏季和秋季较低, 冬季最低。生物气溶胶中细菌浓度随月份存在变化, 死细菌月均浓度最高值和最低值分别出现在 2021 年春季 3 月和夏季 6 月, 而活细菌月均浓度最高值则出现在 2021 年春季 5 月, 最低值在 2020 年冬季 12 月。研究发现活细菌浓度与温度呈显著正相关, 与 NO_2 、 SO_2 和 CO 呈显著负相关; 而死细菌与 PM 显著正相关。大气中细菌的粒径分布随季节和月份的变化, 呈现双峰分布、单峰分布以及近似偏态分布。沙尘天死活细菌浓度显著高于晴天、雾天和霾天, 但由于长距离传输, 细菌存活率很低, 仅为 6.85%。霾天由于人为污染严重, 细菌存活率最低, 为 4.10%。高湿度雾天细菌存活率最高为 16.26%。不同污染天下细菌粒径分布均呈双峰分布, 但峰值随天气类型而有所差异。

关键词: 生物气溶胶; 细菌; 季节分布; 雾天; 霾天; 沙尘天

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0127-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202071

Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao

WEI Wen-shu^{1,2}, QI Jian-hua^{1,2*}, CHANG Cheng^{1,2}

(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 266237, China)

Abstract: Bacteria are the most abundant microorganisms in atmospheric bioaerosols, widely distributed in the environment. Bioaerosol samples were collected using the FA-1 impact sampler from October 2013 to January 2021 in the coastal city of Qingdao, and samples stained with a BacLight™ bacterial viability kit were used to measure the concentrations of viable and non-viable bacteria with an epifluorescence microscope. The viable and non-viable bacteria in bioaerosols were characterized during different seasons, with particular attention paid to the distribution characteristics of bacteria on foggy, hazy, and dust days. The results showed that the mean concentrations of total bacteria were $(1.06 \pm 0.68) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ in Qingdao during the sampling period, and those of viable and non-viable bacteria were $(8.20 \pm 4.88) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(9.74 \pm 6.72) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The seasonal concentrations of non-viable bacteria were the highest in spring and winter and the lowest in summer, whereas that of viable bacteria was highest in spring, followed by those in summer and autumn, and the lowest in winter. Atmospheric bacterial concentrations fluctuated with by month, and total bacteria presented a similar variation pattern with that of non-viable bacteria. The monthly average concentration of non-viable bacteria showed the highest value in March during the spring and the lowest in June during the summer in 2021, whereas the highest value for viable bacteria occurred in May during the spring in 2021 and the lowest in December during the winter in 2020. Viable bacteria concentrations were significantly positively correlated with temperature and significantly negatively correlated with NO_2 , SO_2 , and CO . Non-viable bacteria were significantly positively correlated with PM . The bacteria in bioaerosol particles showed bimodal, unimodal, and skewed size distributions, varying with season and month. Under different weather conditions, the concentration of non-viable bacteria on dusty days was significantly higher than that on sunny, foggy, or hazy days, but the bacteria viability was as low as 6.85% due to long-distance transport. Anthropogenic pollution resulted in the lowest viability of bacteria at 4.10% on hazy days, whereas the highest viability in bacteria was 16.26% on foggy days due to high humidity. The size distribution of bacteria in bioaerosol particles under different pollution days showed a bimodal distribution, and the peak size depended on the weather type.

Key words: bioaerosols; bacteria; seasonal distribution; fog; haze; dust

生物气溶胶是指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^[1,2], 其组成复杂, 来源广泛, 可以在全球尺度上进行传输^[3]。细菌作为生物气溶胶的重要组成部分, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的生物组分中占比高达 80% 以上^[4], 会导致各种病原体 and 过敏原的扩散^[5,6], 对人类健康产生重要影响。

另外, 空气中细菌可能会对云化学产生重要影响^[7], 直接或间接影响全球气候变化^[8,9]。作为空气

收稿日期: 2022-02-12; 修订日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775148, U1906215); 中央高校基本科研业务费专项(202061035)

作者简介: 魏文淑(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气生物气溶胶, E-mail: 2958860207@qq.com

* 通信作者, E-mail: qjianhua@ouc.edu.cn

中最丰富和分布最广的微生物^[10],细菌对人类健康、区域气候^[11]和生物地球化学循环^[12]都具有重要的意义。

目前,生物气溶胶中活细菌浓度测定多采用活菌培养计数法^[13]、ATP生物发光法^[14]、定量PCR法^[15]和荧光显微镜法。其中,荧光显微镜法操作简单,结果可靠,有效地克服了部分微生物无法检出的短板,在饮用水^[15]、淤泥^[16]和大气中死/活细菌浓度^[17,18]测定上获得了广泛应用。大气中细菌的浓度普遍在 $10^4 \sim 10^8 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[19],活细菌浓度在 $10^2 \sim 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[20,21],并且存在明显的季节差异,比如美国北科罗拉多州高海拔地区空气中细菌最高浓度出现在春秋两季^[22];北京^[23]、敦煌^[24]和希腊塞萨洛尼基^[25]地区夏季生物气溶胶中细菌浓度最高;青岛地区空气中总细菌浓度发现在秋季浓度最高^[26]。同时,不同特殊天气条件下(雾、霾和沙尘),空气中细菌浓度分布特征存在一定差异。重污染天中总细菌浓度为 $(2.75 \pm 3.25) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,要高于非污染天^[20];雾天活细菌浓度为 $7.13 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,明显低于晴天的 $1.15 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[21];沙尘天空气中细菌总浓度是非沙尘天气时的40倍^[27],活细菌占细菌总数的比例在16%~40%之间,比非沙尘天细菌存活能力小得多^[28]。可见,空气中细菌浓度受到气象、源等许多生物和非生物因素的综合影响,因此,研究雾和沙尘等典型污染过程下大气气溶胶中细菌浓度特征,可为进一步评价大气生物气溶胶的环境和健康风险奠定科学基础。

生物气溶胶粒径的大小会影响微生物在人体呼吸道的沉积及引发的呼吸道疾病。大部分研究表明,空气中细菌主要分布在粗粒径($>2.1 \mu\text{m}$)上^[18,28],如青岛沿海^[26]和美国华盛顿^[29]地区大气中细菌浓度峰值分布在 $>7 \mu\text{m}$ 粒径上,北京室外空气中细菌呈偏态分布,主要分布在 $>2.1 \mu\text{m}$ 的粒径范围内^[30]。在不同特殊天气条件下,空气中细菌粒径分布特征同样存在一定差异。青岛地区雾、霾和沙尘天空气中活细菌均呈现出双峰分布,峰值分布在 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ ^[21];北京市霾天大气中粒径 $<2.1 \mu\text{m}$ 的细菌占比随着霾强度的增加而逐渐降低,粒径分布向粗模态迁移^[31],而西安市霾天气下空气细菌粒径的偏态分布规律和晴天相似,没有太大变化^[32]。显然,目前研究对大气中细菌的分布规律仍不明确,对雾天、沙尘天下存活微生物粒径分布的研究有助于探索生物气溶胶的健康效应。

目前对于空气中细菌的研究已经取得一定的进展,但是大部分研究集中于空气中总细菌及可培养

菌浓度,而对于空气中存活细菌的系统研究有限,不同污染天气对细菌存活率的影响研究更为匮乏。因此,本文于2020年9月至2021年8月在青岛近海地区连续采集生物气溶胶样品,分析了样品中死活细菌月季分布特征,重点讨论了雾天和沙尘天气对气溶胶中细菌存活率的影响。

1 材料与方法

1.1 采样地点及方法

如图1所示,样品采集地点位于中国海洋大学崂山校区监测点($36^\circ 10' \text{N}$, $120^\circ 30' \text{E}$),距海边约7.0 km,周围的植被覆盖面积约占50%。样品利用FA-1撞击式生物采样器(辽阳康洁仪器研究所) $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 流量下采集30 min,样品收集于直径80 mm、孔径 $0.2 \mu\text{m}$ 灭菌的聚碳酸酯滤膜上。常规样品分别于每月的5、10、15、20和25日08:00采集生物气溶胶样品,污染天气增加样品采集频率。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 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 。

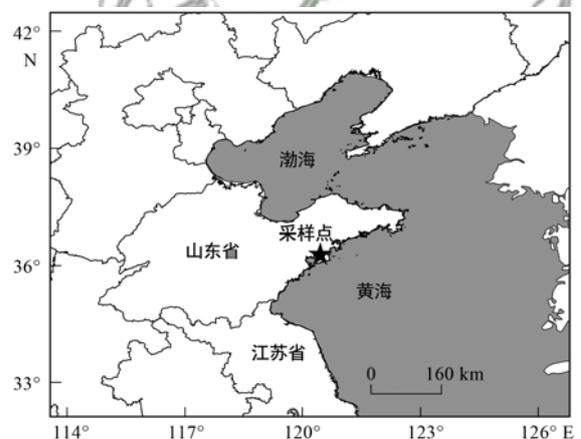


图1 生物气溶胶采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling site for bioaerosols

1.2 样品处理

将样品膜放入20 mL生理盐水中,以 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养30 min,制成菌悬液。将10 mL悬浮液用BacLight™细菌活力试剂盒(L-13152, Thermo Fisher Scientific, USA)在黑暗条件下染色15 min^[20]。试剂盒主要包括 $36 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SYTO-9和 $180 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碘化丙啶(PI)。染色后,利用 $0.2 \mu\text{m}$ 黑色聚碳酸酯膜过滤器(Whatman Inc., USA)过滤。使用放大400倍的荧光显微镜(Olympus BX51, 日本)测定染色样品。SYTO-9染色的活细菌在 $450 \sim 480 \text{ nm}$ 的激发波长下测定,呈绿色荧光,而PI染色的死细菌在 $510 \sim 550 \text{ nm}$ 的激发波长下测定,呈红色荧光^[33]。随机选取20个视野,记录视野中具有细

菌形态、直径小于 $1 \mu\text{m}$ 的菌个数并根据下列公式进行计算^[26]。

$$C_x = N_a \cdot S \cdot V_2 / (S_f \cdot V_1 \cdot V_3) \quad (1)$$

$$C_T = \sum_{x=1}^6 C_x \quad (2)$$

式中, C_T 表示 6 级粒径中死/活细菌浓度之和 ($\text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$); C_x 表示 x 粒径死/活细菌浓度 ($\text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$); N_a 表示各视野平均死/活细菌粒子数 (cells); S 表示核孔滤膜实际过滤面积 (mm^2); S_f 表示显微镜视野面积 (mm^2); V_1 表示过滤样品量 (L); V_2 表示氯化钠缓冲液体积 (L); V_3 表示采样器空气流量 (m^3)。

1.3 气象参数来源以及数据分析

气象参数 [温度 (T)、相对湿度 (RH)、风向 (WD)、风速 (WS)、能见度] 和环境指标 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3) 分别来自青岛市气象局 (<http://qdqx.qingdao.gov.cn/>) 和青岛市环境保护局 (<http://www.qepb.gov.cn/m2/>)。青岛受海洋气候影响, 根据秋季 (9~11 月)、冬季 (12 月至次年 2 月)、春季 (3~5 月) 以及夏季 (6~8 月) 进行数据分类分析细菌浓度的季节变化。另外, 根据 MICAPS 资料天气类型, 将样品分为晴天、霾天、雾天和沙尘天样品, 其中霾天、雾天和沙尘天具体分类标准

如表 1 所示。Spearman 相关性用于研究微生物与气象因素的相关性, 其中 $P > 0.05$ 表示无显著相关性, $P < 0.05$ 则具有统计学意义。利用后向轨迹模型 (HYSPLIT-4)^[34] 和全球数据同化系统 (GDAS) 气象数据 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>), 分析采样期间气团来源, 每条轨迹模拟后推 72 h, 高度为 1 000 m。

表 1 不同天气类型分类标准¹⁾

Table 1 Classification criteria for different weather types			
天气类型	相对湿度/%	能见度/km	$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
霾天	<80	<10	>75
雾天	>85	<10	—
雾-霾天	80~95	<10	>75
沙尘天	—	<10	—

1) “—”表示文章中没有相关数据

2 结果与讨论

2.1 青岛近海生物气溶胶中细菌浓度月季分布特征

2020 年 9 月至 2021 年 8 月期间, 共采集生物气溶胶样品 77 套 (图 2), 细菌浓度范围在 $3.19 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3} \sim 3.34 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $(1.06 \pm 0.68) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中, 活细菌浓度范围在 $3.16 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3} \sim 2.53 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $(8.20 \pm 4.88) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$; 死细菌浓度在 $2.97 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3} \sim 3.19 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值

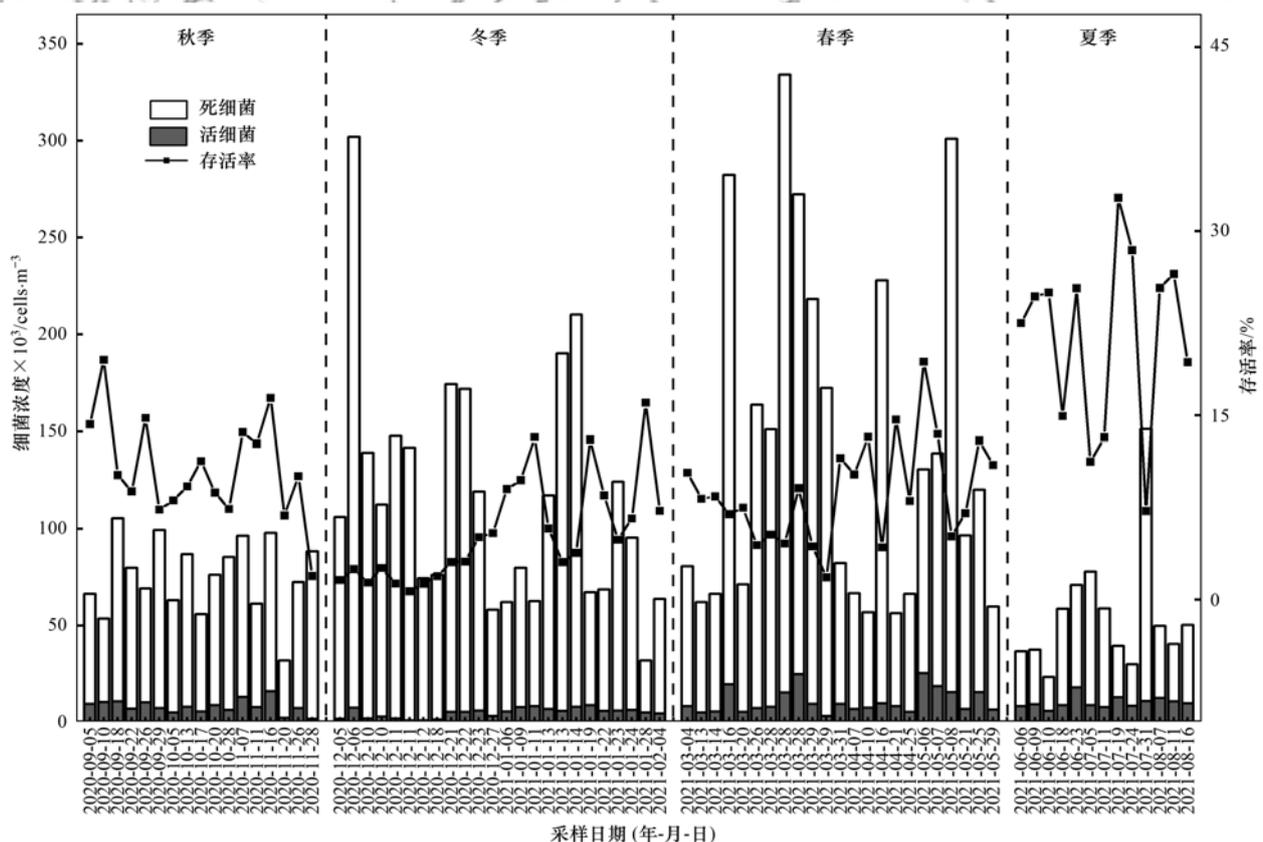


图 2 2020 年 9 月至 2021 年 8 月青岛大气生物气溶胶中细菌浓度分布

Fig. 2 Concentration variation in bacteria in bioaerosols samples in Qingdao from Sep. 2020 to Aug. 2021

为 $(9.74 \pm 6.72) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. 2017 年 8 月至 2018 年 2 月青岛地区采用相同方法测得生物气溶胶中细菌平均值为 $(9.21 \pm 9.07) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中活细菌平均值为 $(1.89 \pm 1.83) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ [20]; 2018 年 3 月至 2019 年 2 月青岛地区生物气溶胶中细菌浓度为 $(8.45 \pm 6.37) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中活细菌浓度为 $(1.09 \pm 0.71) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ [21]. 以上结果表明, 由于气象条件的变化, 同一地区大气中细菌会随着年度变化而有所差异.

2.1.1 青岛近海生物气溶胶中死/活细菌浓度的季节变化

青岛地区大气中活细菌浓度在春季和夏季较高(表 2), 平均值分别为 $(1.08 \pm 0.64) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$

和 $(1.01 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 秋季次之, 为 $(7.84 \pm 3.65) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 冬季最低, 为 $(4.94 \pm 2.47) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中冬季与春季和夏季存在显著性差异 ($P < 0.05$). 死细菌浓度在春季最高, 浓度为 $(1.32 \pm 0.85) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 冬季和秋季分别为 $(1.12 \pm 0.61) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(7.42 \pm 1.92) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季最低, 浓度为 $(4.56 \pm 3.20) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$. 秋季与春季以及夏季与冬季、春季均呈现显著性差异 ($P < 0.05$). 总细菌浓度的季节分布与死细菌相似, 呈现出春季和冬季最高, 夏季最低的季节变化, 且春季与夏季、秋季以及冬季与夏季存在显著差异. 这与当地细菌来源、气象条件和空气环境的季节性变化有关.

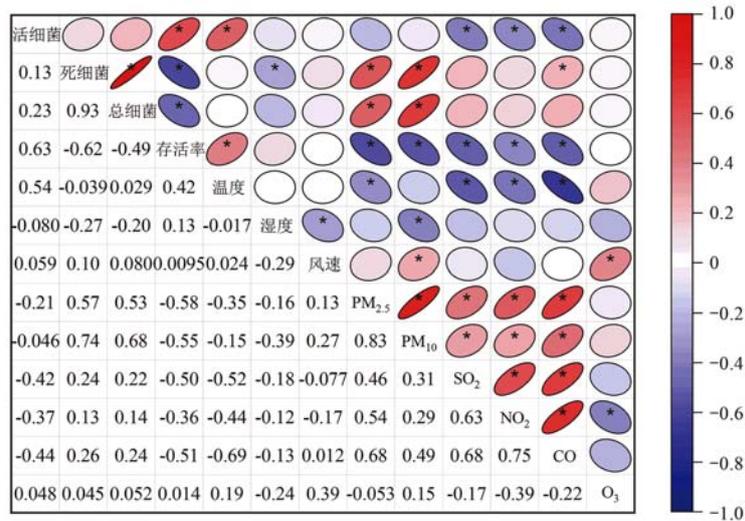
表 2 2020 年 9 月至 2021 年 8 月青岛大气生物气溶胶中细菌浓度以及相关参数季节变化

项目	组分	秋季	冬季	春季	夏季
浓度	活细菌 $\times 10^3 / \text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$	7.84 \pm 3.65	4.94 \pm 2.47	10.77 \pm 6.36	10.16 \pm 3.05
	死细菌 $\times 10^4 / \text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$	7.42 \pm 1.92	11.16 \pm 6.10	13.18 \pm 8.53	4.56 \pm 3.20
	总细菌 $\times 10^4 / \text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$	8.20 \pm 2.07	11.65 \pm 6.13	14.25 \pm 8.88	5.58 \pm 3.27
存活率	存活率/%	9.56 \pm 3.77	4.24 \pm 4.23	8.78 \pm 4.16	21.72 \pm 7.51
	RH/%	69 \pm 13	63 \pm 6	48 \pm 20	82 \pm 13
气象因子	T/°C	14.17 \pm 7.11	2.13 \pm 4.22	15.00 \pm 4.54	24.31 \pm 3.88
	WS/m·s ⁻¹	4.48 \pm 1.92	5.93 \pm 3.41	5.77 \pm 2.09	4.20 \pm 1.80
	$\rho(\text{PM}_{2.5}) / \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	25.88 \pm 19.90	78.54 \pm 44.39	61.61 \pm 56.38	17.31 \pm 15.55
污染因子	$\rho(\text{PM}_{10}) / \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	65.63 \pm 40.95	138.92 \pm 61.44	238.95 \pm 348.98	32.78 \pm 21.21
	$\rho(\text{NO}_2) / \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	33.23 \pm 17.24	47.75 \pm 19.91	29.39 \pm 17.39	17.92 \pm 10.42
	$\rho(\text{SO}_2) / \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	7.65 \pm 4.64	16.25 \pm 10.88	7.05 \pm 3.02	9.69 \pm 8.17
	$\rho(\text{O}_3) / \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	39.50 \pm 35.48	38.42 \pm 27.29	81.38 \pm 33.44	71.23 \pm 40.78
	$\rho(\text{CO}) / \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.62 \pm 0.24	1.72 \pm 1.03	0.65 \pm 0.22	0.47 \pm 0.20

春季细菌的高浓度首先源于微生物来源的增加, 土壤和植被等局地源对大气气溶胶中细菌浓度具有重要影响 [35, 36], 春季植物生长、开花等生命活动会向空气中释放较多的微生物 [37, 38], 春耕活动的增加, 也会造成大气中活/死细菌浓度均有增加. 其次, 春季沙尘事件频繁发生, 在采样期间共出现 3 次, 沙尘期间风速最高达到 $14.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有助于空气中细菌的长距离传输, 极大地促进了大气中细菌浓度的增加 [18]. 这 3 次沙尘事件细菌存活率较低, 在 4.26% ~ 9.11%, 这可能是由于在长距离运输过程中, 细菌会受到紫外线辐射以及干燥环境影响 [39], 从而大量死亡, 因此沙尘天造成死细菌浓度增加比例更高. 再次, 相关性分析发现活细菌浓度与 SO_2 和 NO_2 呈负相关 ($P < 0.05$, 图 3), NO_2 在空气中会形成硝酸和亚硝酸, 可使蛋白质脱氨基 [40], SO_2 也被认为是对微生物有毒的污染物 [41], 春季 SO_2 和 NO_2 浓度低, 利于细菌存活. 此外, 微生物失活率与紫外线辐射强度成正比 [42], 春季太阳辐射强度较

低, 也是造成活细菌浓度较高的原因.

夏季活细菌的高浓度主要是因为大气环境相对适宜细菌存活. 相关性分析发现气温与活细菌的浓度呈显著正相关 ($P < 0.05$, 图 3), 适宜的温度更易促进微生物的释放和生长 [43], 大气中 95% 的细菌是嗜温细菌 [44], 最佳生存温度在 20 ~ 40°C 之间 [45], 而夏季平均温度为 24.3°C, 适宜细菌生长繁殖. 虽然夏季太阳辐射较强, 但是 RH 较高, 微生物表面的水层在一定程度上有助于抵抗太阳辐射造成的损害, 从而保持微生物的生存能力 [46]. 因此细菌存活率在夏季最高, 为 $(21.72 \pm 7.51)\%$. 相关性分析发现, 死细菌浓度与 PM 呈正相关, 冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 偏高, 分别达到 $79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $139 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 这有利于细菌聚集在颗粒上, 免受恶劣的大气条件 (如紫外线照射) 的影响 [47], 但是冬季低温本身就不利于细菌存活 [21], 同时取暖等人类活动使得霾事件频发, 大气中有毒有害物质不利于细菌存活 [48], 造成大气中细菌的大量死亡, 因此冬季细菌存活率最



椭圆方向表示正负相关,其中向右表示正相关,向左表示负相关,椭圆宽度越窄表示相关性系数越接近±1,*表示在0.05水平上显著相关(双尾检验)

图3 青岛生物气溶胶中细菌浓度与环境因素之间的 Spearman's 相关系数

Fig. 3 Spearman's correlation coefficient between the concentrations of bacteria in bioaerosol samples and environmental factors

低,平均值为(4.24 ± 4.23)%。

2.1.2 青岛近海生物气溶胶中死/活细菌浓度的月变化

图4为青岛近海大气生物气溶胶中细菌的月均浓度分布。青岛大气中细菌浓度随月份有所波动。大气中活细菌月均浓度最高值出现在2021年5月,为(1.48 ± 0.72) × 10⁴ cells·m⁻³,而最低值在2020年12月,为(3.28 ± 2.23) × 10³ cells·m⁻³。大气气溶胶中死细菌浓度的月变化与活细菌不同,最高值出现在2021年3月,为(1.53 ± 0.91) × 10⁵ cells·m⁻³,而最低值(3.54 ± 1.53) × 10⁴ cells·m⁻³出现在2021年6月。总细菌的月变化和死细菌相似,这是因为死细菌在细菌中占有很大比例,平均值为88.34%。

从9~11月,气温逐渐下降,从22℃下降到8℃,不利于大气中细菌的生长^[49],细菌浓度逐渐降低。12月ρ(PM_{2.5})到了最高值102 μg·m⁻³,有利于细菌在空气中附着从而浓度增加^[50],但此时青岛地区气温较低,平均值为3.08℃,同时燃煤、生物质燃烧以及车辆排放等人为活动会造成空气中有毒有害化学物质的增加^[51],如高浓度的K⁺和Na⁺可能会破坏细菌的结构和功能,导致细菌的死亡^[52],相应活细菌浓度降低,死细菌浓度升高。12月大气中细菌存活率达到了最低值,为2.35%,较高的SO₂和NO₂可能也是造成活细菌浓度偏低的一个重要原因。2021年1~2月,大气中死/活细菌浓度在逐月下降,在3月份均有所增加,3月的死/活细菌浓度分别是2月的2.59倍和2.19倍,此时PM浓度较高,沙尘天气频发,PM₁₀达到最高值为320 μg·m⁻³,大气中细菌外来源的增加造成青岛地区细菌浓度的

增加。5月份细菌浓度维持在较高水平。进入夏季后,6~8月,活细菌浓度则较高,细菌存活率在6月和8月分别达到了(22.49 ± 4.37)%和(23.73 ±

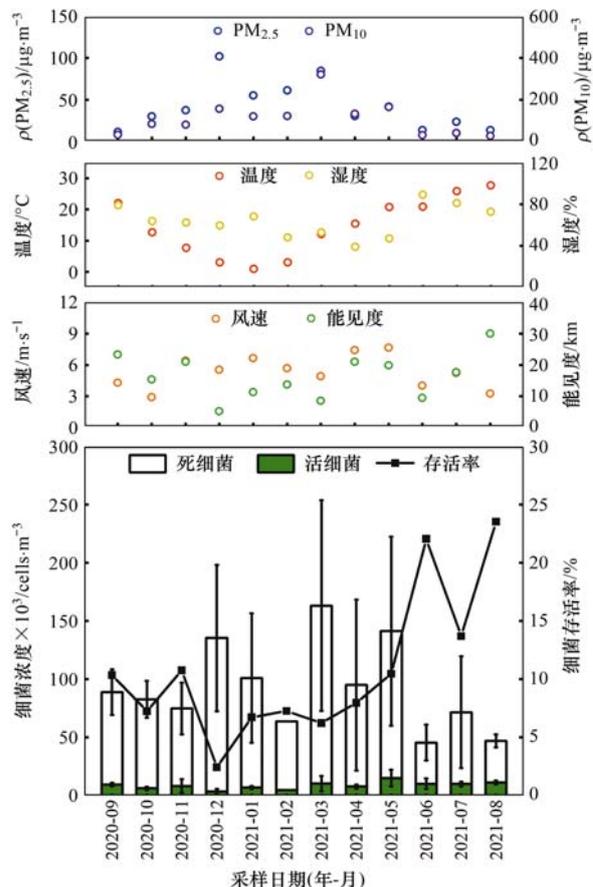


图4 2020年9月至2021年8月青岛生物气溶胶中细菌浓度及相关参数的月变化

Fig. 4 Monthly average concentrations of bacteria in bioaerosol samples and related parameters in Qingdao from Sep. 2020 to Aug. 2021

3.86)% ,这与气象因素逐渐适宜细菌的生长和繁殖有关。

2.2 青岛近海生物气溶胶中死/活细菌粒径月季分布特征

2.2.1 死/活细菌粒径分布的季节变化

图5为2020年9月至2021年8月青岛生物气溶胶中细菌粒径分布的季节变化。如图5(a)所示,青岛沿海地区大气中活细菌粒径分布的季节差异较大,不同季节各粒径上的浓度占比也存在较大差异。秋季近似单峰分布,峰值在 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$,占比为19.51%;而冬季和夏季则呈现双峰分布,冬季峰值位于 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$,比例分别为21.32%和18.60%,而夏季峰值为 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $>7.0 \mu\text{m}$,占比分别为17.62%和19.53%;春季活细菌浓度在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 粒径上占比最低,为12.73%,在其他粒径上均匀分布,占比在16.64%~18.11%。死细菌的粒径分布主要分为近似偏态分布和双峰分布[图5(b)],其中秋季样品粒径近似偏态分布, $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 粒径占比较高,为20.41%;

而冬季、春季和夏季均呈现出双峰分布,冬季峰值位于 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $>7.0 \mu\text{m}$,占比分别为19.89%和18.65%,春季峰值则位于 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$,占比分别为20.56%和17.65%,而夏季死细菌浓度峰值则位于 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 和 $>7.0 \mu\text{m}$,占比分别为18.60%和20.31%。总细菌粒径分布与死细菌相似。总体而言,大气中死/活细菌仍主要附着在粗粒径颗粒物上,这与之前的研究保持一致^[20,53,54]。夏季活细菌在粗粒径上占比较低,为67.62%,这可能是由于青岛地区夏季气团主要来自海上^[55],海洋飞沫是生物气溶胶重要的来源^[45],有研究表明海面液滴的平均直径小于城市雾滴的平均直径^[56]。冬季活/死细菌在粗粒子中占比最低,分别为62.3%和69.79%,这与Yin等^[21]的研究结果相似。冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在4个季节中较高,为 $(78.54 \pm 44.39) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,虽然 PM_{10} 浓度也不低,但是有研究表明 $\text{PM}_{2.5}$ 携带的微生物丰度要高于 PM_{10} ^[37],这可能是引起冬季死/活细菌粗粒径占比最低的原因。

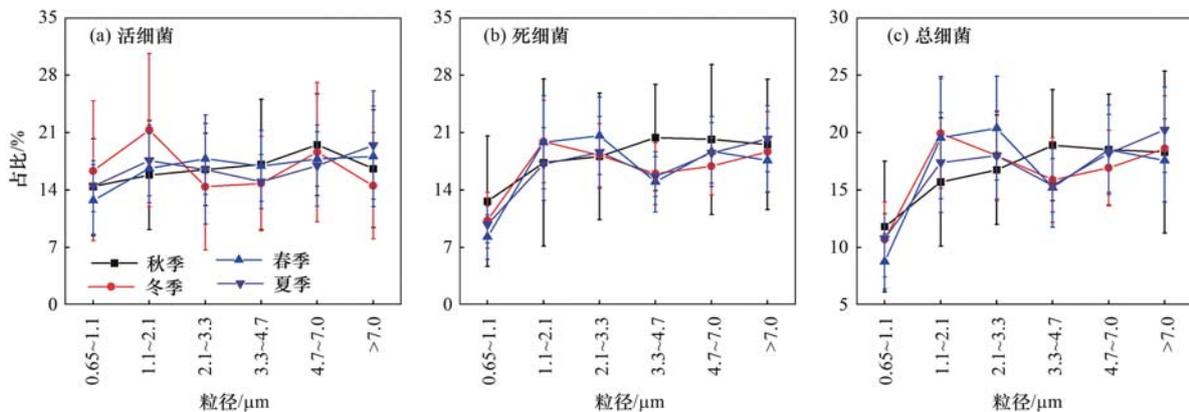


图5 2020年9月至2021年8月青岛生物气溶胶中细菌的粒径分布季节变化

Fig. 5 Seasonal average of bacteria size distributions in bioaerosols samples in Qingdao from Sep. 2020 to Aug. 2021

2.2.2 死/活细菌粒径分布月变化

本研究发现,总细菌和死细菌粒径分布相似,活细菌粒径分布略有不同。粒径分布总体趋势可分为两类,即单峰分布和双峰分布,不同月份的峰值情况也存在着差异性。如图6(a)所示,2020年9月和12月以及2021年的1、3和5月活细菌粒径分布呈现双峰分布,峰值为 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$,范围在18.26%~23.59%;而2021年的4、6和8月双峰则位于 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 。其余月份则呈现为单峰分布,2020年10月峰值位于 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$,而2020年11月则位于 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$,2021年的2月和7月峰值均位于 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 。结果显示,不同月份大气中活细菌粒径分布差异较大。如图6(b)和6(c)所示,2020年的9、10、11月以及2021

年8月青岛地区总细菌和死细菌粒径呈单峰分布,高值出现在 $1.1 \sim 2.1$ 、 $0.65 \sim 1.1$ 、 $2.1 \sim 3.3$ 和 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 。而其余月份总细菌和死细菌粒径均呈现双峰分布,2020年12月和2021年1月峰值为 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$,且峰值比例在18.97%~24.31%;2021年2、3、5月及7月峰值为 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$,峰值比例在18.12%~25.02%;2021年4月峰值位于 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$,而2021年6月峰值则位于 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 。虽然在不同月份死/活细菌的粒径分布存在一定的差异性,但整体来说,细菌主要附着在粗粒径上,这是因为粗颗粒物中污染物富集低于细粒子,能较好地为微生物提供庇护^[47]。其中12月活细菌在粗粒径上占比最低,为60.81%,该月是

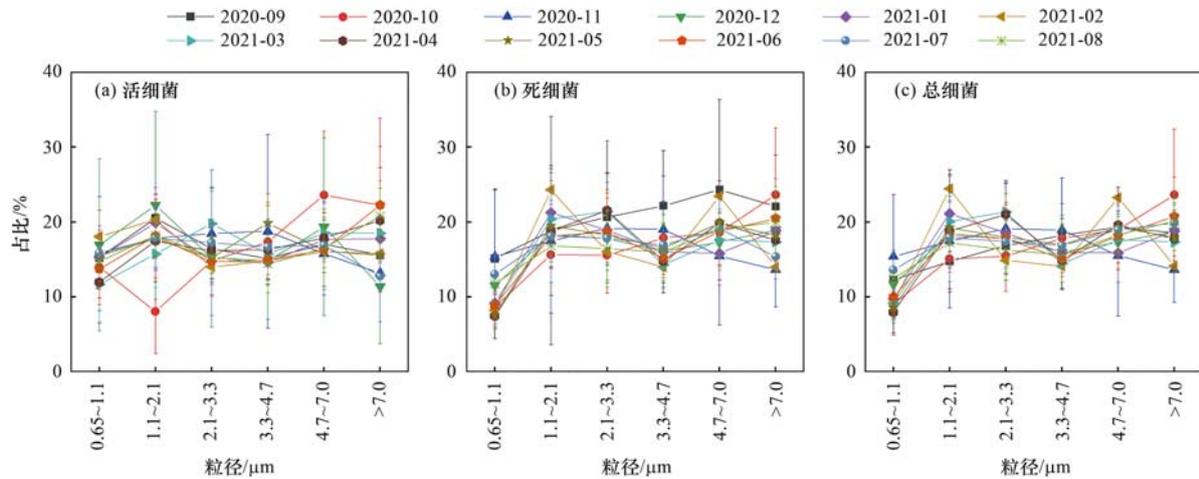


图 6 2020 年 9 月至 2021 年 8 月青岛生物气溶胶中细菌月均粒径分布

Fig. 6 Monthly averaged size distributions of bacteria in bioaerosol samples in Qingdao from Sep. 2020 to Aug. 2021

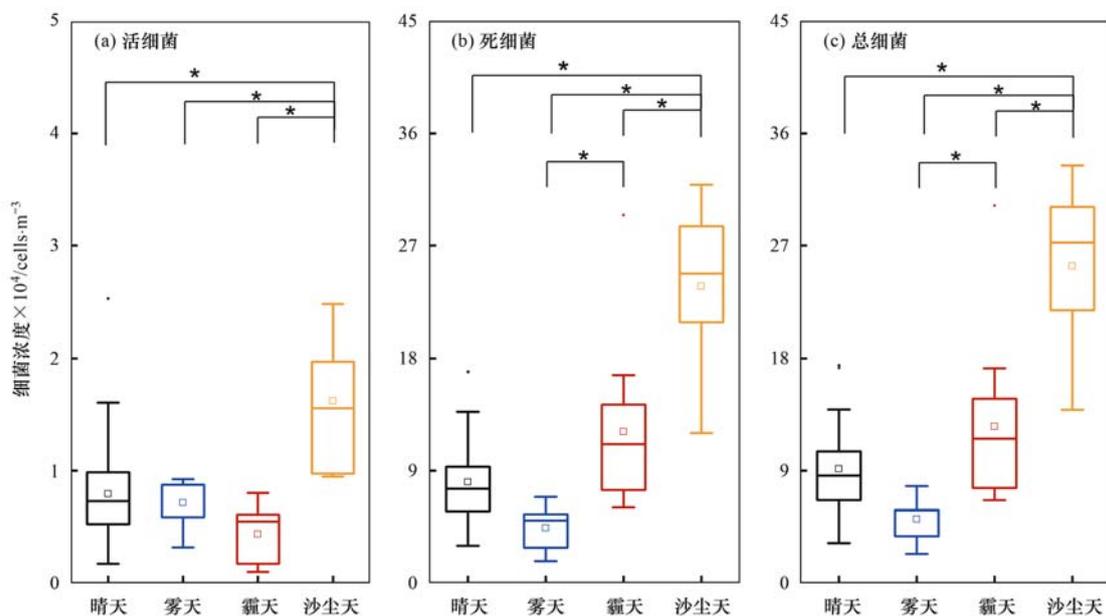
青岛地区霾天多发生期,有研究表明,在霾天活细菌在粗粒径中占比最低^[21].

2.3 不同天气下青岛近海生物气溶胶中死/活细菌浓度以及粒径分布特征

2.3.1 不同天气下青岛近海生物气溶胶中死/活细菌浓度分布特征

为了对比分析大气污染对细菌浓度的影响,本研究根据采样期间的天气类型^[20,58],将 77 份生物气溶胶样品分为晴天、雾天、霾天和沙尘天这 4 类,样品数量分别为 2、5、14 和 7 个.图 7 比较了不同天气类别下的细菌浓度,结果显示青岛地区大气中细菌的平均浓度受到天气类型的影响.霾天活细菌浓度平均值是最低的,为 $(4.34 \pm 2.55) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,雾天活细菌浓度平均值为 $(7.15 \pm$

$2.61) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,均低于晴天浓度 $[(7.93 \pm 5.05) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}]$,分别降低了 43.15% 和 9.84%.沙尘天活细菌浓度为 $(16.19 \pm 5.49) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,是晴天的 2.04 倍.死细菌浓度在雾天最低,平均值为 $(4.39 \pm 2.08) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,霾天和沙尘天死细菌浓度则是晴天的 1.50 倍和 2.93 倍,平均值分别为 $(12.12 \pm 5.99) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(23.74 \pm 6.41) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$.其中,沙尘天活/死细菌浓度与晴天、雾天和霾天均存在显著性差异 ($P < 0.05$),霾天死细菌浓度与雾天也存在显著性差异 ($P < 0.05$).总细菌不同天气下浓度分布与死细菌相似.可见,特殊天气对细菌的影响依赖于细菌类别和污染天气类型,沙尘天气会使死活细菌浓度均升高,雾天会使死活细菌浓度均有所降低,霾天会使



* 表示两者浓度之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图 7 2020 年 9 月至 2021 年 8 月青岛不同天气下生物气溶胶中细菌浓度箱式图

Fig. 7 Concentrations of bacteria in bioaerosol samples under various weather conditions in Qingdao from Sep. 2020 to Aug. 2021

活细菌浓度降低而死细菌浓度增加.此外,本研究发现雾天细菌存活率最高为 16.26%,晴天、霾天以及沙尘天细菌存活率分别为 11.12%、4.10% 和 6.85%.

霾天低风速使得气溶胶的垂直和水平扩散均弱于其他天气,易导致空气污染物的积累,作为微生物载体的 PM 浓度较高^[59].霾天下 PM_{2.5}和 PM₁₀的浓度分别达到了 115 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 172 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是晴天的 3.8 倍和 2.15 倍.本研究进一步计算了单位质量 PM₁₀颗粒上的细菌负荷发现,霾天下死/活细菌负荷均值分别为 702 $\text{cells}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ 和 32 $\text{cells}\cdot\mu\text{g}^{-1}$,均低于晴天 998 $\text{cells}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ 和 98 $\text{cells}\cdot\mu\text{g}^{-1}$,同时,死细菌浓度与 PM 呈正相关关系(图 3),这些结果均表明大气中死细菌浓度的增加是由于污染物在不利扩散条件下积累造成的^[21,60].青岛地区冬季供暖煤炭燃烧、车辆尾气排放等造成 SO₂和 NO₂的浓度高于其他天气^[61],同时,霾天温度较低,在 -1 ~ 9℃,平均值为 3.9℃,远低于细菌适宜生存温度^[45],因此霾天活细菌浓度较低,造成大气中细菌存活率的降低.相较于晴天,雾天 PM 更低, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 仅为 23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 36 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表 3),雾天死活细菌负荷分别为 1 213 $\text{cells}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ 和 197 $\text{cells}\cdot\mu\text{g}^{-1}$,均高于晴天,表明雾天大气中的液滴确实为大气中细菌的生长和繁殖提供了适宜的场所.微生物载体的减少可能是造成大气中细菌浓度降低的一个原因^[21].雾

天湿度达到了 94%,高湿度会促进空气中微生物的湿沉降^[62],影响空气中微生物的浓度和群落结构,部分革兰氏阴性细菌不容易在雾天下存活^[63],造成总细菌浓度低于晴天.相较于霾天,雾天对微生物有毒有害的化学物质浓度较低^[64],SO₂和 NO₂浓度最低,使得大气中死细菌浓度较低,雾天平均温度最接近细菌适宜生存的温度,细菌存活率最高,达到 16.26%.2020 年 9 月和 2021 年 8 月期间青岛市发生三起沙尘事件,均出现在春季.沙尘期间 $\rho(\text{PM}_{10})$ 高达 541.43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 114.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,沙尘事件期间的 WS(8.71 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)明显高于其他天气,可扬起地面尘土,引起生物气溶胶的远距离传输^[65],运输一些来自遥远地区的生物气溶胶,从而改变大气中的细菌种类^[66],造成细菌浓度增加.沙尘期间(图 8),气团途经蒙古戈壁沙漠以及内蒙古浑善达克沙地,经过京津冀工业区达到青岛,沙尘气团中携带的高浓度粗颗粒物在传输和扩散过程中易携带微生物^[67],造成死/活细菌浓度的增加.计算得出死细菌在 PM₁₀上的负荷较沙尘前明显升高,进一步证明沙尘天气大气细菌浓度的增加是由于外源微生物的输入.相较于晴天,沙尘天死细菌浓度增加量远超出活细菌浓度的增加量,这是由于沙尘运输的细菌细胞会暴露在紫外线辐射、低温和干燥等大气不利环境因素中,并受到超出其自身压力保护能力的损害^[28].

表 3 2020 年 9 月至 2021 年 8 月不同天气下青岛地区环境因素

Table 3 Environmental factors in Qingdao from Sep. 2020 to Aug. 2021 under different weathers

项目	晴天	雾天	霾天	沙尘天
RH/%	65 ± 13	94 ± 6.5	66 ± 16	30 ± 10
T/℃	13.75 ± 7.42	18.6 ± 6.58	3.92 ± 4.98	18.6 ± 6.58
WS/m·s ⁻¹	5.0 ± 1.72	3.91 ± 1.32	4.35 ± 2.77	8.71 ± 3.48
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	29.62 ± 21.15	23.40 ± 21.15	115.86 ± 21.82	114.15 ± 62.99
$\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	80.39 ± 54.43	36.20 ± 31.30	172.57 ± 36.77	541.43 ± 257.31
$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	34.17 ± 18.08	17.20 ± 9.63	53.36 ± 16.48	25.14 ± 16.13
$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	11.87 ± 18.36	5.00 ± 21.15	18.85 ± 13.70	7.83 ± 2.78
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	47.17 ± 41.43	46.20 ± 24.30	42.29 ± 29.11	81.67 ± 41.89
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.66 ± 0.32	0.60 ± 0.17	1.44 ± 0.42	0.71 ± 0.26

2.3.2 不同天气下青岛近海生物气溶胶中死/活细菌粒径分布特征

本研究发现,不同天气条件下青岛大气活细菌粒径分布均呈现出双峰分布(图 9).晴天和霾天峰值均位于 1.1 ~ 2.1 μm 和 4.7 ~ 7.0 μm ,活细菌主要附着在粗颗粒上,但是各粒径占比不同,霾天活细菌向细粒径迁移,活菌在粗粒径中的比例为 63.48%,要低于晴天的 68.29%,这与霾天 PM_{2.5}浓度的增加有关^[33].相比之下,雾天活细菌峰值分别

位于 1.1 ~ 2.1 μm 和 > 7.0 μm ,占比分别为 20.39% 和 21.60%,高 RH 促进了颗粒沉积,相较于晴天,雾天活细菌粗粒径上占比下降了 2.67%.沙尘天活细菌峰值则位于 2.1 ~ 3.3 μm 和 4.7 ~ 7.0 μm ,占比分别为 20.90% 和 19.24%,活细菌粒径明显向粗粒径迁移,占比提高到 74.25%,同样的结果出现在 Yin 等^[21]研究中,这与沙尘天粗颗粒的增加密切相关.

晴天死细菌在 0.65 ~ 1.1 μm 粒径上占比最

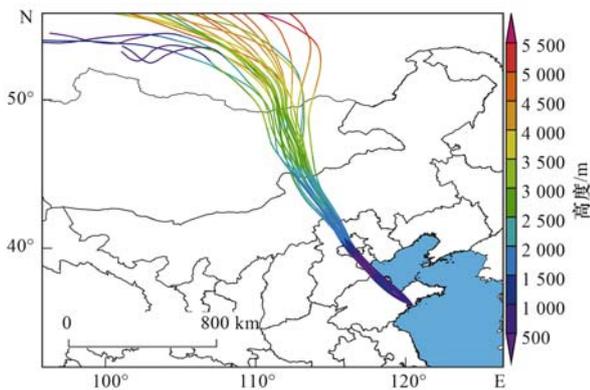


图8 青岛2021年4月16日沙尘期气团的72 h后向轨迹

Fig. 8 The 72 h air mass back trajectories in Qingdao during the dust periods in 16 Apr. 2021

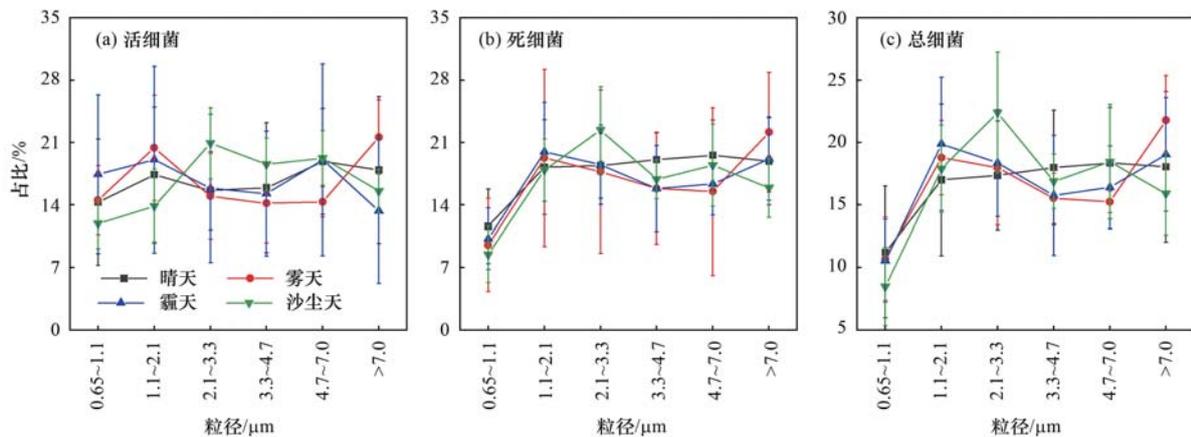


图9 2020年9月至2021年8月青岛不同天气下生物气溶胶中细菌粒径分布

Fig. 9 Size distributions of bacteria in bioaerosol samples under various weather conditions from Sep. 2020 to Aug. 2021 in the Qingdao coastal region

3 结论

(1) 青岛地区大气中细菌浓度由于受微生物来源、气象条件及颗粒物浓度等环境因素的影响具有明显的季节差异,死细菌浓度为:春季>冬季>秋季>夏季的趋势,活细菌为:春季>夏季>秋季>冬季.细菌存活率则表现为夏季最高,春季和秋季次之,冬季最低.相关性分析发现,活细菌浓度与温度呈显著正相关,与 NO_2 、 SO_2 和CO呈显著负相关;死细菌与PM显著正相关.

(2) 大气中细菌浓度随着月份波动,其中死细菌月均浓度最高值出现在2021年3月,最低值出现在2021年6月;活细菌月均浓度最高值出现在2021年5月,而最低值在2020年12月.

(3) 青岛地区细菌粒径分布主要呈现双峰分布和单峰分布两类,存在一定的月季差异,但细菌主要分布在粗粒径上.

(4) 不同污染天气下生物气溶胶中细菌存在明显差异性,沙尘天细菌浓度显著高于霾天、雾天以

低,为11.61%,其他粒径段死细菌占比处于18.82%~19.59%,而雾天、霾天以及沙尘天下死细菌粒径分布均呈现出双峰分布,其中雾天和霾天峰值均位于1.1~2.1 μm 和>7.0 μm ,沙尘天则出现在2.1~3.3 μm 和4.7~7.0 μm .总体来说,死细菌仍主要附着在粗粒径上,晴天平均占比为75.95%,雾天、霾天和沙尘天粗模态下的死活菌比例均有所下降,分别为71.21%、69.83和73.62%.Gong等^[20]同样发现霾天下死细菌在粗粒径上的占比低于晴天,细模态下的微生物最有可能随着细颗粒浓度的增加而增加.Yin等^[21]发现雾天下死细菌在粗粒径上的占比同样低于晴天,这与高湿度造成的粒子沉降有关.总细菌粒径分布则与死细菌相似.

及晴天,但细菌存活率较低.霾天细菌存活率最低,为4.10%,雾天细菌存活率最高,为16.26%.不同污染天气死/活细菌粒径分布均为双峰分布,但峰值随天气类型而变化.

参考文献:

- [1] Després V R, Huffman J A, Burrows S M, *et al.* Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2012, **64**(1), doi: 10.3402/tellusb.v64i0.15598.
- [2] 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.
- [3] Griffin D W. Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health [J]. *Clinical Microbiology Reviews*, 2007, **20**(3): 459-477.
- [4] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [5] Yadav S, Gettu N, Swain B, *et al.* Bioaerosol impact on crop health over India due to emerging fungal diseases (EFDs): an important missing link [J]. *Environmental Science and Pollution*

- Research, 2020, **27**(11): 12802-12829.
- [6] Núñez A, de Paz G A, Rastrojo A, *et al.* Monitoring of airborne biological particles in outdoor atmosphere. Part I: importance, variability and ratios[J]. *International Microbiology*, 2016, **19**(1): 1-13.
- [7] 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.
- [8] Möhler O, DeMott P J, Vali G, *et al.* Microbiology and atmospheric processes; the role of biological particles in cloud physics[J]. *Biogeosciences*, 2007, **4**(6): 1059-1071.
- [9] Sindoni O I, Saija R, Iatì M A, *et al.* Optical scattering by biological aerosols: experimental and computational results on spore simulants[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(15): 6942-6950.
- [10] Burrows S M, Elbert W, Lawrence M G, *et al.* Bacteria in the global atmosphere-Part I: review and synthesis of literature data for different ecosystems[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(23): 9263-9280.
- [11] Creamean J M, Suski K J, Rosenfeld D, *et al.* Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western U. S. [J]. *Science*, 2013, **339**(6127): 1572-1578.
- [12] Behzad H, Gojobori T, Mineta K. Challenges and opportunities of airborne metagenomics[J]. *Genome Biology and Evolution*, 2015, **7**(5): 1216-1226.
- [13] 陈盟, 祁建城, 杜耀华, 等. 活/死菌检测方法的研究进展[J]. *军事医学*, 2018, **42**(9): 715-720.
Chen M, Qi J C, Du Y H, *et al.* Research progress in methods for live/dead detection of bacteria[J]. *Military Medical Sciences*, 2018, **42**(9): 715-720.
- [14] 唐倩倩, 王剑平, 叶尊忠, 等. 免疫磁分离技术在 *E. coli* O157: H7 检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(10): 2614-2618.
Tang Q Q, Wang J P, Ye Z Z, *et al.* Application of immunomagnetic separation to *E. coli* O157: H7 detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(10): 2614-2618.
- [15] 王晓丹, 赵新华. 配水管网细菌活性影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 622-628.
Wang X D, Zhao X H. Influencing factors of bacterial activity in water distribution networks[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 622-628.
- [16] Haglund A L, Lantz P, Törnblom E, *et al.* Depth distribution of active bacteria and bacterial activity in lake sediment[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **46**(1): 31-38.
- [17] Nazarenko Y, Zhen H J, Han T, *et al.* Nanomaterial inhalation exposure from nanotechnology-based cosmetic powders: a quantitative assessment[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, **14**(11), doi: 10.1007/s11051-012-1229-2.
- [18] Murata K, Zhang D Z. Transport of bacterial cells toward the Pacific in Northern Hemisphere westerly winds[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **87**: 138-145.
- [19] 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.
- [20] Gong J, Qi J H, Beibei E, *et al.* Concentration, viability and size distribution of bacteria in atmospheric bioaerosols under different types of pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113485.
- [21] Yin Y D, Qi J H, Gong J, *et al.* Distribution of bacterial concentration and viability in atmospheric aerosols under various weather conditions in the coastal region of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148713.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Park J, Yoon C, Lee K. Comparison of modeled estimates of inhalation exposure to aerosols during use of consumer spray products[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2018, **221**(6): 941-950.
- [28] Hara K, Zhang D Z. Bacterial abundance and viability in long-range transported dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 20-25.
- [29] Lighthart B, Shaffer B T. Viable bacterial aerosol particle size distributions in the midsummer atmosphere at an isolated location in the high desert chaparral[J]. *Aerobiologia*, 1995, **11**(1): 19-25.
- [30] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Concentration and size distribution of culturable airborne microorganisms in outdoor environments in Beijing, China [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, **42**(5): 325-334.
- [31] 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.
- [32] 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 等. 西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4494-4500.
Li W X, Lu R, Xie Z S, *et al.* Concentration and size distribution characteristics of culturable bioaerosols at various air quality levels during fall and winter in Xi'an, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4494-4500.
- [33] 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.
- [34] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [35] 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.
- [36] Smets W, Moretti S, Denys S, *et al.* Airborne bacteria in the atmosphere: presence, purpose, and potential[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **139**: 214-221.
- [37] 宫静, 祁建华, 李鸿涛. 青岛近海生物气溶胶中总微生物的

- 分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3477-3488.
- Gong J, Qi J H, Li H T. Distribution of total microbes in atmospheric bioaerosols in the coastal region of Qingdao [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3477-3488.
- [38] Mu F F, Li Y P, Lu R, *et al.* Source identification of airborne bacteria in the mountainous area and the urban areas [J]. Atmospheric Research, 2020, **231**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104676.
- [39] Qi J H, Liu X H, Yao X H, *et al.* The concentration, source and deposition flux of ammonium and nitrate in atmospheric particles during dust events at a coastal site in northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(2): 571-586.
- [40] Ehrlich R, Miller S. Effect of NO₂ on airborne venezuelan equine encephalomyelitis virus [J]. Applied Microbiology, 1972, **23**(3): 481-484.
- [41] Hameed A A A, Khoder M I, Ibrahim Y H, *et al.* Study on some factors affecting survivability of airborne fungi [J]. Science of the Total Environment, 2012, **414**: 696-700.
- [42] Pan Y L, Kalume A, Wang C J, *et al.* Atmospheric aging processes of bioaerosols under laboratory-controlled conditions: a review [J]. Journal of Aerosol Science, 2021, **155**, doi: 10.1016/j.jaerosci.2021.105767.
- [43] Guo K Q, Qian H, Ye J, *et al.* Assessment of airborne bacteria and fungi in different-type buildings in Nanjing, a hot summer and cold winter moist Chinese city [J]. Building and Environment, 2021, **205**, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108258.
- [44] Tsai F C, Macher J M. Concentrations of airborne culturable bacteria in 100 large US office buildings from the BASE study [J]. Indoor Air, 2005, **15**(S9): 71-81.
- [45] Xie Z S, Fan C L, Lu R, *et al.* Characteristics of ambient bioaerosols during haze episodes in China: a review [J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 1930-1942.
- [46] Zhong X, Qi J H, Li H T, *et al.* Seasonal distribution of microbial activity in bioaerosols in the outdoor environment of the Qingdao coastal region [J]. Atmospheric Environment, 2016, **140**: 506-513.
- [47] 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.
- [48] Ji L, Zhang Q, Fu X W, *et al.* Feedback of airborne bacterial consortia to haze pollution with different PM_{2.5} levels in typical mountainous terrain of Jinan, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133912.
- [49] Tang J W. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2009, **6**(S6): 737-746.
- [50] 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.
- [51] Zhang Y Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM₁ and PM_{2.5} in Beijing in autumn [J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 72-82.
- [52] Xu C H, Wei M, Chen J M, *et al.* Bacterial characterization in ambient submicron particles during severe haze episodes at Ji'nan, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 188-196.
- [53] 雒月云, 毛怡心, 庄思琪, 等. 北京市不同季节室外细菌气溶胶分布特征及其环境影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2022, **35**(2): 556-565.
- Luo Y Y, Mao Y X, Zhuang S Q, *et al.* Seasonal distribution characteristics of bacterial aerosols and their correlations with environmental factors in Beijing, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(2): 556-565.
- [54] 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.
- [55] 袁刚, 祁建华, 丁雪. 青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 [J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1280-1297.
- Yuan G, Qi J H, Ding X. Concentrations and patterns of atmospheric particulate nitrogen and phosphorus during different weather conditions in Qingdao coastal region [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1280-1297.
- [56] Zhang X J, Musson-Genon L, Dupont E, *et al.* On the Influence of a simple microphysics parametrization on radiation fog modelling: a case study during ParisFog [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2014, **151**(2): 293-315.
- [57] Wei M, Xu C H, Xu X M, *et al.* Size distribution of bioaerosols from biomass burning emissions: characteristics of bacterial and fungal communities in submicron (PM₁) and fine (PM_{2.5}) particles [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **171**: 37-46.
- [58] QX/T 113-2010, 霾的观测和预报等级[S].
- [59] Betha R, Behera S N, Balasubramanian R. 2013 Southeast Asian smoke haze: fractionation of particulate-bound elements and associated health risk [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(8): 4327-4335.
- [60] Zhai Y B, Li X, Wang T F, *et al.* A review on airborne microorganisms in particulate matters: composition, characteristics and influence factors [J]. Environment International, 2018, **113**: 74-90.
- [61] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [62] Dueker M E, O'Mullan G D, Weathers K C, *et al.* Coupling of fog and marine microbial content in the near-shore coastal environment [J]. Biogeosciences, 2012, **9**(2): 803-813.
- [63] Theunissen H J, Toom N A L, Burggraaf A, *et al.* Influence of temperature and relative humidity on the survival of Chlamydia pneumoniae in aerosols [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, **59**(8): 2589-2593.
- [64] Rajput P, Singh D K, Singh A K, *et al.* Chemical composition and source-apportionment of sub-micron particles during wintertime over Northern India: new insights on influence of fog-processing [J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 81-91.
- [65] Mazar Y, Cytryn E, Erel Y, *et al.* Effect of dust storms on the atmospheric microbiome in the eastern mediterranean [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(8): 4194-4202.
- [66] 汪瑶, 祁建华, 张婷, 等. 青岛多种天气下生物气溶胶中细菌群落特征 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, **51**(6): 88-98.
- Wang Y, Qi J H, Zhang T, *et al.* Bacterial community characteristics in different weather conditions of atmospheric bioaerosols in Qingdao [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, **51**(6): 88-98.
- [67] Amarloe A, Fazlzadeh M, Jafari A J, *et al.* Particulate matters and bioaerosols during Middle East dust storms events in Ilam, Iran [J]. Microchemical Journal, 2020, **152**, doi: 10.1016/j.microc.2019.104280.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)