

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性

赵伟, 李杰*, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 分析了兰州市春季不同时段微生物气溶胶浓度、粒径和细菌群落结构组成的差异, 探讨气象条件和空气污染物对微生物气溶胶分布的影响。结果表明, 兰州市春季空气中总微生物、细菌、真菌和放线菌浓度均值分别为 $(2\,730 \pm 376)$ 、 $(2\,243 \pm 354)$ 、 (349 ± 38) 和 (138 ± 22) CFU·m⁻³, 其中, 细菌占 82.16%, 明显高于真菌和放线菌 ($P < 0.05$)。08:00~09:00 时段总微生物、细菌和放线菌浓度明显高于 18:00~19:00 时段, 微生物气溶胶浓度变化明显受气象条件和空气污染物的影响。细菌和真菌气溶胶粒子主要分布在前 4 级 ($> 2.1\ \mu\text{m}$), 分别占 85.13% 和 83.26%, 而放线菌主要集中在后 4 级 ($< 4.7\ \mu\text{m}$) 上, 占 73.15%。Illumina MiSeq 测序结果表明, 08:00~09:00 和 18:00~19:00 时段细菌群落结构组成差异不显著 ($P > 0.05$)。乳球菌属 (*Lactococcus*) 和芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 为优势菌属, 肠球菌属 (*Enterococcus*)、葡萄球菌属 (*Staphylococcus*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*)、克雷伯氏菌属 (*Klebsiella*)、欧文氏菌属 (*Erwinia*)、蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*)、无乳链球菌 (*Streptococcus agalactiae*) 和产气荚膜梭菌 (*Clostridium perfringens*) 等是兰州市春季空气环境的潜在病原菌。本研究结果为揭示兰州市春季微生物气溶胶污染状况以及相关病原菌对人类健康的潜在危害提供基础数据。

关键词: 微生物气溶胶; 粒径分布; 细菌群落结构; 高通量测序

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1668-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006023

Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China

ZHAO Wei, LI Jie*, XIE Hui-na, ZHANG Li-hong, WANG Ya-e

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The aim of this study was to analyze the differences in the concentration, particle size, and bacterial community structure of microbial aerosols and further investigated the effects of meteorological conditions and air pollutants on microbial aerosol distribution at different periods during spring in Lanzhou. The results showed that the average aerosol concentrations of total microbes, bacteria, fungi, and actinomycetes in the air environment of Lanzhou were $(2\,730 \pm 376)$, $(2\,243 \pm 354)$, (349 ± 38) , and (138 ± 22) CFU·m⁻³, respectively. The contribution rate of bacteria was 82.16%, which was significantly higher than that of fungi and actinomycetes ($P < 0.05$). The concentrations of total microorganisms, bacteria, and actinomycetes during 08:00-09:00 were significantly higher than those sampled during 18:00-19:00, indicating that meteorological conditions and air pollutants have a remarkable influence on the concentration of microbial aerosols. Aerosol particles of bacteria and fungi were primarily distributed at the first four levels ($> 2.1\ \mu\text{m}$), accounting for 85.13% and 83.26%, respectively, while 73.15% of the actinomycetes aerosol particles focused largely on the latter four stages ($< 4.7\ \mu\text{m}$). Illumina MiSeq sequencing results indicated that there was no significant difference in the composition of the bacterial community ($P > 0.05$) during the periods of 08:00-09:00 and 18:00-19:00. *Lactococcus* and *Bacillus* were the dominant bacteria genus. *Enterococcus*, *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Klebsiella*, *Erwinia*, *Bacillus cereus*, *Streptococcus agalactiae*, and *Clostridium perfringens* were potential pathogens detected in the air environment of Lanzhou in the spring. The results could provide fundamental data for further revealing the contamination status of microbial aerosols and the potential harm of the related pathogenic bacteria to human health during the spring in Lanzhou.

Key words: microbial aerosols; size distribution; bacterial community structure; high-throughput sequencing

微生物气溶胶是指悬浮于大气或附着于颗粒物表面的细菌、真菌、放线菌、病毒和动植物碎片等形成的胶体体系^[1-3], 粒径大小在 0.01~100 μm 之间^[4], 占大气气溶胶的 25% 左右^[5], 它不仅是大气生态系统的重要组成部分, 也是自然界中物质循环的主要参与者^[6,7]。近年来, 以空气或气溶胶为传播媒介的 SARS、MERS 和 COVID-19 等疾病频发^[8-10], 使人们逐渐意识到空气环境中微生物污染的严重性^[11,12]。有研究发现, 空气中存在的细菌和

放线菌约有 1 200 种, 真菌约有 40 000 种^[13], 其中少部分微生物属于致病菌或条件致病菌, 且致病菌丰度随空气污染程度的增加而增加, 会对人类健康造成严重危害^[4,11]。

微生物气溶胶是生态系统的重要组成部分, 是

收稿日期: 2020-06-02; 修订日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768032); 兰州市科技局项目(2016-3-119)

作者简介: 赵伟(1976~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: 53345317@qq.com

* 通信作者, E-mail: wye@mail.ljtu.cn

评价城市空气环境质量的重要指标.有研究发现,空气中细菌约为 $10 \sim 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 占总微生物的 80% 以上,主要分布于变形菌门、厚壁菌门和拟杆菌门等,真菌和放线菌数量较少^[14,15].空气中微生物来源极为复杂,其分布状况受温度、湿度、光照、风速、空气污染程度和人类活动等因素的影响,导致微生物气溶胶浓度、粒径和群落结构与功能存在季节性和区域性差异^[16~18].有研究认为季节变化是影响微生物气溶胶分布的主要因素,尤其在春季和夏季,环境温度适宜,有利于微生物生长繁殖^[19,20].曲浩丽等^[21]的研究发现南京市春季细菌和真菌气溶胶浓度约为 $10^4 \sim 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $10^3 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、微球菌属(*Micrococcus*)、青霉属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)和链格孢属(*Alternaria*)为优势菌属.李鸿涛等^[22]的研究发现晴天时微生物气溶胶浓度为 $5.61 \times 10^5 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$,沙尘天气空气污染严重,微生物气溶胶浓度显著升高,为晴天的 14.8 倍.姜金融^[23]的研究发现兰州市细菌和真菌气溶胶浓度均值分别为 $916 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $322 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,细菌和真菌气溶胶粒子主要分布在 $>3.3 \mu\text{m}$ 和 $2.1 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 范围内.目前,研究人员已对兰州市空气环境中微生物分布状况进行检测,但不同时段气象条件和空气污染物对微生物气溶胶浓度、粒径和细菌群落结构与功能的影响鲜见报道.

兰州市地处黄土高原河谷地带,市区四面环山,属于典型中温带大陆性季风气候,大气层结构稳定,风速低,平均风速 $\leq 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年均静风频率高达 64%^[24].春季早晚温差大,降雨少,沙尘天气频发,空气质量较差.本研究采用 PSW-6 型 Andersen 六级空气微生物采样器进行样品采集,分析不同时段微生物气溶胶浓度、粒径和细菌群落结构及功能特征,进一步探讨微生物气溶胶分布与气象条件和空气污染物的相关性,以期为兰州市春季微生物气溶胶污染状况和空气质量的评价提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采用 PSW-6 型 Andersen 六级空气微生物采样器对兰州市不同区域(商业区、工业区和公园景点区)进行样品采集.商业区是集交通、商业和餐饮等行业融为一体的综合性区域,周边绿化率低,人流和车流量较大;公园景点区的占地面积约 0.37 km^2 (约 550 亩),绿化率达 90%,园区内无车辆通行,南外侧紧靠城市道路,高峰期车流量较大;工业是一家大型化工企业,工业尾气排放量大,理化污

染较严重.

PSW-6 型 Andersen 空气微生物采样器分 6 级,每级 400 个孔,1~6 级有效截留粒径(effective cut diameter,ECD)为 7.00、4.70、3.30、2.10、1.10 和 $0.65 \mu\text{m}$.2017 年 3~5 月将不同区域 08:00~09:00 和 18:00~19:00 时段的样品采集于相应固体培养基上,采样时间为 10 min,空气流量为 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,采样高度距地面 1.5 m,每月连续采样 3 d,分析微生物气溶胶浓度和粒径分布特性.将孔径为 $0.22 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维膜(直径 80 mm)置于 PSW-6 型采样器的第一层,采样 60 min,结束后将滤膜带回实验室,在无菌条件下剪去 1/2 滤膜装入离心管,同一采样点 3 d 的滤膜样品合在一起,保存于 -80°C 冰箱,用于分析细菌多样性.同时,采样期间用 QT50 空气质量检测器测定各采样点的温度、相对湿度、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$,用 GM816 便携式风速仪测定风速,同时记录 SO_2 和 NO_2 实时数据.

1.2 微生物培养

细菌采用普通营养琼脂培养基 37°C 培养 48 h,真菌采用察氏培养基 28°C 培养 72~120 h,放线菌采用高氏一号培养基 28°C 培养 120 h,总微生物为细菌、真菌和放线菌之和^[25].培养结束后统计各级培养皿上的微生物菌落数,利用 Positive-hole 法^[23,26]进行校正,根据公式(1)计算出微生物气溶胶浓度值.微生物气溶胶粒径分布以采样器各级的菌落数占六级总菌落数的百分比来表示,根据公式(2)进行计算^[23,27].中值直径(count median diameter,CMD)是微生物气溶胶粒子累积粒径分布百分比达到 50% 时所对应的粒径,按照文献[23,26]中的公式进行计算.

$$c_i = \frac{N_i \times 1000}{t \times Q} \quad (1)$$

式中, c_i 表示微生物气溶胶浓度, $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$; N_i 表示各级校正后的菌落数之和,CFU; t 表示采样时间,min; Q 表示采样气体流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$.

微生物粒径分布百分比(%) =

$$(\text{单级菌落数} / \text{六级总菌落数}) \times 100\% \quad (2)$$

1.3 DNA 的提取、扩增和测序

滤膜样品委托上海派森诺生物科技有限公司进行 DNA 提取和测序.利用引物(515F:5'-GTGCC AGCMGCCGCGTAA-3' 和 907R:5'-CCGTCAATTCM TTTRAGTTT-3')对细菌 16S rRNA 基因的 V4-V5 区进行扩增,具体反应条件: 98°C 30 s, 98°C 15 s, 50°C 30 s, 72°C 30 s, 27 个循环,循环结束后 72°C 最终延伸 5 min.扩增产物用 Axygen 凝胶回收试剂盒回收目的片段,利用 Illumina MiSeq 平台进行双端测序.

1.4 生物信息学分析

高通量下机的原始数据使用 Qiime 软件进行序列预处理和质量控制,去除低质量序列和嵌合体,获得优质序列.以 97% 的序列相似度作为可操作分类单元(operational taxonomic units, OTUs)划分阈值进行 OTUs 划分,用 Greengenes 数据库进行细菌 16S rRNA 基因序列比对和物种注释.

1.5 数据统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 21 进行数据差异性和相关性进行分析,当 $P < 0.05$ 时,表示在 95% 置信区间内具有统计学意义.用 Origin 2018 软件进行绘图.用 STAMP 软件分析不同时段细菌群落结构属水平上的差异性.

2 结果与分析

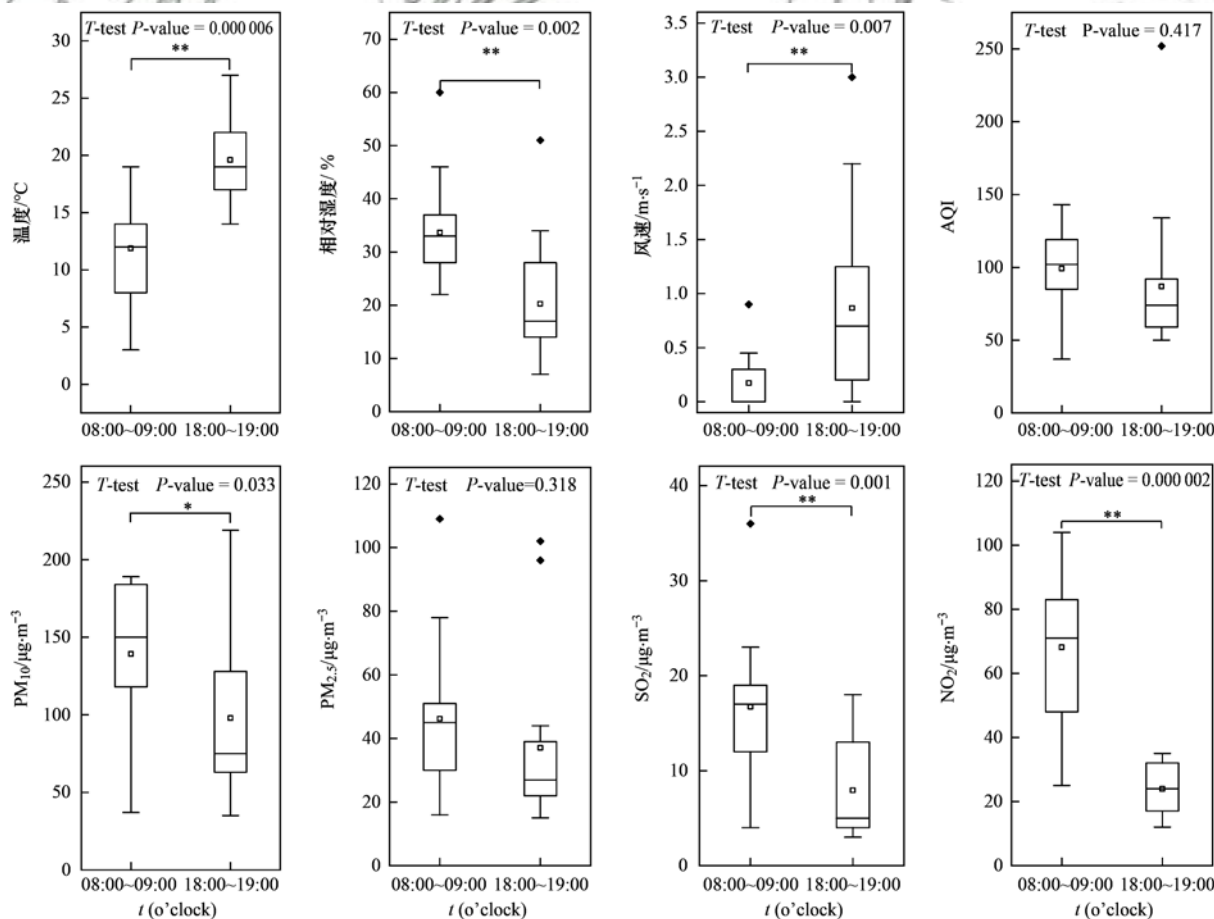
2.1 气象条件和空气污染物分布特征

通过图 1 可以看出,兰州市春季气象条件、空气质量和污染物的分布状况存在显著差异.经 T 检验分析发现,08:00~09:00 时段环境温度和风速低于 18:00~19:00 时段,不利于空气环境中颗粒物的流

动和扩散.08:00~09:00 时段相对湿度、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 明显高于 18:00~19:00 时段($P < 0.05$), $PM_{2.5}$ 在不同时段差异不显著($P > 0.05$).08:00~09:00 和 18:00~19:00 时段 PM_{10} 的均值分别为 $(139.27 \pm 12.19) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(97.93 \pm 13.85) \mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 的均值分别为 $(46.20 \pm 5.88) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(37.07 \pm 6.79) \mu g \cdot m^{-3}$,依据《空气环境质量标准》(GB 3095-12),兰州市春季采样期间 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 均低于空气质量二级标准限值($PM_{10} < 150 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $PM_{2.5} < 75 \mu g \cdot m^{-3}$).

2.2 微生物气溶胶浓度分布特征

兰州市春季不同类型微生物气溶胶浓度分布存在显著差异[图 2(a)].总微生物、细菌、真菌和放线菌气溶胶浓度均值分别为 (2730 ± 376) 、 (2243 ± 354) 、 (349 ± 38) 和 $(138 \pm 22) CFU \cdot m^{-3}$,细菌、真菌和放线菌分别占 82.16%、12.78% 和 5.06%,细菌显著高于真菌和放线菌($P < 0.05$),真菌与放线菌之间的差异不显著($P > 0.05$).不同时段微生物气溶胶浓度分布也不同[图 2(b)],08:00~09:00 时段总微生物、细菌、真菌和放线菌浓度均值



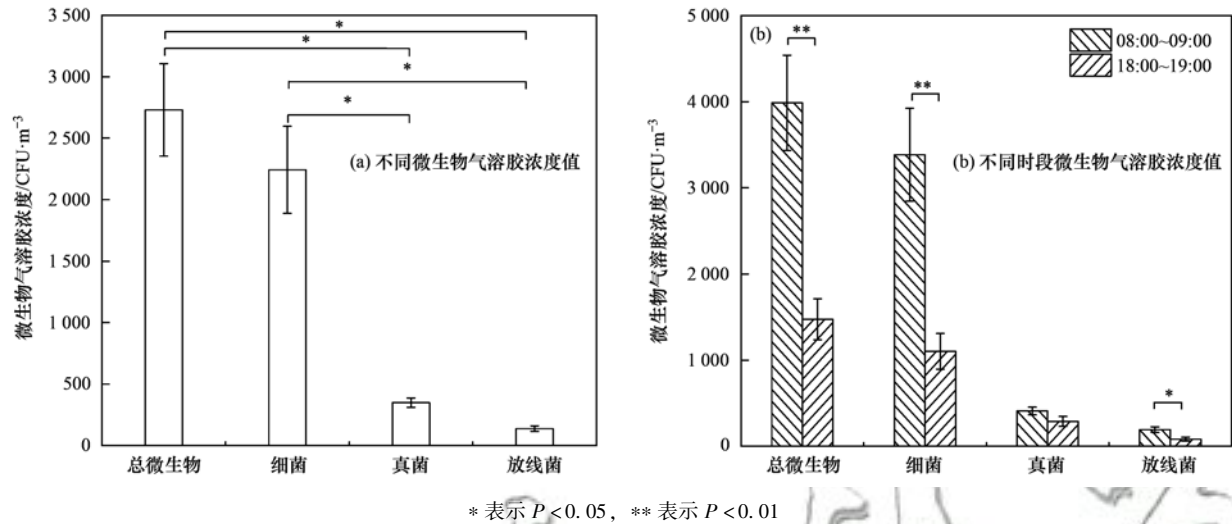
* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

图 1 兰州市春季气象条件和空气污染物分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of meteorological conditions and air pollutants during spring in Lanzhou

分别为 $(3\,986 \pm 540)$ 、 $(3\,384 \pm 540)$ 、 (409 ± 44) 和 (193 ± 32) $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 18:00 ~ 19:00 时段总微生物、细菌、真菌和放线菌浓度均值分别为 $(1\,474 \pm 239)$ 、 $(1\,102 \pm 207)$ 、 (289 ± 58) 和 (83 ± 23)

$\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 经 T 检验发现, 08:00 ~ 09:00 时段总微生物 ($P < 0.01$)、细菌 ($P < 0.01$) 和放线菌 ($P < 0.05$) 明显高于 18:00 ~ 19:00, 而真菌气溶胶浓度在两个时段差异不显著 ($P > 0.05$).



* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

图2 微生物气溶胶浓度分布特征

Fig. 2 Distributions characteristics of microbial aerosol concentrations

2.3 微生物气溶胶粒径分布

从细菌气溶胶粒径分布可以看出[图3(a)], 85.13%的细菌气溶胶粒子集中前4级 ($> 2.1 \mu\text{m}$), 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段分别

占 88.60% 和 81.67%. 08:00 ~ 09:00 时段细菌气溶胶粒径峰值出现在第2级 ($4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$), 占 25.91%, 18:00 ~ 19:00 时段细菌气溶胶粒径峰值出现在第1级 ($> 7.0 \mu\text{m}$), 占 26.37%. 从真菌气

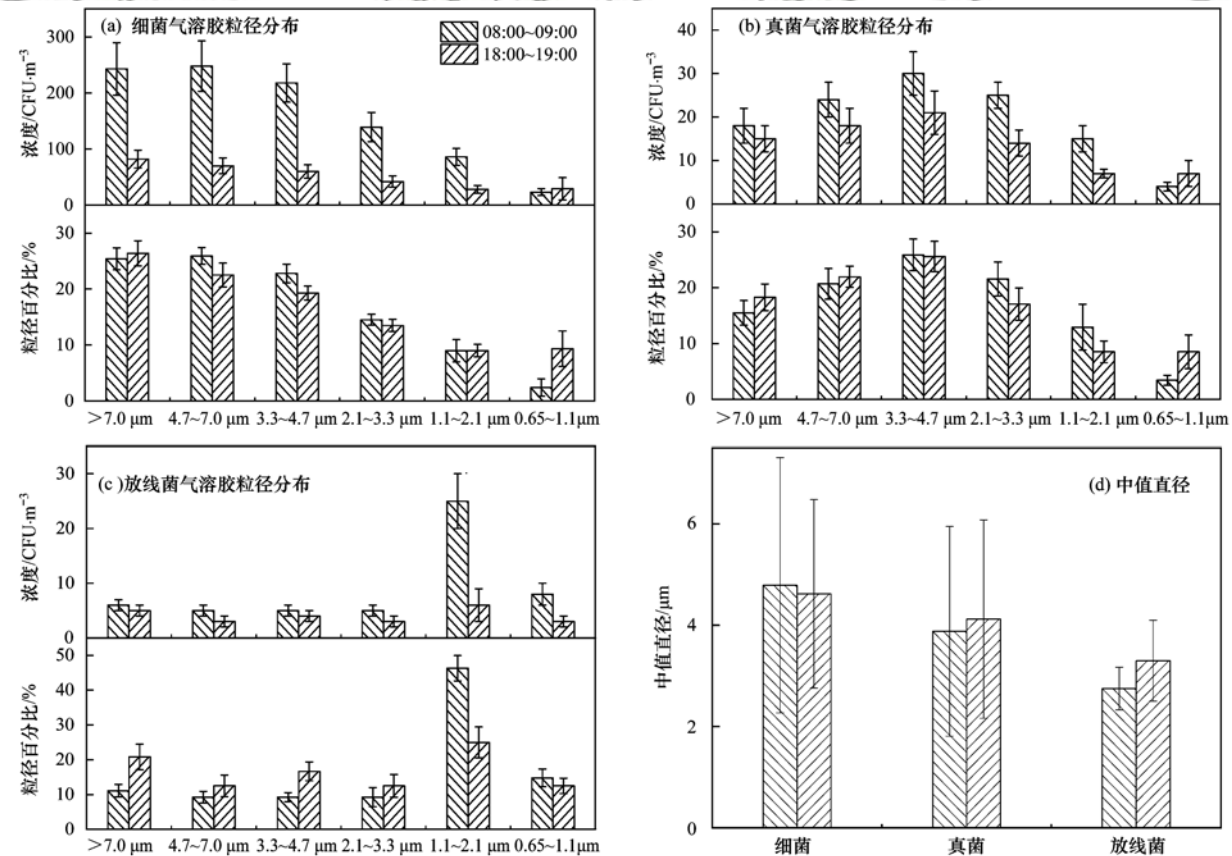


图3 微生物气溶胶粒径分布特征

Fig. 3 Particle size distribution characteristics of microbial aerosols

溶胶粒径分布可以看出[图 3(b)], 83.26% 的真菌气溶胶粒子分布在前 4 级 ($>2.1 \mu\text{m}$), 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段分别占 83.61% 和 82.91%, 峰值均出现在第 3 级 ($3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$), 分别占 25.86% 和 25.6%. 从放线菌气溶胶粒径分布可以看出[图 3(c)], 73.15% 的放线菌气溶胶粒子集中在后 4 级 ($<4.7 \mu\text{m}$), 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段分别为 79.63% 和 66.67%, 峰值均出现在第 5 级 ($1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$), 分别占 46.3% 和 25%. 不同时段微生物气溶胶粒子中值直径分布存在差异[图 3(d)], 08:00 ~ 09:00 时段细菌、真菌和放线菌气溶胶粒子的中值直径分别为 4.79 、 3.88 和 $2.75 \mu\text{m}$, 18:00 ~ 19:00 时段分别为 4.62 、 4.12 和 $3.3 \mu\text{m}$. 与 08:00 ~ 09:00 时段相比, 18:00 ~ 19:00 时段细菌气溶胶粒子的中值直径降低, 而真菌和放线菌气溶胶粒子的中

值直径增加.

2.4 兰州市春季空气环境细菌群落结构

2.4.1 细菌群落丰富度及 α -多样性分析

利用高通量测序技术, 经序列过滤和去除嵌合体后, 获得的优质序列数、OTUs 数量和 α -多样性指数见表 1. 通过对兰州市春季空气环境中细菌 16S rRNA 基因的 V4-V5 区进行测序, 在 97% 的相似水平上, 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段共获得 1041 个和 1120 个 OTUs. 通过 Mothur 软件计算不同采样时段的 α -多样性指数. Observed species、Chao1 和 ACE 指数表示群落中含有的 OTUs 数量和丰富度, 数值越大, 样品群落丰富度越高. Shannon 和 Simpson 衡量群落多样性, 指数值越高, 样品群落多样性越高. 经比较发现, 08:00 ~ 09:00 时段空气环境中细菌群落的丰富度和多样性低于 18:00 ~ 19:00 时段 ($P > 0.05$).

表 1 细菌 16S rRNA 基因序列数、丰富度和多样性指数

Table 1 Sequence number of 16S rRNA gene, richness, and diversity index of bacteria

采样时间	优质序列	物种丰富度和 α -多样性指数					
		OTUs	Observed species 指数	Chao1 指数	ACE 指数	Simpson 指数	Shannon 指数
08:00 ~ 09:00	31 687	1 041	544 ± 63	615 ± 60	508.01 ± 104	0.9450 ± 0.007	5.234 ± 0.166
18:00 ~ 19:00	33 117	1 120	593 ± 72	677 ± 68	570.09 ± 143	0.9460 ± 0.006	5.328 ± 0.182

2.4.2 细菌群落结构组成

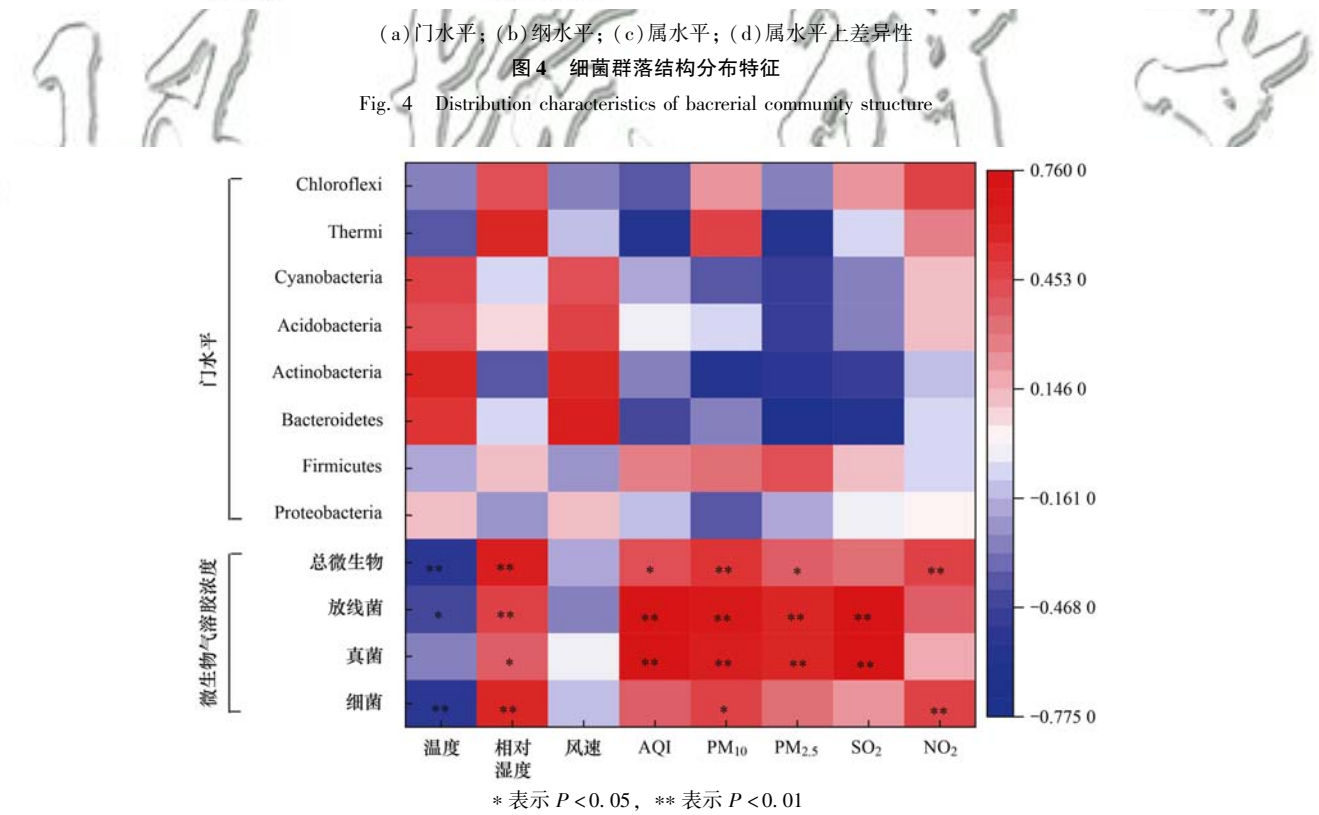
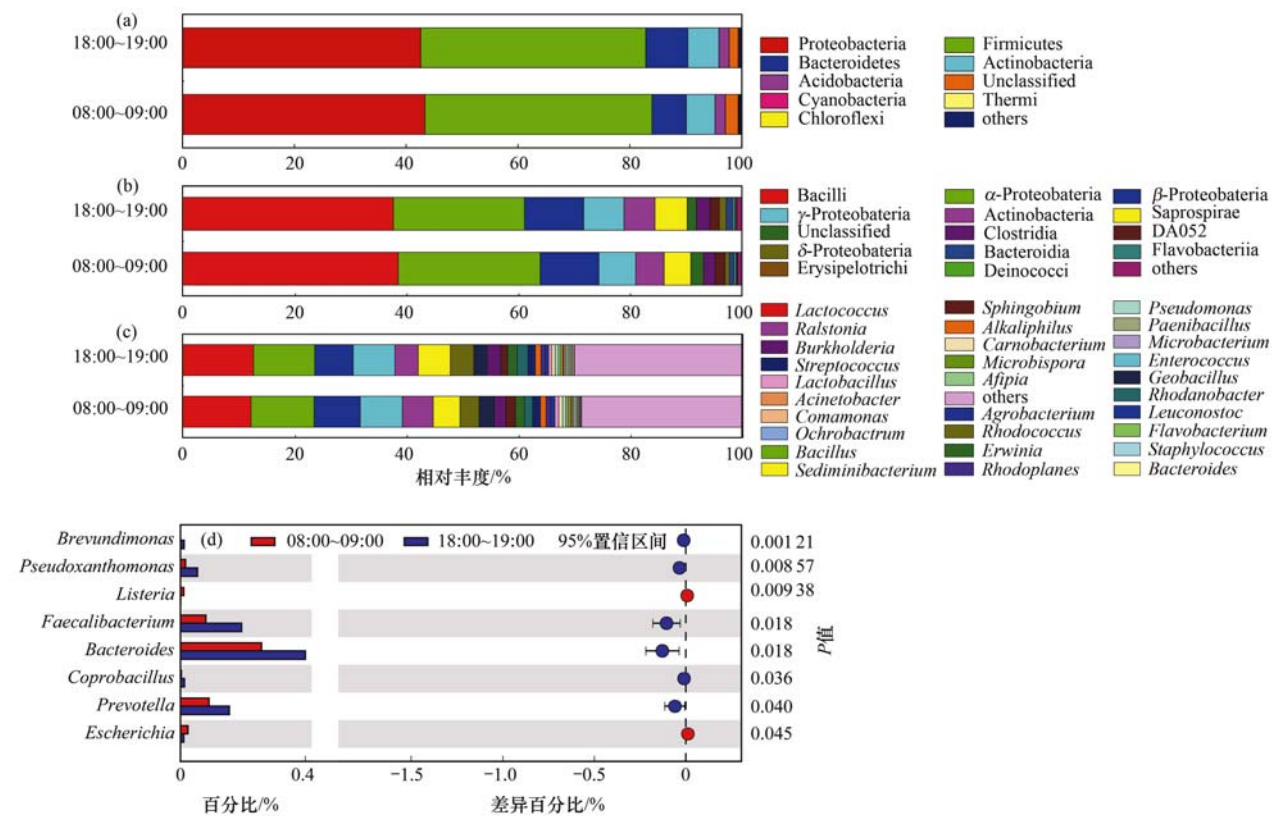
兰州市春季空气样品中细菌群落组成见图 4. ANOSIM 分析表明, 兰州市春季 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段空气环境中细菌群落结构差异不显著 ($R = 0.222$, $P > 0.05$). 在 97% 的相似水平上, 兰州市春季 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段空气环境中分别有 97.69% 和 98.41% 的 OTU 被注释为古菌和细菌. 古菌分布于泉古菌门 (Crenarchaeota, 0.007% ~ 0.01%) 和广古菌门 (Euryarchaeota, 0.05% ~ 0.10%).

从门水平来看[图 4(a)], 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段分别有 97.60% 和 98.36% 的细菌被注释到 24 个门和 22 个门, 相对丰度 $\geq 1\%$ 的分别为变形菌门 (Proteobacteria, 42.60% ~ 43.35%)、厚壁菌门 (Firmicutes, 40.27% ~ 40.63%)、拟杆菌门 (Bacteroidetes, 6.12% ~ 7.49%)、放线菌门 (Actinobacteria, 5.15% ~ 5.59%) 和酸杆菌门 (Acidobacteria, 1.84%), 其中变形菌门和厚壁菌门为优势菌. 从纲水平来看[图 4(b)], 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段细菌分别被注释到 58 个纲和 52 个纲, 芽孢杆菌纲 (Bacilli, 37.56% ~ 38.41%) 和 α -变形杆菌纲 (α -Proteobacteria, 23.46% ~ 25.41%) 为优势菌. 18:00 ~ 19:00 时段 α -变形杆菌纲的相对丰度减少了 1.95%, 而 γ -变形菌纲 (γ -

Proteobacteria)、 δ -变形菌纲 (δ -Proteobacteria)、Saprospirae 纲和拟杆菌纲 (Bacteroidia) 的相对丰度增加. 从属水平上来看[图 4(c)], 乳球菌属 (*Lactococcus*, 12.08% ~ 12.55%) 和芽孢杆菌属 (*Bacillus*, 10.93% ~ 11.29%) 为优势菌属, 土壤杆菌属 (*Agrobacterium*)、肠球菌属 (*Enterococcus*)、罗尔斯通菌属 (*Ralstonia*)、地芽孢杆菌属 (*Geobacillus*)、罗河杆菌属 (*Rhodanobacter*)、伯克氏菌属 (*Burkholderia*)、欧文氏菌属 (*Erwinia*) 和链球菌属 (*Streptococcus*) 等的相对丰度 $\geq 1.00\%$. 利用 STAMP 软件 (v2.1.3) 对空气环境中细菌群落结构在属水平上进行差异性分析[图 4(d)], 发现短波单胞菌属 (*Brevundimonas*)、假黄单胞菌属 (*Pseudoxanthomonas*)、埃希氏菌属 (*Escherichia*)、*Brevundimonas* 属、粪芽孢杆菌属 (*Coprobacillus*)、*Faecalibacterium* 属、李斯特菌属 (*Listeria*) 和普氏菌属 (*Prevotella*) 等在 08:00 ~ 09:00 和 18:00 ~ 19:00 时段存在显著性差异 ($P < 0.05$).

2.5 气象条件和空气污染物与微生物气溶胶分布的相关性

从图 5 可以看出, 兰州市春季气象条件和污染物 (PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2) 对微生物气溶胶浓度变化的影响较为显著. 细菌、真菌、放线菌和总微生物气溶胶浓度与温度和风速呈负相关, 与相对湿度



呈显著正相关. 空气环境中各种污染物为微生物的附着和生长繁殖提供有利条件, 与微生物气溶胶浓度变化呈现正相关. 从门水平来看, 气象条件和空气污染物与细菌群落结构组成未呈现显著相关性 ($P > 0.05$). 变形菌门的相对丰度为 42.60% ~

43.35%, 均值为 42.97%, 与温度、风速和 NO_2 呈正相关, 与相对湿度、AQI、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 呈负相关. 厚壁菌门的相对丰度为 40.27% ~ 40.63%, 均值为 40.45%, 与温度、风速和 NO_2 呈负相关, 与相对湿度、AQI、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 呈正相关. 放线菌

门、拟杆菌门和酸杆菌门等与温度和风速呈正相关。

2.6 功能预测分析

为了进一步探索不同时段空气环境中细菌功能变化情况,利用 PICRUST 软件进行菌群预测分析(图6)。通过 KEGG(Kyoto encyclopedia of genes and genomes)数据库对比,样品共注释了6大类功能,分别为新陈代谢、遗传信息加工、环境信息加工、细胞过程、人类疾病和未分类功能,新陈代谢、环境信息加工和未分类功能相对丰度较高,约占 50.28%、15.71%和 13.79%。在二级功能水平上,共获得 41 个子功能,可引发的疾病包括癌症(cancers, 0.147%~0.180%)、心血管疾病(cardiovascular diseases, 0.026%~0.036%)、免疫系统疾病(immune system diseases, 0.040%~0.045%)、感染疾病(infectious diseases, 0.423%~0.438%)、代谢性疾病(metabolic diseases, 0.080%~0.082%) and 神经退行性疾病(neurodegenerative diseases, 0.347%

~0.398%),表明兰州市春季空气环境中存在致病菌或条件致病菌,这些潜在病原菌通过呼吸作用进入上呼吸道、支气管和肺部等部位,严重影响人类健康。

3 讨论

3.1 大气微生物气溶胶分布特性

微生物气溶胶具有重要的生态功能,也是影响空气质量和人类健康的主要因素。本实验结果表明兰州市春季细菌气溶胶浓度均值为 $2\,243\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$,占微生物气溶胶的 82.16%,明显高于真菌和放线菌($P<0.05$)。孙荣高等^[28]、陈浩文^[29]和巨天珍等^[30]的研究发现兰州市细菌气溶胶浓度均值分别为 $15\,063$ 、 $18\,785$ 和 $24\,591\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$,总微生物气溶胶浓度均值分别为 $17\,709$ 、 $19\,244$ 和 $26\,300\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$,其结果明显高于本实验的研究结果,这与近年来兰州市大气污染治理密不可分,空气质量持续改善,空气中污染物和微生物气溶胶浓度显著降低。姜金融^[23]和陈锬等^[31]的研究发现兰州市城区细菌的浓度均值分别为 $916\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $942\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$,明显低于本实验结果,表明采样方式相同的情况下,二者之间的差异可能与采样时的气象条件、采样地点和空气质量等因素有关。与南京、西安、泰州、杭州和青岛等城市相比^[21,26,32~35],兰州市春季总微生物和细菌浓度偏高,真菌浓度偏低,这可能与采样地区的气象条件、城市绿化、空气污染状况和人类活动等多种因素相关^[13,21],兰州城区早晚人群活动频繁,近地面大量土壤颗粒和灰尘易进入空气,颗粒物的增加导致微生物气溶胶浓度升高,低风速也不利于颗粒物和微生物气溶胶粒子的扩散和沉降。同时,春季降雨量少,空气相对湿度较低,植物覆盖率小,不利于真菌孢子的释放和生长繁殖^[33,36]。

兰州市春季微生物气溶胶粒径呈偏态分布,细菌和真菌气溶胶粒子在前 4 级($>2.1\text{ }\mu\text{m}$)分别占 85.13%和 83.26%,而放线菌在后 4 级($<4.7\text{ }\mu\text{m}$)占 73.15%。细菌、真菌和放线菌气溶胶粒子的中值直径约为 $4.62\sim4.79$ 、 $3.88\sim4.12$ 和 $2.75\sim3.3\text{ }\mu\text{m}$ 。研究发现西安市晴天时细菌和真菌气溶胶粒子中值直径分别为 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.72\text{ }\mu\text{m}$ ^[26],青岛市春季细菌和真菌气溶胶粒子中值直径分别为 $4.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ ^[35],杭州市细菌和真菌气溶胶粒子的中值直径分别为 $3.60\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.93\text{ }\mu\text{m}$ ^[37],北京市细菌、真菌和放线菌气溶胶粒子的中值直径分别为 2.5 、 2.0 和 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ ^[38]。总体来说,其他城市微生物气溶胶粒子的中值直径低于本实验结果。结合相关资料,认为兰州市春季细菌、真菌和放线菌在空气环

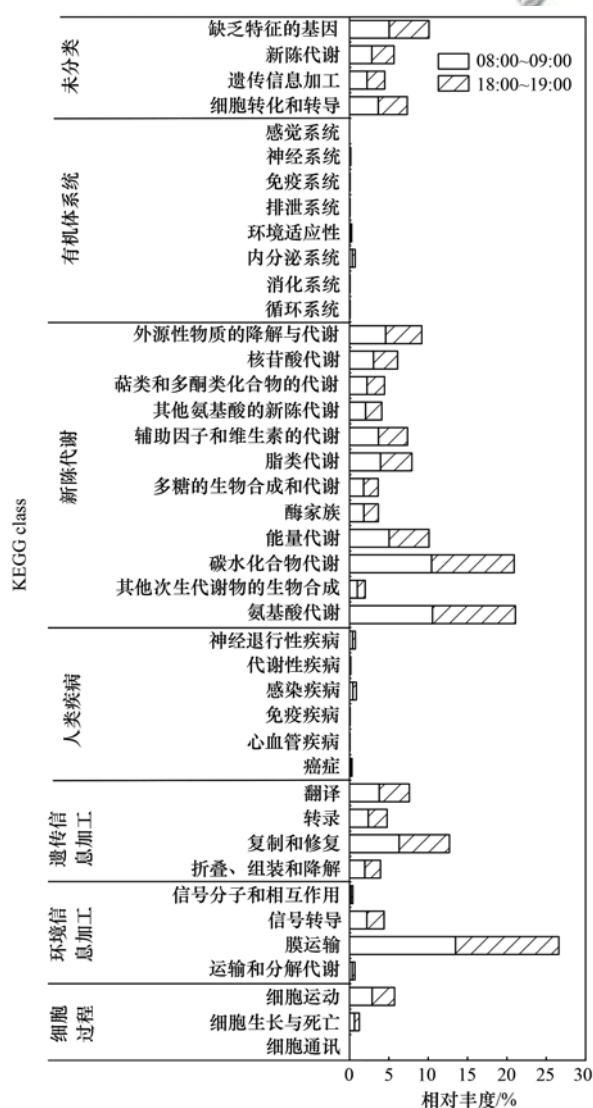


图6 细菌群落 PICRUST 功能基因预测

Fig. 6 PICRUST functional gene prediction of bacterial community

境中的存在形式明显不同,细菌主要附着在花粉和灰尘等颗粒物表面,形成粒径更大的气溶胶粒子以抵抗外在环境的不利影响,而真菌和放线菌主要以孢子的形式存在于空气中^[25,38]。

3.2 细菌群落结构及多样性

环境中可培养微生物数量占总微生物的 0.1%~10%。空气中微生物来源与组成复杂,传统分离纯化培养技术大大限制了人们对空气微生物群落结构及其潜在致病危害的了解。利用高通量测序技术分析空气微生物群落组成,对全面理解微生物的分布特性及其对人类健康的影响具有重要意义^[39,40]。由于受来源和其他环境因子的影响,不同地区空气环境中细菌群落结构和优势菌的组成存在一定差异。本研究采用高通量技术对兰州市空气中细菌群落结构进行研究,ANOSIM 分析结果表明兰州市春季空气环境中不同时段细菌群落组成差异不显著($P > 0.05$),其原因在于:一方面与微生物气溶胶的来源有关。08:00~09:00 和 18:00~19:00 时段属于上下班高峰期,人员和车辆的流动性较大,容易使地面上的灰尘和微生物释放至空气中。另一方面与兰州市独特的地理位置和气象条件有关。兰州市城区四面环山,采样期间风速介于 $0 \sim 2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,均值为 $0.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速较低,空气流动性差,不利于灰尘和微生物粒子的扩散和沉降,短期内空气环境中细菌群落结构较为稳定。变形菌门为空气环境中的优势菌,其中土壤杆菌属(7.56%)相对丰度较高,主要来源于根际土壤,可引起植物根部感染形成根瘤。厚壁菌门的相对丰度仅次于变形菌门,其中乳球菌属和芽孢杆菌属是兰州、西安、济南和桂林等城市空气环境中的优势菌^[39,41,42],但桂林市的芽孢杆菌属(30.8%)和乳球菌属(15.5%)相对丰度明显高于其他地区。乳球菌主要来源于土壤、乳制品和人体标本,有些菌株能在低温环境中生长,东北寒冷地区空气环境中乳球菌属的相对丰度高达 20.44%^[20];芽孢杆菌属是一类能产生芽孢的革兰氏阳性菌,广泛分布于土壤、水体和空气等环境中,该菌对兰州市春季降雨稀少、早晚温差大和营养缺乏的环境条件具有极强的抵抗力。拟杆菌门中的黄杆菌属(0.42%)为革兰氏阴性菌,主要存在于土壤和水体中。

3.3 微生物气溶胶分布与气象条件和污染物的相关性

由于受各种气象条件和空气污染物的影响,不同城市微生物气溶胶浓度和群落结构分布存在差异。宫静等^[34]的研究认为空气中污染物浓度对微生物气溶胶分布的影响强于气象因素,而 Zhen 等^[43]

的研究结论正好相反,认为气象因素对微生物的分布比空气污染物的影响更大。Li 等^[44]的研究发现颗粒物和相对湿度是影响细菌气溶胶浓度和群落结构的关键因素。本实验结果表明,兰州市春季气象条件和空气污染物对微生物气溶胶浓度变化影响显著,08:00~09:00 时段相对湿度和空气污染物浓度高于 18:00~19:00 时段,为微生物生长繁殖提供更多的营养物质,颗粒物也为微生物附着提供了场所^[45]。18:00~19:00 时段风速增加,空气流动性增强,有利于颗粒物和微生物气溶胶的扩散。同时,外界环境温度升高,相对湿度降低,紫外线照射强度增加等气象条件的变化不利于微生物生长繁殖^[46],导致 18:00~19:00 时段微生物气溶胶浓度低于 08:00~09:00 时段。从门水平来看,气象条件和空气污染物对细菌落结构组成影响较弱($P > 0.05$)。结合相关资料,发现气象条件和空气污染物对微生物浓度和群落结构的影响较为复杂,由于本实验缺乏其他季节的相关数值,无法准确评估二者对空气环境中微生物分布的影响,有待进一步深入研究。

3.4 春季空气微生物污染状况与健康风险评估

微生物气溶胶对人体健康的影响与气溶胶浓度、粒径和微生物组成等特性密切相关^[14]。目前对室外空气环境中微生物气溶胶浓度限值缺乏统一标准,依据文献[23,47],兰州市春季细菌气溶胶浓度 $< 2\,500 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,总微生物浓度 $< 3\,000 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,低于标准限值,空气环境中微生物气溶胶的污染程度为较清洁等级。

不同粒径微生物气溶胶粒子进入呼吸系统的部位不同,对人体健康的影响明显不同。研究发现空气动力学直径小于 $4.7 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子可吸入人体气管、支气管和肺部等部位,对人体健康的危害更大^[48]。08:00~09:00 时段粒径 $< 4.7 \mu\text{m}$ 的细菌、真菌和放线菌气溶胶粒子分别为 48.69%、63.79% 和 79.63%。18:00~19:00 时段粒径 $< 4.7 \mu\text{m}$ 的细菌、真菌和放线菌气溶胶粒子分别为 51.11%、59.75% 和 66.67%,表明可吸入到气管、支气管和肺部的放线菌气溶胶粒子高于细菌和真菌,过度摄入会增加呼吸道和肺部疾病的发病率。

前期大量研究发现,空气中还存在少量致病菌或条件致病菌,对人类或其他生物的健康造成严重影响^[4,49,50]。根据高通量测序结果,发现兰州市春季空气环境中也存在潜在致病菌,如肠球菌属(*Enterococcus*, 7.49%)和葡萄球菌属(*Staphylococcus*, 0.31%)是革兰氏阳性菌,假单胞菌属(*Pseudomonas*, 0.57%)是革兰氏阴性菌,这 3 个属的部分菌株具有致病性,是引起医院手术感染

的重要病原菌^[49,51,52]；不动杆菌属(*Acinetobacter*, 0.4%)属于革兰氏阴性的条件致病菌,分布于水体、土壤和人体样本中,当机体免疫力低下时,易造成呼吸道、泌尿系统等部位感染；克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)属于条件致病菌,能引起呼吸道和肺部等感染^[16,49]。欧文氏菌属(*Erwinia*)是一种寄生于植物并引起腐败病的革兰氏阴性菌；蜡样芽胞杆菌(*Bacillus cereus*, 10.38%)能引起慢性皮肤感染和角膜炎^[53]。无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*, 0.76%)是条件致病菌,易引起免疫力低下者和孕妇感染^[51]。产气荚膜梭菌(*Clostridium perfringens*, 0.07%)为革兰氏阴性菌,会引起食物中毒和气性坏疽。这一测序鉴定结果与功能预测结果保持一致,空气环境中存在的致病菌或条件致病菌使患呼吸道、泌尿道和肺部等疾病的几率增加。

4 结论

(1)兰州市春季总微生物、细菌、真菌和放线菌气溶胶浓度均值分别为($2\,730 \pm 376$)、($2\,243 \pm 354$)、(349 ± 38)和(138 ± 22) CFU·m⁻³,处于较清洁水平。空气环境中细菌气溶胶浓度明显高于真菌和放线菌($P < 0.05$)。08:00~09:00时段总微生物、细菌和放线菌气溶胶浓度明显高于18:00~19:00。

(2)细菌、真菌和放线菌在空气环境中存在形式和粒径分布明显不同,细菌与颗粒物结合形成更大的气溶胶粒子,而真菌和放线菌主要以单孢子形式存在。细菌和真菌气溶胶粒子主要分布在前4级($> 2.1\ \mu\text{m}$),放线菌主要集中在后4级($< 4.7\ \mu\text{m}$)上。可吸入气管、支气管和肺部的放线菌气溶胶粒子高于细菌和真菌。

(3)兰州市春季空气环境中乳球菌属(*Lactococcus*)和芽胞杆菌属(*Bacillus*)为优势菌属。08:00~09:00和18:00~19:00时段细菌群落结构差异不显著($P > 0.05$)。

(4)气象条件和空气污染物对微生物气溶胶浓度影响显著,对细菌群落结构及多样性的影响较小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Yao M S. Bioaerosol: a bridge and opportunity for many scientific research fields[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **115**: 108-112.
- [3] 王莹, 韩云平, 李琳. 卫生填埋场微生物气溶胶的逸散及潜在风险[J]. *微生物学通报*, 2020, **47**(1): 222-233.
Wang Y, Han Y P, Li L. Emission and potential risks of bioaerosols in sanitary landfill[J]. *Microbiology China*, 2020, **47**(1): 222-233.
- [4] Kim K H, Kabir E, Jahan S A. Airborne bioaerosols and their impact on human health[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **67**: 23-35.
- [5] Du P R, Du R, Ren W S, *et al.* Seasonal variation characteristic of inhalable microbial communities in PM_{2.5} in Beijing city, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 308-315.
- [6] 谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 等. 西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2044-2049.
Xie W W, Lu R, Mu F F, *et al.* Characteristics and Sources of microbial aerosols in urban and mountainous areas in autumn and winter in Xi'an, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2044-2049.
- [7] Yoo K, Lee T K, Choi E J, *et al.* Molecular approaches for the detection and monitoring of microbial communities in bioaerosols: a review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **51**: 234-247.
- [8] Li Y, Huang X, Yu I T S, *et al.* Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong[J]. *Indoor Air*, 2005, **15**(2): 83-95.
- [9] Pyankov O V, Bodnev S A, Pyankova O G, *et al.* Survival of aerosolized coronavirus in the ambient air[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **115**: 158-163.
- [10] Wang J, Du G Q. COVID-19 may transmit through aerosol[J]. *Irish Journal of Medical Science*, 2020, **189**(4): 1143-1144.
- [11] 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.
- [12] 方治国, 欧阳志云, 刘芃, 等. 北京市居家空气微生物污染特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(4): 1166-1172.
Fang Z G, Ouyang Z Y, Liu P, *et al.* Characteristics of airborne microbial pollution in indoor environments in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(4): 1166-1172.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Dong S R, Han Y J, Wu J, *et al.* Distribution of microbiota in fine particulate matter particles in Guangzhou, China[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 306-314.
- [16] 李彦鹏, 刘鹏霞, 谢铮胜, 等. 霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展[J]. *科学通报*, 2018, **63**(10): 940-953.
Li Y P, Liu P X, Xie Z S, *et al.* Recent research progress and perspective of characteristics of ambient bioaerosols during hazy pollution in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(10): 940-953.
- [17] Du P R, Du R, Ren W S, *et al.* Variations of bacteria and fungi in PM_{2.5} in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **172**: 55-64.
- [18] Uetake J, Tobo Y, Uji Y, *et al.* Seasonal changes of airborne bacterial communities over Tokyo and influence of local meteorology[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.01572.

- [19] 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.
- [20] Sun X Z, Li D M, Li B, *et al.* Exploring the disparity of inhalable bacterial communities and antibiotic resistance genes between hazy days and non-hazy days in a cold megacity in Northeast China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122984.
- [21] 曲浩丽, 赵娟, 肖永良, 等. 南京市春季不同功能区大气微生物群落结构及多样性分析[J]. *中国农学通报*, 2016, **32** (32): 174-181.
Qu H L, Zhao J, Xiao Y L, *et al.* Community structure and diversity of airborne microbes: different functional regions in spring of Nanjing [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(32): 174-181.
- [22] 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.
- [23] 姜金融. 兰州市不同功能区空气中微生物浓度分布特征及其多样性[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
Jiang J R. The characteristics of concentration distribution and the diversity of airborne microbes at different functional regions in Lanzhou city [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [24] 王亚男. 兰州市大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
Wang Y N. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [25] 赵炜, 孙强, 李杰, 等. 医院环境微生物气溶胶分布特性与健康风险评价[J]. *兰州交通大学学报*, 2019, **38** (4): 83-90, 104.
Zhao W, Sun Q, Li J, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of microbial aerosol in hospital environment [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2019, **38** (4): 83-90, 104.
- [26] 路瑞, 李婉欣, 宋颖, 等. 西安市不同天气下可培养微生物气溶胶浓度变化特征[J]. *环境科学研究*, 2017, **30** (7): 1012-1019.
Lu R, Li W X, Song Y, *et al.* Characteristics of culturable bioaerosols in various weather in Xi'an city, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30** (7): 1012-1019.
- [27] Wu D M, Zhang Y, Tian Y, *et al.* On-site investigation of the concentration and size distribution characteristics of airborne fungi in a university library [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114138.
- [28] 孙荣高, 谭东南, 张丽华, 等. 兰州城区大气微生物数量及动态变化规律的研究[J]. *甘肃环境研究与监测*, 1994, **7** (8): 2-6.
- [29] 陈浩文. 空气微生物粒子沉降量指示兰州空气质量[J]. *内蒙古环境保护*, 1998, **10** (2): 11-13.
Chen H W. Lanzhou air quality to be indicated by the particle subsiding volume of air microorganism [J]. *Inner Mongolia Environmental Protection*, 1998, **10** (2): 11-13.
- [30] 巨天珍, 索安宁, 田玉军, 等. 兰州市空气微生物分析[J]. *工业安全与环保*, 2003, **29** (3): 17-19.
Ju T Z, Suo A N, Tian Y J, *et al.* Analysis on aerobiologia in Lanzhou [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2003, **29** (3): 17-19.
- [31] 陈锴, 许淑青, 万东, 等. 兰州市城关区大气微生物气溶胶污染状况调查与评价[J]. *上海环境科学*, 2017, **36** (5): 211-216, 221.
Chen E, Xu S Q, Wan D, *et al.* Investigation and assessment on the status of atmospheric microbial aerosol pollution in Chengguan district of Lanzhou city [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2017, **36** (5): 211-216, 221.
- [32] 朱希希, 吴莹, 王磊, 等. 泰州市不同功能区空气微生物浓度时间分布特征研究[J]. *污染防治技术*, 2018, **31** (6): 86-89.
Zhu X X, Wu Y, Wang L, *et al.* Study on temporal distribution of air microbial concentration in different functional areas of Taizhou [J]. *Pollution Control Technology*, 2018, **31** (6): 86-89.
- [33] 方治国, 黄闯, 楼秀芹, 等. 南方典型旅游城市空气微生物特征研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37** (8): 2840-2847.
Fang Z G, Huang C, Lou X Q, *et al.* Characteristics of airborne microbes in typical tourist city in southeast China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (8): 2840-2847.
- [34] 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.
- [35] 宋志文, 王琳, 任杰, 等. 青岛市区春、夏季生物气溶胶浓度分布及特征[J]. *青岛理工大学学报*, 2014, **35** (3): 1-6, 23.
Song Z W, Wang L, Ren J, *et al.* Concentration distribution and characteristics of airborne microbes in spring and summer in Qingdao [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2014, **35** (3): 1-6, 23.
- [36] 楼秀芹, 郭卫俊, 姚文冲, 等. 杭州市西湖景区春季空气细菌多样性特征[J]. *生态学报*, 2019, **39** (8): 2946-2953.
Lou X Q, Guo W J, Yao W C, *et al.* Diversity of airborne bacterial community in spring in the West Lake scenic areas of Hangzhou, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39** (8): 2946-2953.
- [37] 姚文冲, 楼秀芹, 方治国, 等. 南方典型旅游城市空气微生物粒径分布特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36** (10): 2938-2943.
Yao W C, Lou X Q, Fang Z G, *et al.* The size distribution of airborne microbes in typical tourist city in southeast China [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (10): 2938-2943.
- [38] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市三个功能区空气中微生物中值直径及粒径分布特征[J]. *生态学报*, 2005, **25** (12): 3220-3224.
Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Study on median diameters and size distributions of airborne microbes in three functional regions in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25** (12): 3220-3224.
- [39] Lu R, Li Y P, Li W X, *et al.* Bacterial community structure in atmospheric particulate matters of different sizes during the haze days in Xi'an, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 244-252.
- [40] Yu R L, Wang S K, Wu X L, *et al.* Community structure variation associated with airborne particulate matter at central south of China during hazy and nonhazy days [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10** (5): 1536-1542.
- [41] 许彩红. 山东省济南市与泰山生物气溶胶多样性研究[D].

- 济南: 山东大学, 2017.
- Xu C H. Study on diverse microbial communities at Ji'nan city and Mt. Tai, Shandong, China [D]. Ji'nan: Shandong University, 2017.
- [42] Zhong S, Zhang L S, Jiang X Y, *et al.* Comparison of chemical composition and airborne bacterial community structure in PM_{2.5} during haze and non-haze days in the winter in Guilin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 202-210.
- [43] 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.
- [44] Li W L, Yang J S, Zhang D Z, *et al.* Concentration and community of airborne bacteria in response to cyclical haze events during the fall and midwinter in Beijing, China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.01741.
- [45] Wei M, Xu C H, Xu X M, *et al.* Characteristics of atmospheric bacterial and fungal communities in PM_{2.5} following biomass burning disturbance in a rural area of North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2727-2739.
- [46] Soleimani Z, Teymouri P, Boloorani A D, *et al.* An overview of bioaerosol load and health impacts associated with dust storms: a focus on the Middle East [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117187.
- [47] 余叔文. 大气污染生物监测方法 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1993.
- [48] Pastuszka J S, Paw U K T, Lis D O, *et al.* Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(22): 3833-3842.
- [49] 薛林贵, 姜金融, Erhunmwunsee F. 城市空气微生物的监测及研究进展 [J]. *环境工程*, 2017, **35**(3): 152-157, 162.
- Xue L G, Jiang J R, Erhunmwunsee F. Progress in research and monitoring of urban airborne microbes [J]. *Environmental Engineering*, 2017, **35**(3): 152-157, 162.
- [50] 甄泉, 方治国, 王雅晴, 等. 雾霾空气中细菌特征及对健康的潜在影响 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(6): 2244-2254.
- Zhen Q, Fang Z G, Wang Y Q, *et al.* Bacterial characteristics in atmospheric haze and potential impacts on human health [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(6): 2244-2254.
- [51] Klevens R M, Morrison M A, Nadle J, *et al.* Invasive methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infections in the United States [J]. *Journal of the American Medical Association*, 2007, **298**(15): 1763-1771.
- [52] Sui S J H, Lo R, Fernandes A R, *et al.* Raloxifene attenuates *Pseudomonas aeruginosa* pyocyanin production and virulence [J]. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2012, **40**(3): 246-251.
- [53] Kotiranta A, Lounatmaa K, Haapasalo M. Epidemiology and pathogenesis of *Bacillus cereus* infections [J]. *Microbes and Infection*, 2000, **2**(2): 189-198.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)