

DOI: 10.5846/stxb201803130494

甄泉,方治国,王雅晴,欧阳志云.雾霾空气中细菌特征及对健康的潜在影响.生态学报,2019,39(6): - .

Zhen Q, Fang Z G, Wang Y Q, Ouyang Z Y. Bacterial characteristics in atmospheric haze and potential impacts on human health. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

雾霾空气中细菌特征及对健康的潜在影响

甄 泉^{1,2,3}, 方治国⁴, 王雅晴^{1,2}, 欧阳志云^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 蚌埠医学院 公共卫生学院, 蚌埠 233030

4 浙江工商大学 环境科学与工程学院, 杭州 310018

摘要:论文从群落结构、浓度变化及粒径分布的角度论述了雾霾天气对空气细菌特征的影响,并结合了雾霾天气相关疾病的发病率,综合评价了雾霾天气空气病原菌导致的人群潜在健康风险的变化,最后提出了以前研究存在的不足及未来的发展趋势。综合研究结果,雾霾天气对空气细菌群落结构、浓度变化及粒径分布的影响,研究人员在不同城市得出的研究结果不同,可能由样点的时空环境、气象因素、雾霾程度及采集、检验、鉴定空气细菌方法等多种因素的差异引起。雾霾空气中已发现病原细菌均为条件致病菌,在空气中含量很低,但雾霾天气下部分病原菌的相对丰度增加,致病力会显著增强。此外,高浓度的细颗粒物和化学污染物可损伤皮肤黏膜屏障,打破呼吸道和皮肤的微生态平衡,为病原菌侵入创造较好的机会。两者的协同作用,显著增加了雾霾天气空气中病原菌的健康风险。

关键词:雾霾;空气细菌;群落结构;病原细菌;健康风险

Bacterial characteristics in atmospheric haze and potential impacts on human health

ZHEN Quan^{1,2,3}, FANG Zhiguo⁴, WANG Yaqing^{1,2}, OUYANG Zhiyun^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Public Health, Bengbu Medical College, Bengbu 233030, China

4 School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: This study explored the impacts of atmospheric haze on airborne bacteria in terms of bacterial community structure, as well as concentrations and size distributions. We evaluated changes in the potential risks to human health caused by airborne pathogens, based on the morbidity of atmospheric haze-related diseases. Finally, we addressed the shortcomings of previous studies and proposed future trends for related research. The dynamics of bacterial community structure, and concentration and size distribution of bacterial communities in atmospheric haze—on which domestic studies have focused—have not shown consistent patterns to date. These uncertainties may be influenced by collection and detection methods, spatial and temporal disparities, meteorological factors, haze levels, etc. Pathogenic bacteria found on hazy days were opportunistic pathogens with low concentrations. However, the relative abundance and virulence of some bacterial species could significantly increase under hazy conditions. In addition, the high concentration of fine particulate matter with

基金项目:国家自然科学基金重点项目(71533005);浙江省自然科学基金项目(LY17D050006)

收稿日期:2018-03-13; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

chemical pollutants could damage the skin or the mucous membrane barrier, break the micro-ecological balance of the respiratory tract and skin, and create opportunities for pathogen invasion. The synergistic effects of particulate matter and chemical pollutants have significantly contributed to the health risks from pathogenic bacteria in atmospheric haze.

Key Words: haze; airborne bacteria; community structure; pathogenic bacteria; health risks

微生物气溶胶是指悬浮于空气中的细菌、真菌、病毒以及它们的副产物等所形成的胶体体系^[1]。细菌是微生物气溶胶的重要组成部分,在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的生物组分中,其相对百分比可达 80% 以上^[2-3]。空气中的细菌主要来源于自然界的土壤、水体、动植物以及人类的工农业活动等^[4],其在维持生态平衡和调节气候变化中起着重要的作用^[5]。然而,空气中存在的病原菌可通过呼吸道或破损皮肤进入人体,对人类健康造成严重的危害。气传嗜肺军团菌(*Legionella pneumophila*)曾多次导致军团菌病在人群中的暴发流行^[6],气传金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)等机会致病菌可引发破损皮肤和局部组织甚至全身范围的感染^[7-8]。因此,研究空气细菌特征及动态变化规律,对控制和减少气传疾病,维护人类健康有着重要的理论和实际意义。

近年来,以高浓度细颗粒物(PM_{2.5})污染为主要特征的雾霾天气已成为我国环境保护的焦点问题。雾霾天气下空气流动慢,较差的扩散条件导致空气中细颗粒物等污染物迅速积累,并且导致空气湿度增高、能见度降低和太阳辐射强度减弱。气象条件和颗粒物理化性状的改变可能对空气细菌特征产生影响^[2, 4, 9-13],因此,雾霾空气中细菌特征可能会发生显著变化,其潜在的健康风险需重新评估。论文从群落结构、浓度变化及粒径分布的角度,探讨了雾霾天气对空气细菌特征的可能影响,并结合了雾霾天气相关疾病的发病率,综合评价了雾霾天气空气病原菌导致的人群潜在健康风险的变化,最后提出了以前研究存在的不足及未来的发展趋势。

1 雾霾天气对空气细菌特征的影响

1.1 对细菌群落结构的影响

雾霾空气中可培养的优势细菌属主要有微球菌属(*Micrococcus*)^[2, 14-16],芽孢杆菌属(*Bacillus*)^[17-18],假单胞菌属(*Pseudomonas*)^[18-20],葡萄球菌属(*Staphylococcus*)^[14-16],不动杆菌属(*Acinetobacter*)^[19, 21],乳酸球菌(*Lactococcus*)^[18, 20],等(表 1)。

雾霾天气对空气细菌群落结构是否产生影响,目前的研究尚存争议,不同科研人员获得的研究结果不同。西安市雾霾空气中可培养细菌奈瑟氏菌属(*Neisseria*)的相对丰度升高,葡萄球菌属(*Staphylococcus*),微球菌属(*Micrococcus*)浓度降低^[14-16];青岛市空气细菌 DGGE 检测发现,两种天气下凝胶电泳条带的位置和亮度明显不同^[19, 21];重度雾霾天气空气中变形菌门(Proteobacteria)相对丰度增加到 88.9%(非雾霾天为 34.9%),厚壁菌门(Firmicutes)相对丰度减少到 3.9%(非雾霾天为 24.3%)^[3],这些研究表明雾霾空气中细菌组成和群落结构发生了显著变化。然而,北京^[11, 20]和济南^[18]等地利用高通量测序研究雾霾和非雾霾空气细菌的变化却得到相反的结果。济南市空气中的优势细菌属为乳酸球菌属(*Lactococcus*),芽孢杆菌属(*Bacillus*),假单胞菌属(*Pseudomonas*),嗜冷杆菌属(*Psychrobacter*)^[18],北京市的优势细菌属为乳酸球菌属(*Lactococcus*),假单胞菌属(*Pseudomonas*),明串珠菌属(*Leuconostoc*)^[20],这些菌属的相对丰度在雾霾和非雾霾天气中没有发生明显改变。

雾霾天气不能改变北京市^[20]、济南市^[18]空气细菌组成和群落结构,表明雾霾环境对空气细菌影响较小;而西安^[19, 21]、青岛市^[3]的调查均显示雾霾天气下空气细菌的优势物种及其相对丰度反生改变,体现不同细菌类群对雾霾特殊环境适应性差异。西安市雾霾空气中细菌种类增多,Shannon 指数增高,可能是较高的空气湿度及颗粒物中营养物质有利于微生物生存和繁殖所致^[19, 21];而青岛市由非雾霾天到重度雾霾天的发展过

程中,OTU 数目, chao1、Shannon、Simpson 指数不断下降,表明大量细菌类群因不能适应雾霾环境减少或消失^[3]。

表 1 雾霾天气下空气细菌群落结构变化特征

Table 1 Dynamic characteristics of bacterial community structure in hazy atmosphere

采样及鉴定方法 Sampling and Identification Methods	优势 OTUs Abundant OTUs	结果 Results	参考文献 References
2014.10.08—2014.10.22 西安 Anderson 采样器,培养 形态观察鉴定	非雾霾(属, n=4): <i>Staphylococcus</i> , <i>Micrococcus</i> 雾霾(属, n=6): <i>Staphylococcus</i> , <i>Neisseria</i> , <i>Micrococcus</i>	物种组成和相对丰度不同	Li ^[14]
2014.10.07—2014.10.22 西安 Anderson 采样器,培养 形态观察鉴定	非雾霾(属, n=7): <i>Staphylococcus</i> , <i>Micrococcus</i> 雾霾(属, n=6): <i>Staphylococcus</i> , <i>Neisseria</i> , <i>Micrococcus</i>	物种组成和相对丰度不同	王伟 ^[15]
2013.07—2013.12 西安 Anderson 采样器,培养 形态观察鉴定	非雾霾(属, n=6): <i>Micrococcus</i> , <i>Staphylococcus</i> 雾霾(属, n=6): <i>Neisseria</i> , <i>Staphylococcus</i>	物种组成和相对丰度不同	司恒波 ^[16]
2015.01.13—2015.01.16 北京和保定,滤膜采集 PM _{2.5} , 培养后分离纯化测序	非雾霾:没有测定 雾霾(种, n=6): <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Brevibacterium frigoritolerans</i>	未知	胡亚东 ^[17]
2015.01 徐州 滤膜采集 PM _{2.5} , DGGE	非雾霾:没有测定 雾霾(门, n=1): Firmicutes, Betaproteobacteria, Chloroflexi	未知	袁兴程 ^[22]
2013.01.17、2013.01.18、2013.03.10 青岛, Anderson 采样器采集至滤膜, DGGE	非雾霾(n=1): band10, band12, band16, band18 雾霾(属, n=2): <i>Pseudomonas</i> , <i>Acinetobacter</i> , band8, band12	结构改变	武丽婧 ^[19]
2015.01.07、2015.01.15、2015.01.16 青岛, Anderson 采样器采集至滤膜, DGGE	非雾霾(属, n=1): <i>Chitinophaga</i> , <i>Sediminibacterium</i> , <i>Cloacibacterium</i> 雾霾(属, n=2): <i>Sphingomonas</i> , <i>Acinetobacter</i> , <i>Ochrotrax</i>	结构改变	邵聪聪 ^[21]
2015.01.07、2015.01.15、2015.01.16 青岛, Anderson 采样器采集至滤膜, Miseq 测序	非雾霾(属, n=1): <i>Pseudomonas</i> , <i>Veillonella</i> , <i>Sphingomonas</i> 雾霾(属, n=2): <i>Sphingomonas</i>	结构改变	马曼曼 ^[3]
2014.01.20—2014.03.31 济南 滤膜采集 PM _{0.18—0.32} , PM _{0.32—0.56} , PM _{0.56—1} , Miseq 测序	非雾霾(属, n=1): 和雾霾天气类似 雾霾(属, n=6): <i>Lactococcus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Psychrobacter</i>	结构无明显变化	Xu ^[18]
2013.12.16—2014.03.05 北京 滤膜采集 TSP, 454 测序	非雾霾(属, n=2): 和雾霾天气类似 雾霾(属, n=3): <i>Lactococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Myroides</i> , <i>Brochothrix</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Enhydrobacter</i> , <i>Psychrobacter</i>	结构无明显变化	Wei ^[20]
2015.01.05—2015.10.26 北京 滤膜采集 TSP, Hiseq 测序	非雾霾(目): Actinomycetales, Bacillales, Rhodobacterales, Burkholderiales 雾霾:无具体数据(秋季、冬季各采集 20 个样本)	结构无明显变化	Zhen ^[11]
2013.01.08—2013.01.14 北京 滤膜采集 PM _{2.5} , PM ₁₀ , 宏基因组测序	非雾霾(n=1): 与雾霾天气类似 雾霾(种, n=6): <i>Geodermatophilus obscurus</i> , <i>Modestobacter</i> <i>marinus</i> , <i>Blastococcus saxobidens</i> , <i>Kocuria rhizophila</i> , <i>Micrococcus luteus</i>	结构无明显变化	Cao ^[2]
2014.05.21—2014.07.01 北京、天津等六地 滤膜采集 PM _{2.5} , Miseq 测序	非雾霾(目, n=6): Chloroplast, Rhodobacterales, Rhodospirillales, Rhizobiales, Rickettsiales, Sphingomonadales, Burkholderiales 等 雾霾:无具体数据	未知	Gao ^[9]

1.2 对细菌浓度的影响

雾霾天气不同城市空气中可培养细菌浓度在 10^2 — 10^4 CFU/m³ (表 2), 其中, 青岛市^[23]、北京市^[24-25] 为

10^2 — 10^3 CFU/m³, 西安市^[14-16, 26-28]为 10^3 — 10^4 CFU/m³, 而使用不可培养法 DAPI 染色法^[23]和定量 PCR 法^[11, 18]测定的空气细菌浓度, 其结果均较可培养方法高出 10^3 个数量级, 达到 10^5 — 10^6 拷贝数/m³。

表 2 雾霾天气下空气细菌浓度的变化规律

Table 2 Change rules of bacterial concentration in hazy atmosphere

采样及测定方法 Sampling and Identification Methods	非雾霾天气 Non-haze	雾霾天气 Haze	结果及统计判断 Results and statistical analysis	参考文献 References
2013.01.14—2014.01.22 北京 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	细粒子: 全年 ($n=58$) 358 ± 349 秋季 ($n=11$) 379 ± 354 其他季节无具体数值	细粒子: 全年 ($n=141$) 224 ± 186 秋季 ($n=62$) 182 ± 143 其他季节无具体数值	↓(全年及各个季节空气细菌浓度与 PM _{2.5} 负相关)	Gao ^[24]
2013.01.14—2014.01.22 北京 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	1.27×10^3 — 9.22×10^2 (全年所有样本: $n=189$)	9.20×10^2 — 8.67×10^2	↓(t 检验, 相关及回归分析)	Gao ^[30]
2013.05.03—2013.07.02 北京 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	空气细菌浓度无具体数值 ($n=126$)	空气细菌浓度无具体数值 ($n=60$)	↓(相关及回归分析)	Gao ^[31]
2013.01.14—2013.07.22 北京 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	253—2792 ($n=11$)	248—926 ($n=31$)	↓(相关及回归分析)	高敏 ^[25]
2013.01.08—2013.02.04 北京 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	325 ($n=39$)	118 ($n=21$)	↓(t 检验)	胡凌飞 ^[29]
2015.01.05—2015.10.26 北京 滤膜采集 TSP 定量 PCR (拷贝数/m ³)	秋季: $7.15\times 10^5\pm 6.64\times 10^5$ 冬季: $1.31\times 10^5\pm 1.09\times 10^5$ (秋冬季总样本: 各 $n=20$)	无具体数值	↓(相关分析, 秋季) 冬季无显著相关性	Zhen ^[11]
2013.12.16—2014.03.05 北京 UV-APS 粒径谱仪 实时荧光监测 (particles/m ³)	无具体数值 (day=3)	无具体数值, 约为非雾霾天气的 6 倍 (day=3)	↑(方差分析)	Wei ^[20]
2014.10.08—2014.10.2 西安 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	497.7—629.0 ($n=4$)	1102.4—1736.5 ($n=6$)	↑(t 检验)	Li ^[14]
2014.10.07—2014.10.23 西安 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	427—609 ($n=7$)	1102—1736 ($n=6$)	↑(t 检验)	王伟 ^[15]
2014.10—2015.07 西安 Anderson 六级采样器 培养计数 (CFU/m ³)	341.10±158.38 样本量未知	1310.54±371.38 样本量未知	↑(t 检验)	付红蕾 ^[26]
2014.09—2015.01 西安 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	546—700 ($n=7$)	761—1350 ($n=22$)	↑(方差分析)	李婉欣 ^[27]
2014.08—2015.07 西安 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	96.88—1763.36 ($n=30$)	1662.94±280.36 ($n=10$)	↑(方差分析)	路瑞 ^[28]
2013.07—2013.12 西安 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	820±33 ($n=6$)	5200±299 ($n=6$)	↑(t 检验)	司恒波 ^[16]
2014.01.20—2014.03.31 济南 滤膜采集 PM _{0.18-0.32} , PM _{0.32-0.56} , PM _{0.56-1} 定量 PCR (拷贝数/m ³)	没有监测 ($n=1$)	17624—25573 均值 21509 ($n=6$)	未知	Xu ^[18]

续表

采样及测定方法 Sampling and Identification Methods	非雾霾天气 Non-haze	雾霾天气 Haze	结果及统计判断 Results and statistical analysis	参考文献 References
2013.10—2014.08 青岛 滤膜采集 TSP DAPI 染色计数 (拷贝数/m ³)	总微生物:6.55×10 ⁵ (n=25)	总微生物:7.09×10 ⁵ (n=18)	↑(直接比较)	Dong ^[23]
2015.03.20—2015.05.10 青岛 Anderson 采样器 培养计数 (CFU/m ³)	133—1113 (总样本:n=24)	无具体数据	无显著相关性	韩晨 ^[32]

雾霾天气对空气细菌浓度的影响,目前的研究结果也不同。北京市雾霾日空气细菌浓度较非雾霾日高 6 倍^[20];青岛市雾霾日空气微生物浓度 7.09×10⁵拷贝数/m³,高于非雾霾日(6.55×10⁵拷贝数/m³)^[23];西安市雾霾天气下空气细菌浓度为 1102.4—1736.5 CFU/m³,显著高于非雾霾天气(497.7—629.0 CFU/m³)^[14],该市其他学者^[15-16, 26-28]也得到雾霾天气下空气细菌浓度更高的结果。然而,北京市一些学者的研究却得到相反的结果,Zhen 等^[11]发现北京市秋季空气细菌浓度与 PM_{2.5}显著负相关,胡凌飞等^[29]调查发现非雾霾日空气细菌浓度为 325 CFU/m³,雾霾日下降至 118 CFU/m³;高敏^[25]、Gao^[24, 30-31]等也发现雾霾日空气细菌较低。此外,青岛市春季^[32]、北京市冬季^[11]的研究显示,空气细菌浓度与 PM_{2.5}无明显相关性,不能确定雾霾对空气细菌浓度的影响。

支持雾霾空气中细菌浓度升高的学者认为,高浓度的颗粒物吸附了更多的细菌^[14-15, 20, 23],且太阳辐射杀菌作用的减弱^[14],使得更多的细菌进入空气并存活下来。此外,较高的空气湿度^[14-15]和颗粒物中的营养物质可能也有利于微生物生存和繁殖^[15]。支持雾霾空气中细菌浓度降低的学者则认为,雾霾中高浓度有毒有害物质可损伤细菌^[24, 29, 31],导致其死亡率升高,雾霾天气下细菌内毒素浓度达到 12.4 EU/m³,较非雾霾天高出 2 倍^[20],也倾向于这种可能机制的存在。

1.3 对空气细菌粒径分布的影响

粒径大小决定了颗粒物进入人体呼吸系统后沉积部位^[33],是人体暴露及后续危害评价的重要参数。Anderson 六级采样器具有采集粒径范围宽、采集效率高、操作简便等优势,在研究空气细菌粒径分布中被广泛应用^[34]。众多学者调查了空气细菌粒径分布,研究表明正常天气室外空气细菌粒子呈偏态分布,主要分布在大粒径颗粒物上^[14-15, 24, 29-31, 35-38]。北京市非雾霾天气 55%—80%的空气细菌分布在>2.1 μm(第 1—4 级)的大颗粒物上^[24],西安这一比例达到 79.7%^[15]。

雾霾天气对空气细菌粒径分布规律及变化趋势的影响,目前的研究结果也并不完全一致(表 3)。北京^[24-25, 29, 31]、西安^[27]等地的研究显示,雾霾天气下空气细菌粒径的偏态分布规律没有改变,多数细菌仍主要分布于大粒径上。胡凌飞^[29]和 Gao^[31]调查了北京市雾霾天气下<5 μm 的细菌气溶胶比例及中值直径,与非雾霾天没有显著差异,表明雾霾天气没有改变空气细菌粒径分布;而 Gao^[24]、高敏^[25]、李婉欣^[27]的研究表明,随着雾霾程度的增加,北京市、西安市细菌粒子比例逐渐下降,细菌粒子的中值直径显著增加,细菌气溶胶粒径分布向粗颗粒迁移。西安^[14-16, 26, 28]、青岛^[32]等地另一些调查却发现,雾霾天气下 1.1—2.1 μm 的细菌小粒子比例升至最高^[14-15, 32](约 25.0%^[14]),表明雾霾天气空气细菌的粒径分布规律发生了明显改变。雾霾天气细菌的中值直径在(1.96±0.29) μm,非雾霾天气为(2.32±0.12) μm^[15],雾霾天气下细菌粒径分布有变小的趋势^[15-16, 26, 28]。

支持雾霾空气中细菌粒径分布变大的学者^[25, 27, 32]将原因归结为雾霾天气下高浓度的小颗粒物碰撞和聚集,形成较多的大粒径颗粒。支持雾霾空气中细菌粒径分布变小的学者^[14-15]认为原因可能是雾霾天气大粒径团聚物比例的减少,以及独立悬浮于空气中细菌个体增加。此外,细颗粒物成分可能为微生物生长提供营养也促进微生物在细颗粒物上的比重的增加。

表 3 雾霾天气下空气细菌粒径分布的变化规律

Table 3 Change rules of bacterial size distribution in hazy atmosphere

实验结果 Experimental Results	参考文献 References	采样及测定方法* Sampling and detection	实验证据 Experimental Evidence	
偏态分布没有改变,空气细菌主要分布于大粒径颗粒物 Skewed Distribution doesn't Change, Airborne Bacteria is Mainly Distributed in Large Particles	雾霾对细菌粒子无影响	Gao ^[31]	2013.05.03—2013.07.02 北京($n=372$)	PM _{2.5} 浓度在 0—100, 100—200, 200—300, 300—400 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 时,空气细菌中值直径分别为 4.59, 4.87, 5.13, 4.87 μm ($P>0.05$); PM _{2.5} 浓度与空气细菌中值直径无显著相关性
		胡凌飞 ^[29]	2013.01.08—2013.02.04 北京($n=60$)	< 5 μm 的细菌气溶胶比例,在雾霾污染($n=21$)时为 57.9%,在晴朗天气($n=39$)中为 54.3% ($P>0.05$)
	雾霾促进细菌粒子变大	Gao ^[24]	2013.01.14—2014.01.22 北京($n=199$)	夏季:随着雾霾程度的增加,< 2.1 μm 的细菌粒子比例从 26.34%下降到 20.45%,细菌粒子的中值直径增加; 全年:非雾霾天气下,<2.1 μm 的细菌粒子比例(27.38 \pm 12.03%)高于重度雾霾天气(24.18 \pm 10.40%)
		高敏 ^[25]	2013.01.14—2013.07.22 北京($n=42$)	随着 PM _{2.5} 的增加,细菌在细颗粒物中比例减少,在粗颗粒物中比例增加
偏态分布发生改变,空气细菌粒径呈现双峰分布 Skewed Distribution Changes, Airborne Bacterial Size Presents Bimodal Distribution	雾霾促进细菌粒子变小	李婉欣 ^[27]	2014.09—2015.01 西安($n=29$)	低污染下,空气细菌呈偏态分布,2、3 级分布最多。5、6 级分布最少;而较高污染时,随着空气污染等级的增加,细菌气溶胶粒径分布向粗颗粒迁移
		Li ^[14]	2014.10.08—2014.10.22 西安($n=10$)	非雾霾天($n=4$),空气细菌主要分布于第 2、3、4 级,分别占 25.6%、23.8%和 20.4%,5、6 级比例少于 10%; 雾霾天($n=6$)中,第 5 级比例最高(25.0%),第 6 级比例最低(仍有 12.1%)
	王伟 ^[15]	2014.10.07—2014.10.23 西安($n=13$)	非雾霾天($n=7$),空气细菌主要分布于第 2、3、4 级(>70%),5、6 级比例少于 10%; 雾霾天($n=6$)中,第 5 级比例最高,第 6 级比例最低; 可培养细菌中值直径在非雾霾天气为 2.32 \pm 0.12 μm ,而在雾霾天为 1.96 \pm 0.29 μm ,其浓度峰值向细颗粒方向偏移	
	付红蕾 ^[26]	2014.10—2015.07 西安(n 未知)	非雾霾天气空气细菌主要分布在第 1、2、3 级,峰值出现在第 3 级,谷值出现在第 6 级; 雾霾天气下,空气细菌主要集中在第 2、3、4 级,第 6 级比例最少; 空气细菌中值直径在非雾霾天气为 2.13 μm ,而在雾霾天为 2.0 μm ,浓度峰值向细颗粒方向偏移	
	路瑞 ^[28]	2014.08—2015.07 西安($n=40$)	可培养细菌气溶胶在晴天、阴天、雨天和霾天粒径分布的峰值分别出现在 3.3—4.7, 4.7—7.0, 3.3—4.7, 3.3—4.7 μm 区间上,表现为明显的单峰分布; 可培养细菌气溶胶在晴天、阴天、雨天、霾天的中值中值直径分别为 2.13 \pm 1.36, 2.01 \pm 1.26, 1.93 \pm 1.28, 2.00 \pm 1.34 μm ,从晴天到其他天气有向细颗粒迁移的趋势	
	司恒波 ^[16]	2013.07—2013.12 西安	可培养细菌气溶胶在晴天主要分布在第 1、2、3 级,峰值出现在第 3 级,谷值出现在第 6 级; 雾霾天气下,可培养细菌主要集中在第 2、3、4 级,第 6 级比例最少; 可培养细菌中值直径在非雾霾天气为 2.13 μm ,而在雾霾天为 2.0 μm ,浓度峰值向细颗粒方向偏移	
韩晨 ^[32]	2015.03.20—2015.05.10 青岛($n=24$)	PM ₁₀ (AQI)<100 时,空气细菌主要分布于>4.7 μm 的大粒径上,PM ₁₀ (AQI)>100 时,空气细菌粒径分布发生改变,尤其是 PM ₁₀ (AQI)为 125 时,第 5 级比例显著增加		

* 以上研究均使用 Anderson 采样器采样,培养计数分析(CFU/m³)

1.4 不确定性分析

雾霾天气对空气细菌群落结构、浓度变化及粒径分布的影响及其可能机制,目前尚存诸多不确定性。雾

霾天气下高浓度的细颗粒物是否携带大量细菌? 颗粒物成分及气态污染物是促进细菌生长还是损伤细菌活性? 不确定性可能受到细菌采集、检验及鉴定方法的影响,传统培养法计数鉴定损失了 90% 以上不可培养细菌信息^[5],生物标记法可能受多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)、二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 等非生物化合物发射的荧光干扰^[20],不同分析方式可能检测到不一致的细菌类群和浓度。不确定性还可能受城市气候类型、地域环境,采样点交通状况、植被覆盖,采样季节、时段,雾霾程度及化学组分,大气温度、湿度、压强等环境因子影响^[4],这些环境因子的不同配置综合作用于空气细菌,使得其变化方式更加错综复杂,难以判定。

Zhen^[11]对比发现大气污染物与气象因素对北京市空气细菌浓度和群落结构的相对影响发现,同一季节内细菌特征的变化由气象因子主导,大气污染物的影响较小,非雾霾日气象条件的差异及 PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO₂ 等大气污染物与气象因子的共线性可能是导致研究结果不一致的重要原因。从这个角度回顾表 1—3 研究,一些结果也印证了这种可能性,武丽婧^[19]发现雾天、霾天空气细菌群落结构极为相似,而与晴朗天气差异很大;西安市非雾霾日空气细菌浓度更低^[14],可能与其选择在阴雨天有关。目前学者在调查雾霾天气下空气细菌特征变化时,主要关注于 PM_{2.5} 或 AQI 对空气细菌的影响,相对忽视了气象因素、时空差异的重要性。然而,空气细菌特征变化是诸多环境因子综合作用的结果,识别各阶段的主导环境因子可能是深入理解雾霾空气中细菌特征变化的重要途径。因此,今后的研究应侧重于长期监测以涵盖更多的时间及气象变化,同时,研究应扩展到很多的城市类型,只有在比较分析大量研究结果的基础上,才有可能剥除干扰因素,揭示潜藏在深处的内在规律,以及探寻出更深层次的原因。

2 雾霾空气中的病原细菌

虽然雾霾天气空气细菌群落结构、浓度变化和粒径分布如何变化尚未得到一致的结果,但现有北京^[39]、西安^[14]、杭州^[40]、青岛^[19, 41]等地的研究表明,雾霾空气中细菌物种多样性较非雾霾空气显著增加,病原细菌的种类可能也随之增加。雾霾空气中发现的病原细菌属主要有:葡萄球菌属 (*Staphylococcus*),不动杆菌属 (*Acinetobacter*),假单胞菌 (*Pseudomonas*),鞘脂单胞菌属 (*Sphingomonas*),链球菌属 (*Streptococcus*),奈瑟菌属 (*Neisseria*) 等^[14-16, 18, 20-21, 40],同一属内可能包括非致病菌种。胡亚东等^[17]通过分离纯化,研究了北京和保定雾霾空气中的细菌群落结构,其中蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*),地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*),枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*),氧化节杆菌 (*Arthrobacter oxydans*) 属人类病原菌;Gao 等^[9]将 Miseq 序列 blast 到种的水平,共发现 18 种病原细菌,丰度最高的是屎肠球菌 (*Enterococcus faecium*) 和大肠杆菌 (*Escherichia coli*),其次有痤疮丙酸杆菌 (*Propionibacterium acnes*),阴沟肠杆菌 (*Enterobacter cloacae*),表皮葡萄球菌 (*Staphylococcus epidermidis*),铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 等;Cao 等^[2]利用宏基因组测序的方法鉴定了雾霾空气中微生物组成,48 种优势类群中潜在病原细菌有坐皮肤球菌 (*Kytococcus sedentarius*),约氏乳杆菌 (*Lactobacillus johnsonii*),产气荚膜梭菌 (*Clostridium perfringens*),施氏假单胞菌 (*Pseudomonas stutzeri*),嗜麦芽窄食单胞菌 (*Stenotrophomonas maltophilia*) 和白色拟诺卡氏菌 (*Nocardiosis alba*)。学者们在评估空气细菌健康风险时,更关注病原菌的鉴定及相对丰度的高低,却忽略了细菌毒力强弱和其侵袭途径。致病力强的病原菌即使低丰度也可导致疾病,而致病力弱的病原菌则需要较高浓度才能引起感染。人体直接暴露于空气的部位主要是呼吸道和皮肤,如果空气病原菌不是通过这两种途径侵入,其健康风险也会显著降低^[7-8, 42]。

表 4 是空气中可能通过呼吸道或皮肤侵入人体并有较广泛临床表现的病原细菌。表中的病原细菌均属于机会致病菌,它们的致病力较弱,且在总细菌群体中相对丰度较低。空气中的细菌绝大多数是对人体无害的非病原菌^[2],Woo 等^[48]研究表明病原细菌仅占细菌总数的 0.48%,Gao 等^[9]的研究结果为 3.61%。雾霾天气某些病原菌的相对丰度增加,如肺炎链球菌 (*Streptococcus pneumonia*) 从轻度污染的 0.012% 增加到重度污染的 0.05%^[2]。随着雾霾天气的增多,呼吸道感染病例呈逐年上升趋势^[54]。刘丹等^[55]发现,雾霾中的细颗粒物与人角质细胞的过敏反应密切相关。雾霾天气中病原细菌对人体健康危害的增加,一方面与雾霾天气下病原细菌的种类和相对丰度的增加有关,另一方面也与雾霾天气人体免疫力的下降密切相关。

表4 几种通过呼吸道和皮肤侵入人体的重要空气病原菌

Table 4 Important airborne pathogenic bacteria that invaded human body by respiratory tract or exposed skin

病原菌 Pathogenic Bacteria	鉴定文献 Reference	侵入途径 Invasion Way	主要健康危害 Main Health Risks
肺炎链球菌 <i>Streptococcus pneumoniae</i>	Cao ^[2]	呼吸系统	大叶性肺炎,是细菌性肺炎的主要病原菌 ^[8]
肺炎克雷伯菌 <i>Klebsiella pneumoniae</i>	Kaushik ^[43]	呼吸系统	可引起呼吸道、泌尿道、消化道及皮肤软组织等多种部位感染 ^[44] ;位居全国医院感染率病原菌的前五名 ^[45] ;是美国环保局推荐检测消毒效果的代表性测试菌 ^[46]
铜绿假单胞菌 <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Gao ^[9] , Kaushik ^[43] Fang ^[47] , Woo ^[48]	呼吸系统 皮肤	呼吸道感染,是青少年和成年期囊性纤维化患者、弥漫性泛细支气管炎患者、慢性阻塞性肺疾病患者的慢性呼吸系统感染的主要病原菌 ^[42] ;皮肤软组织感染;侵入血循环引起败血症 ^[8] ;全国医院感染率最高的病原菌 ^[45] ;是美国环保局推荐检测消毒效果的代表性测试菌 ^[46]
金黄色葡萄球菌 <i>Staphylococcus aureus</i>	Fang ^[47]	呼吸系统 皮肤及其他 多种途径	化脓性感染;局部感染主要表现为疖、痈、甲沟炎、麦粒肿、蜂窝织炎、伤口化脓等;内脏器官感染如肺炎、脓胸、中耳炎、脑膜炎、心包炎、心内膜炎等;全身感染如败血症、脓血症等 ^[42] ;位居全国医院感染率病原菌的前五名 ^[45] ;是美国环保局推荐检测消毒效果的代表性测试菌 ^[46]
表皮葡萄球菌 <i>Staphylococcus epidermidis</i>	Gao ^[9] , Fang ^[47] , Woo ^[48]	呼吸系统 皮肤	化脓性感染,多为医源性感染,常见的有泌尿系统感染、败血症、术后感染等 ^[42]
腐生葡萄球菌 <i>Staphylococcus saprophyticus</i>	Fang ^[47]	呼吸系统 皮肤	化脓性感染,多为医源性感染,常见的有泌尿系统感染、败血症、术后感染等 ^[42]
鲍曼不动杆菌 <i>Acinetobacter baumannii</i>	Gao ^[9] , Woo ^[48]	呼吸系统 皮肤	可引起医院获得性肺炎、血流感染、腹腔感染、中枢神经系统感染、泌尿系统感染、皮肤软组织感染等 ^[49] ;位居全国医院感染率病原菌的前五名 ^[45]
流感嗜血杆菌 <i>Haemophilus influenzae</i>	Gao ^[9]	呼吸系统	急性化脓性感染,如化脓性脑膜炎、鼻咽炎、咽喉会厌炎、心包炎、关节炎等 ^[42]
痤疮丙酸杆菌 <i>Propionibacterium acnes</i>	Gao ^[9] , Fahlgren ^[50] Woo ^[48]	皮肤	痤疮 ^[8]
阴沟肠杆菌 <i>Enterobacter cloacae</i>	Gao ^[9]	呼吸系统	可引起多系统感染,以呼吸道感染最常见,也可引起败血症、尿路感染、伤口感染和泌尿道感染等 ^[51]
破伤风梭菌 <i>Clostridium tetani</i>	Gao ^[9]	皮肤	伤口感染 ^[52]
大肠埃希菌 <i>Escherichia coli</i>	Gao ^[9] , Kaushik ^[43]	呼吸系统 皮肤	呼吸道感染 伤口感染 ^[53] ;位居全国医院感染率病原菌的前五名 ^[45]

雾霾天气中累积的高浓度细颗粒物和化学毒物对人体免疫系统的破坏是加重空气病原菌危害的重要原因。致病菌侵入人体时,首先要穿透人体的屏障结构。(1)皮肤和粘膜的物理屏障:皮肤表层由较厚的结构致密的扁平上皮细胞组成,并含有不易被微生物降解的角蛋白阻挡致病菌穿透,粘膜表面有多种附件和黏液层以阻挡致病菌的粘附定植^[42]。大气污染物诱导炎症反应和随后的呼吸道粘膜及皮肤屏障的损伤^[55-58],破坏了皮肤和粘膜的完整性,为病原菌入侵打开一个缺口,有利于病原菌侵入人体;(2)微生物屏障:呼吸道粘膜和皮肤上寄居着大量细菌、真菌,正常菌群构成的菌膜屏障是人体抵御外籍菌侵入的重要防御系统。正常菌群通过与致病菌竞争粘附部位和营养物质,或者产生抗菌物质等方式,抑制外籍菌的粘附与繁殖,以保持人体的微生态平衡^[42]。大气污染物可能改变皮肤微生物群落^[57],同时对呼吸道菌群的定植有明显影响^[59],可能导致呼吸道微生态失调^[60-61],机会致病菌大量繁殖,诱发呼吸道和皮肤的感染发病。除了破坏屏障结构,大气污染物对人体内吞噬细胞、补体、细胞因子等均有损伤^[56],意味着病原菌侵入后,人体对病原菌清除能力降低,因而更容易导致疾病。一些临床证据也表明,雾霾天气下呼吸道感染^[62],荨麻疹^[63]等病例显著增加。

此外,雾霾天气中的化学组分对病原微生物致病力的影响可能也是雾霾天气下呼吸系统、皮肤感染病例增加的重要原因。Hussey等^[64]发现雾霾空气常见组分炭黑,能显著改变肺炎链球菌(*Streptococcus pneumoniae*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)的生物膜结构、组分和功能,并调整生物膜对蛋白质降

解和多种抗生素的抵抗力,增加了肺炎链球菌对青霉素(治疗肺炎链球菌首选药物)的抗性,这些研究表明雾霾空气中除了颗粒物、有毒化学物质等导致的健康风险增加,来自于病原菌的潜在健康危害也在增加。

综上所述,空气中病原菌主要由条件致病菌组成,它们在空气中含量很低。雾霾空气下部分病原菌相对丰度增加,大气污染物可增强某些病原菌的致病力。雾霾天气中高浓度的细颗粒物和化学污染物可损伤皮肤黏膜屏障,打破呼吸道、皮肤的微生态平衡,为病原菌侵入创造机会。两者的协同作用,显著增加了雾霾天气空气中病原菌的健康风险。

3 存在的问题与研究展望

3.1 雾霾天气主要发生在中国和印度等发展中国家,近些年来才得到科研人员的高度重视,目前雾霾空气中微生物特征的研究还不够充分,仅在我国少数城市开展了相关的研究,在很多关键问题上还未有一致性的研究结果,应进一步开展雾霾天气空气微生物特征的研究。

3.2 不同空气微生物的采样和分析方法,结果难以进行比较。培养法研究低估了空气微生物的种类和数量,而高通量测序技术无法得知微生物活力,不同方法相结合,对于探知空气微生物的健康危害,可能会更加准确。

3.3 高通量测序通量大,用其结果鉴定病原菌能真实反映物种分类及丰度信息,但目前使用 Silva 或 Greengenes 数据库很难比对到种级别,因此需要创建完善的致病菌数据库,或建立新的通用分析方法。

3.4 现有研究多关注雾霾空气中病原菌对呼吸系统可能的健康危害,忽略了皮肤暴露的健康风险研究,应建立相关研究体系,完善预防方案;

3.5 空气病原微生物多为条件致病菌,对病患人员、婴幼儿、老人等免疫力较低的易感人群危害最大。雾霾天气下医院血液科空气消毒净化效果较晴天差^[65],医院内感染风险可能增加。因此,雾霾天气下应进一步加强医院、幼儿园、养老院等室内环境的空气致病菌污染监测,同时应完善空气微生物评价指标,为有效预防空气微生物健康危害提供理论支撑。

参考文献 (References):

- [1] 徐羽贞. 微生物气溶胶静电收集技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [2] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, Fang J H, Lang J D, Tian G, Jiang J K, Zhu T F. Inhalable microorganisms in Beijing's PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants during a severe smog event. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 1499-1507.
- [3] 马曼曼, 甄毓, 米铁柱, 祁建华, 邵聪聪, 冯文荣. 青岛冬季霾天不同粒径生物气溶胶中细菌群落特征研究. *中国环境科学*, 2017, 37(8): 2855-2865.
- [4] Smets W, Moretti S, Denys S, Lebeer S. Airborne bacteria in the atmosphere: presence, purpose, and potential. *Atmospheric Environment*, 2016, 139: 214-221.
- [5] 方治国, 郝翠梅, 姚文冲, 欧阳志云. 空气微生物群落解析方法: 从培养到非培养. *生态学报*, 2016, 36(14): 4244-4253.
- [6] 路风, 金银龙, 程义斌. 军团菌病的流行概况. *国外医学卫生学分册*, 2008, 35(2): 78-83.
- [7] 李明远, 徐志凯. *医学微生物学(第三版)*. 北京: 人民卫生出版社, 2015: 117-206.
- [8] 李兰娟. *感染微生态学(第二版)*. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 79-97, 196-219, 264-299.
- [9] Gao J F, Fan X Y, Li H Y, Pan K L. Airborne bacterial communities of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei Megalopolis, China as revealed by illumina miseq sequencing: a case study. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, 17(3): 788-798.
- [10] Smets W, Moretti S, Lebeer S. Study of airborne bacteria and their relation to air pollutants//Proceedings of the 9th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability. Siena, Italy: WIT Press, 2014: 1449-1458.
- [11] Zhen Q, Deng Y, Wang Y Q, Wang X K, Zhang H X, Sun X, Ouyang Z Y. Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: 703-712.
- [12] Tong Y Y, Lighthart B. Solar radiation has a lethal effect on natural populations of culturable outdoor atmospheric bacteria. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(6): 897-900.
- [13] Alghamdi M A, Shamy M, Redal M A, Khoder M, Awad A H, Elserougy S. Microorganisms associated particulate matter: a preliminary study.

- Science of the Total Environment, 2014, 479-480: 109-116.
- [14] Li Y P, Fu H L, Wang W, Liu J, Meng Q L, Wang W K. Characteristics of bacterial and fungal aerosols during the autumn haze days in Xi'an, China. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 439-447.
- [15] 王伟, 付红蕾, 王廷路, 宋颖, 扶娟, 项麦祺, 李彦鹏. 西安市秋季灰霾天气微生物气溶胶的特性研究. *环境科学学报*, 2016, 36(1): 279-288.
- [16] 司恒波. 微生物气溶胶与大气细颗粒物的相关性研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [17] 胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强. 北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征. *环境科学*, 2017, 38(4): 1327-1339.
- [18] Xu C H, Wei M, Chen J M, Wang X F, Zhu C, Li J R, Zheng L L, Sui G D, Li W J, Wang W X, Zhang Q Z, Mellouki A. Bacterial characterization in ambient submicron particles during severe haze episodes at Ji'nan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 188-196.
- [19] 武丽婧. 青岛及黄海生物气溶胶中微生物群落多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [20] Wei K, Zou Z L, Zheng Y H, Li J, Shen F X, Wu C Y, Wu Y S, Hu M, Yao M S. Ambient bioaerosol particle dynamics observed during haze and sunny days in Beijing. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 751-759.
- [21] 邵聪聪, 甄毓, 米铁柱, 马曼曼, 冯文荣. 青岛冬季霾天与非霾天大气细菌群落结构特征研究. *城市环境与城市生态*, 2016, 29(3): 7-13.
- [22] 袁兴程, 杜娟. 徐州市城郊雾霾天气中PM_{2.5}物化及微生物特征分析. *广东化工*, 2017, 44(1): 18-18, 38-38.
- [23] Dong L J, Qi J H, Shao C C, Zhong X, Gao D M, Cao W W, Gao J W, Bai R, Long G Y, Chu C C. Concentration and size distribution of total airborne microbes in hazy and foggy weather. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 1011-1018.
- [24] Gao M, Jia R Z, Qiu T L, Han M L, Song Y, Wang X M. Seasonal size distribution of airborne culturable bacteria and fungi and preliminary estimation of their deposition in human lungs during non-haze and haze days. *Atmospheric Environment*, 2015, 118: 203-210.
- [25] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 韩梅琳, 宋渊, 王旭明. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征. *环境科学*, 2014, 35(12): 4415-4421.
- [26] 付红蕾. 西安市不同天气可培养微生物气溶胶的分布特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [27] 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏. 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. *环境科学*, 2017, 38(11): 4494-4500.
- [28] 路瑞, 李婉欣, 宋颖, 谢铮胜, 李彦鹏. 西安市不同天气下可培养微生物气溶胶浓度变化特征. *环境科学研究*, 2017, 30(7): 1012-1019.
- [29] 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松. 北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征. *环境科学*, 2015, 36(9): 3144-3149.
- [30] Gao M, Yan X, Qiu T L, Han M L, Wang X M. Variation of correlations between factors and culturable airborne bacteria and fungi. *Atmospheric Environment*, 2016, 128: 10-19.
- [31] Gao M, Qiu T L, Jia R Z, Han M L, Song Y, Wang X M. Concentration and size distribution of viable bioaerosols during non-haze and haze days in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(6): 4359-4368.
- [32] 韩晨, 谢绵测, 祁建华, 张文倩, 李先国, 张大海. 青岛市不同空气质量下可培养生物气溶胶分布特征及影响因素. *环境科学研究*, 2016, 29(9): 1264-1271.
- [33] 薛林贵, 姜金融, Famous E. 城市空气微生物的监测及研究进展. *环境工程*, 2017, 35(3): 152-157, 162-162.
- [34] 于玺华. 现代空气微生物学. 北京: 人民军医出版社, 2002.
- [35] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 王效科, 林学强. 室外空气细菌群落特征研究进展. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(1): 123-128.
- [36] Shaffer B T, Lighthart B. Survey of culturable airborne bacteria at four diverse locations in Oregon: urban, rural, forest, and coastal. *Microbial Ecology*, 1997, 34(3): 167-177.
- [37] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K. Concentration and size distribution of culturable airborne microorganisms in outdoor environments in Beijing, China. *Aerosol Science and Technology*, 2008, 42(5): 325-334.
- [38] Li M F, Qi J H, Zhang H D, Huang S, Li L, Gao D M. Concentration and size distribution of bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 3812-3819.
- [39] Yan D, Zhang T, Su J, Zhao L L, Wang H, Fang X M, Zhang Y Q, Liu H Y, Yu L Y. Diversity and composition of airborne fungal community associated with particulate matters in Beijing during haze and Non-haze days. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 487.
- [40] 姚文冲. 基于高通量测序的南方典型旅游城市空气细菌群落特征研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- [41] 李林佳. 青岛市不同季节雾霾期与非雾霾期空气微生物多样性比较研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [42] 陆德源. 医学微生物学(第五版). 北京: 人民卫生出版社, 2001: 69-86.
- [43] Kaushik R, Balasubramanian R. Assessment of bacterial pathogens in fresh rainwater and airborne particulate matter using Real-Time PCR. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 131-139.

- [44] 周蓉, 朱卫民. 肺炎克雷伯菌分子流行病学及耐药机制研究进展. 国外医药抗生素分册, 2012, 33(1): 1-5, 42-42.
- [45] 任南, 文细毛, 吴安华. 2014 年全国医院感染横断面调查报告. 中国感染控制杂志, 2016, 15(2): 83-87.
- [46] U.S. Environmental Protection Agency. Product performance test guidelines; OCSPP 810. 2500; air sanitizers—efficacy data recommendations. (2012). <https://www.regulations.gov/contentStreamer?documentId=EPA-HQ-OPPT-2009-0150-0025&contentType=pdf>.
- [47] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K, Hu L F. Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China. *Microbial Ecology*, 2007, 54(3): 487-496.
- [48] Woo A C, Brar M S, Chan Y, Lau M C Y, Leung F C C, Scott J A, Vrijmoed L L P, Zawar-Reza P Z, Pointing S B. Temporal variation in airborne microbial populations and microbially-derived allergens in a tropical urban landscape. *Atmospheric Environment*, 2013, 74: 291-300.
- [49] 陈佰义, 何礼贤, 胡必杰, 倪语星, 邱海波, 石岩, 施毅, 王辉, 王明贵, 杨毅, 张菁, 俞云松. 中国鲍曼不动杆菌感染诊治与防控专家共识. 中华医学杂志, 2012, 92(2): 76-85.
- [50] Fahlgren C, Hagström Å, Nilsson D, Zweifel U L. Annual variations in the diversity, viability, and origin of airborne bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(9): 3015-3025.
- [51] 高秀娟, 张晓丽, 刘骅骅, 张瑜. 某医院临床分离阴沟肠杆菌分布及耐药性变迁. 中国消毒学杂志, 2017, 34(4): 350-352.
- [52] 姚雪华, 杨跃杰, 王文豪. 破伤风患者预后的影响因素分析. 中国实用医药, 2016, 11(17): 90-92.
- [53] 蒋琪霞, 王建东, 徐元玲, 彭青, 周昕, 李洋, 黄秀玲. 慢性伤口感染常见病原菌及其干预效果研究. 护理学杂志, 2015, 30(12): 19-23.
- [54] 王新华. 住院患者 1304 例呼吸道感染原体检测结果分析. 实用医技杂志, 2015, 22(2): 167-168.
- [55] 刘丹, 赵雨佳, 王祎星, 张慧峰, 高慧明, 周辉. 雾霾和沙尘暴天气细颗粒物对人体角质细胞促炎症作用和过敏反应的影响. 毒理学杂志, 2017, 31(2): 102-108.
- [56] 邱勇, 张志红. 大气细颗粒物免疫毒性研究进展. 环境与健康杂志, 2011, 28(12): 1117-1120.
- [57] Mancebo S E, Wang S Q. Recognizing the impact of ambient air pollution on skin health. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 2015, 29(12): 2326-2332.
- [58] 吴迪, 李潇, 卢永波. 雾霾对皮肤屏障功能的毒性作用研究//中国毒理学会, 湖北省科学技术协会. 中国毒理学会第七次全国毒理学大会暨第八届湖北科技论坛论文集. 武汉: 中国毒理学会, 湖北省科学技术协会, 2015: 1.
- [59] 肖纯凌, 韩秀珍, 魏德洲, 孙文娟, 叶丽杰, 席淑华, 崔金山. 大气污染对人体免疫功能及微生态的影响. 中国微生态学杂志, 2002, 14(1): 12-13.
- [60] 肖纯凌. 大气污染与呼吸道微生态. 沈阳医学院学报, 2006, 8(1): 1-3.
- [61] 张瑜, 肖纯凌. 呼吸道微生态在大气污染中的改变与调节的研究进展. 中国当代医药, 2017, 24(12): 12-15.
- [62] 仲崇山. 雾霾诱发呼吸道感染者增多. 新华日报, 2010-10-12(A06).
- [63] 李惠, 赵学良, 程芳, 王辉, 金小力. 雾霾天气对荨麻疹就诊量和病情的影响. 皮肤性病诊疗学杂志, 2017, 24(2): 112-115.
- [64] Hussey S J K, Purves J, Allcock N, Fernandes V E, Monks P S, Ketley J M, Andrew P W, Morrissey J A. Air pollution alters *Staphylococcus aureus* and *Streptococcus pneumoniae* biofilms, antibiotic tolerance and colonisation. *Environmental Microbiology*, 2017, 19(5): 1868-1880.
- [65] 高丽娜. 冬季雾霾天气手术室空气净化效果观察. 中国消毒学杂志, 2016, 33(12): 1227-1228.