

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2022.01.015

空气微生物气溶胶的分析鉴定及与雾霾天相关性研究进展

耿迎雪^{1,2}, 胡金朝¹, 张宇¹, 李爱民¹, 蒋冰馨¹

(1.西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌 615013;

2.昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:微生物气溶胶广泛存在于大气中,其在雾霾天的形成和发展等方面扮演了重要的角色。梳理了雾霾期空气微生物气溶胶的分析鉴定、微生物气溶胶与雾霾天相关性方面的主要研究成果,得出如下结论:空气微生物气溶胶的分析鉴定应制定统一的检测标准,为雾霾天空气微生物的健康风险评估提供科学的定量指标;雾霾期空气微生物气溶胶的浓度普遍高于非霾期,主要表现为真菌气溶胶浓度增加,但微生物的种群丰富度并不会因污染程度的增加而增加;空气微生物气溶胶对人类健康构成重大威胁,应采取科学措施进行预防。

关键词:空气微生物;气溶胶;微生物监测;相关性

中图分类号:X513 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2022)01-0081-07

Analysis and Identification of Airborne Microbial Aerosols and Their Correlation with Haze Days

GENG Yingxue^{1,2}, HU Jinzhao¹, ZHANG Yu¹, LI Aimin¹, JIANG Bingxin¹

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang, Sichuan 615013, China;

2.Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Microbial aerosols widely exist in the atmosphere and play an important role in the formation and development of smog days. Based on the analysis and identification of air microbial aerosols in haze period and the correlation between microbial aerosols and haze days, this paper combed the main research results of air microbial aerosols in haze period, and drew the following conclusions: the analysis and identification of air microbial aerosols should formulate a unified detection standard, provide scientific quantitative indicators for the health risk assessment of air microorganisms in haze days; the concentration of microbial aerosol in haze period is generally higher than that in sunny weather, which is mainly reflected in the increase of fungal aerosol concentration, but the microbial population richness will not increase with the increase of pollution degree; airborne microbial aerosols pose a major threat to human health, thus we should take scientific measures to prevent the occurrence of diseases.

Keywords: airborne microbes; bioaerosol; detection of microbes; dependency relation

0 引言

空气微生物(Airborne microbes)是指悬浮存在于空气中的微生物,主要来自土壤、水体、动植物以及人类活动等,其种类繁多且浓度不一,有细菌、真菌、病毒、噬菌体等^[1]。空气微生物具有极其重要的生态功能,与空气环境质量、空气污染、人体健康密切相关,是空气质量评价重要指标之一^[2-3]。气

溶胶是固态或液态的悬浮微粒在气体介质中的分散体系,在大气环境中微生物多以气溶胶的形式存在^[4]。微生物气溶胶在大气中普遍存在,粒径大小0.01~100 μm,一般为0.1~30 μm^[5],占气溶胶总质量的95%^[6-7]。

近年来,我国雾霾频发,空气污染成为备受关注的环境问题之一。目前关于空气污染事件的核心问题是雾霾在短期内爆发的驱动机制。关于驱

收稿日期:2021-08-28

基金项目:西昌市科技局项目(18JSYJ09);西昌学院“两高”人才科研支持计划(LGLZ201805)。

作者简介:耿迎雪(1987—),女,河北唐山人,讲师,博士研究生,研究方向:大气污染与人体肺健康。

动机,尽管许多专家学者提出了多种假设,然而并没有形成统一的观点,作用机制并未阐明。微生物在大气中作为分解者而存在,在大气生态环境物质的循环方面起到枢纽作用。它们体积小,生长周期短,繁殖迅速,使得它们能在绝大多数环境中生长繁殖。有研究表明某些细菌可以充当冰核或云凝结核,即使在较低温度下也能进行新陈代谢^[8-9],这无疑有助于雾霾中核心成分气溶胶的形成。同时,在雾霾发生期间,小于 1 μm 的荧光生物气溶胶粒子浓度会升高;可培养的细菌水平在雾霾期高于晴天水平^[10-11]。这说明微生物浓度水平与雾霾发生具有一定的协同性,在雾霾的形成及发展等方面扮演了重要的角色。

目前关于雾霾期微生物的研究主要集中在微生物的监测、分布、种群多样性等方面,较少有研究涉及微生物气溶胶与雾霾发生的相关性分析。空气微生物在雾霾形成中扮演的角色并没有明确阐明,但这是一个不能忽视、值得进一步探索和深入研究的问题。本文针对现有研究成果,主要从雾霾期空气微生物气溶胶分析鉴定、微生物气溶胶与雾霾天气相关性、微生物气溶胶对人体健康的影响及预防措施这几个方面进行整理总结,旨在为后续学者研究雾霾与微生物气溶胶的相关作用提供一定的参考和借鉴。

1 雾霾期空气微生物气溶胶的分析与鉴定

1.1 空气微生物采样器研究

目前,国内外已陆续研究出原理不同、结构型式不一的多种大气微生物采样器,主要有惯性撞击类、过滤阻留类、静电沉降类等^[12]。惯性撞击类主要分为固体撞击式、液体撞击式和离心撞击式采样器。

固体撞击式是目前品种最多的微生物采样器,其中应用最多的是 Andersen 采样器。其采样简单,对较宽粒径范围(0.1~20 μm)的粒子均有较高的采集率,且对样品破坏性小、微生物存活率高。缺点是由于存在壁损失,粒子从采集面滑脱和粒子被打碎等所致的采样误差,不适用于压力敏感型微生物采样;采样操作复杂,所需营养琼脂平板较多^[13]。液体撞击式采样器能使微生物均匀分布于采样液中,同时采样液有保护作用,对病毒、立克次氏体等微生物也能采样。液体撞击式采样器最著名的有 Porton 采样器、AGI-30 采样器和 Biosampler 采样器,能将采样液吹成一个巨大的漩涡,增大气体接触液体面。相比于固体撞击式采样器,液体撞击式

采样器不适于低温或长时间采样,同时当场所中微生物浓度较低时采集较困难且采集容量较小、样品易受污染^[14]。离心撞击式采样器是利用气体在旋转路径中运动时所产生的离心力,使粒子获得一定动量,并因其惯性而偏离气体流线,撞击沉着在附近的采集面上。这类采样器主要有 RCS 型及国产的 LWC-1、LWC-2 型,具有携带方便、采样流量大、微生物粒子捕集效率高等优点,但无法判断其采气量及有效采气量,同时对粒径小于 5 μm 的微生物粒子采集效率低。由于一部分粒子会遗留在抽气叶轮的叶片上,因此采样结果误差较大^[12]。

过滤阻留类采样器是利用抽气装置使空气通过滤材而使微生物粒子阻留在滤材上。此类采样器能在低温环境采样且采集率较高。不适于采集耐干性差的微生物,且滤膜微孔易堵塞,难以保持稳定的采气量。微孔滤膜采样器 MF45 是典型的过滤阻留类采样器,可以在低温条件下采样,采样效率高,研究表明这种方法比 Andersen 采样器和 JWL 型采样器采集效率要高,能够应用于空气微生物总数、大气微生物和生物洁净度检测^[15]。静电采样器根据静电吸附原理可以采集到带有电荷的微生物颗粒,具代表性的有 LVS/10 K 大容量静电沉降采样器和小型圆管式静电沉着采样器。这类采样器可采集大量空气标本,对微生物气溶胶的粒径要求不高。但由于其结构复杂、设备较大,因此造成后期维护不便,同时由于放电过程会产生紫外线、臭氧等,对微生物存活不利^[12]。

1.2 空气微生物分析与鉴定方法

雾霾空气中含有大量生物性物质,如真菌、病毒和花粉等^[16]。检测微生物的手段主要有培养计数法、染色计数法、分子生物学技术、生物传感器技术、光谱分析法等^[17]。培养计数法通过采样器将可培养的微生物采集到固体或液体介质上,经过一定时间的培养长成菌落并计数^[17]。

培养计数法是目前应用最多的检测方法,但只能检测活的微生物且有些微生物培养检测周期较长,耗时耗力。同时会受到培养基种类、采样器类型及采样时间等因素的影响。研究表明,仅有不到 10% 的微生物可被培养计数法计数。染色计数法借助不同的染料对菌体进行染色,可以方便地在显微镜下进行活菌计数,如酵母活细胞计数可用亚甲蓝染色液,染色后在显微镜下观察,活细胞为无色而死细胞显蓝色。有研究表明染色计数法较培养计数法更能客观反映环境中气载微生物含量^[18]。

分子生物学技术主要有普通 PCR、实时荧光定

量 PCR 和 16SrRNA 序列分析技术等。与传统鉴定方法不同,现代分子生物学技术直接从环境样品中提取的核酸(DNA 和 RNA)为分析对象,以特定的核酸片段为生物标志物,通过 PCR 扩增并通过多种技术来鉴定其组成的多态性^[19]。如 PCR 法是对所采集的空气气溶胶进行 DNA 或 RNA 的提取、扩增然后进行凝胶电泳图谱分析的一种检测方法^[20]。16SrRNA 基因序列分析是基于已建立的微生物 16SrRNA 基因序列数据库,用以确定细菌的系统发育关系,并使序列探针用于识别未知菌。分子生物学技术由于其高效及准确性已广泛应用于微生物多样性分析,但缺点是费用较高、操作复杂^[20]。

生物传感器技术是应用生物学功能组件来探测微生物浓度并按一定规律转换成可识别的信号。例如表面等离子体共振生物传感器、压电晶体生物传感器、电化学生物传感器等。具有检测灵敏度高、成本低等优点,能检测出具有多个生物信号识别位点的病原微生物。光谱分析法包括生物气溶胶质谱法、拉曼光谱和流式细胞术。质谱分析法可通过荷质比来分析微生物,实现快速、实时的分析。但由于微生物组分复杂,缺乏特征谱峰,此法在生物气溶胶领域的应用并不广泛^[21]。

1.3 雾霾期空气微生物组成特征

雾霾的成分复杂多样,通常含有酸、碱、盐、胺、酚等对人体有毒有害的细颗粒,以及尘埃、花粉、螨虫、流感病毒、结核杆菌、肺炎球菌等^[16],尤其是细颗粒物对人体的危害最大。由于颗粒尺寸具有巨大的比表面积,表面容易富集各种各样的病原微生物。雾霾中的致病菌可伴随细颗粒物一起随呼吸进入人体,危害人体健康尤其是引发肺部疾病,因此微生物的分析鉴定对研究和防治公共卫生安全有重要意义。

微生物的分析鉴定主要集中在雾霾期空气微生物的耐药性及其多样性,选取的目标微生物大多为致病菌。2014年,清华大学朱昕研究员的课题组报道了北京市雾霾天气中大气悬浮颗粒物的微生物组分,鉴定出了1300多种微生物,在这些微生物中,细菌占八成以上,另外还有少量的古细菌和病毒^[22];胡亚东^[23]分析了雾霾期北京城区和保定郊区 PM_{2.5} 中微生物的群落结构多样性,发现气团传输可能是影响微生物群落结构多样性的重要因素;李梦臣等^[24]采用六级筛孔撞击式采样器采集微生物,借助改良的 K-B 纸片法研究了郑州市冬季雾霾期空气中细菌的耐药性,结果表明,郑州市冬季不同地点空气雾霾中细菌的优势菌属基本相同,医院区

域细菌种类较其他区域多样;袁兴程等^[25]在雾霾期采集徐州市城郊大气 PM_{2.5},利用 DGGE 法分析 PM_{2.5} 颗粒上微生物的群落结构;李亚子等^[26]在 2016 年冬季收集雾霾期空气微生物气溶胶并对分离出的库克细菌进行种属鉴定和药敏实验;鞠承含等^[27]利用自然沉降法收集雾霾期大气环境中的微生物并进行分析鉴定,发现雾霾空气中存在条件致病菌西宫微球菌;杨清香等^[28]采集了新乡市冬季严重雾霾大气颗粒物样本,通过微生物培养和分子生物学方法研究了气传细菌和真菌的群落组成,研究表明,雾霾发生时医院空气中存在丰度较高的条件致病菌和致敏真菌,如黏质沙雷菌、隐球菌属、曲霉及青霉等。

关于雾霾期微生物的采集、分析和鉴定目前没有统一的标准,但是条件致病菌的检出应当引起人们足够重视,制定相关检测标准,为雾霾期的健康风险评估提供科学的定量指标。

2 微生物气溶胶与雾霾天气相关性研究

2.1 微生物气溶胶浓度与 PM_{2.5} 浓度相关性分析

在中国许多城市,雾霾强度在宏观上呈现出反向增长趋势。夜间工厂停产,工地停工,运行车辆大幅减少,发电厂负荷大大降低,大气排污量相应地也随之下落,但是雾霾强度却有增无减。当白天一切运营恢复,运行车辆数回升,大气排污量增加,雾霾却出现减弱的趋势^[29]。除了污染物的排放,必然存在其他因素可促进雾霾形成。有数据统计分析发现,空气中微生物气溶胶浓度与大气颗粒物 PM_{2.5} 浓度具有一定的相关性。同时雾霾期患呼吸系统疾病的人数普遍高于非雾霾期,说明空气中致病微生物含量增加^[30],雾霾与微生物之间必然存在密切联系。

有研究发现不同季节雾霾期,空气中微生物群落碳源利用水平明显高于非雾霾期,其中春季雾霾期微生物群落碳源代谢强度最大,代谢水平最高,冬季不同时间段雾霾期空气微生物群落碳源代谢水平明显高于非雾霾期,碳源代谢强度较高,代谢类型较丰富^[30]。司恒波^[31]选取长安大学雁塔校区为研究对象,选用 Andersen 六级空气微生物采样仪和环境大气采样仪分别对空气中的微生物气溶胶和大气细颗粒物进行了采样研究,发现雾霾期空气中细菌、真菌微生物气溶胶浓度明显高于非雾霾期,雾霾天气下,细菌、真菌微生物气溶胶浓度最大值分别为(5 200±299) CFU/m³和(3 548±295) CFU/m³,分别为晴朗天气下细菌和真菌气溶胶浓度的6.5

和 8 倍,同时细菌、真菌微生物气溶胶浓度与大气细颗粒物 $PM_{1.0}$ 浓度呈现良好的相关性。胡凌飞等^[32]在 2013 年 1 月 8 日—2 月 4 日雾霾频繁爆发期间,研究了雾霾天与晴朗天细菌、真菌气溶胶浓度变化,结果表明,雾霾过后,空气中的细菌、真菌气溶胶浓度高于雾霾天发生时的浓度,且空气中的颗粒物数量以 $PM_{1.0}$ 占绝大多数。李婉欣等^[33]研究了西安市不同空气质量水平下可培养细菌和真菌的浓度和大小分布,结果表明,可培养生物气溶胶的浓度随着空气质量的恶化而增加,在低污染水平下,真菌气溶胶呈正态分布,而在高污染水平下真菌气溶胶更倾向于细颗粒。综合分析上述研究,不难发现雾霾期微生物气溶胶浓度普遍高于非霾期,尤其表现在真菌气溶胶,真菌气溶胶更倾向富集于 $PM_{1.0}$ 的细颗粒。

2.2 微生物气溶胶与雾霾间因果分析

雾霾天气时微生物附着在颗粒物上进行生长繁殖等活动,造成微生物气溶胶浓度和 $PM_{2.5}$ 浓度呈正相关^[34-38]。同时,空气中的微生物聚集在雾霾颗粒上,形成厚厚的阻挡层,减弱了紫外线强度,杀菌效果下降,这使得空气中的微生物含量进一步增加^[39]。尽管大气微生物样品的采样地点和采样气象条件同其他地点所采集的样品不尽相同,但是当采用相同分析方法时各样品的微生物群落结构之间存在很好的相似性^[40]。即一些细菌菌属在不同大气环境中普遍存在,当所需营养物质达标,微生物在一定程度上也能够空旷的大气溶胶里进行快速的生长繁殖,从而在短时间内数量猛增,导致了雾霾天气的加重。然而细菌的物种丰富度及种群多样性与污染程度之间并没有表现出很好的相关性。Du 等^[41]分析了北京市不同季节(2014 年 4 月—2015 年 1 月)不同空气污染水平下,75 个 $PM_{2.5}$ 样品的细菌和真菌的组成,指出细菌和真菌群落组成和结构的变化与季节显著相关,冬季病原菌和真菌较其他季节丰富,但其丰度与污染程度之间没有相关性。这一研究发现使我们对雾霾期空气微生物气溶胶有了新的认识,雾霾期微生物的种群丰富度并不会因污染程度的增加而增加。

雾霾与微生物气溶胶之间的关系非常复杂,涉及多种因素。研究发现,水环境及土壤环境中含有大量的细菌等微生物,而空气中的细菌种类及数量分布较少,但在各种典型场所,如污水处理厂以及大学、公园等人流丰富的地方,检测出的细菌和真菌气溶胶颗粒排布均匀^[42-43]。Zhang 等^[44]提出了一种微生物气溶胶与雾霾关系的假设机制,如图 1

所示。细菌被认为是由于各种人类活动而从地面排放放到空气中,制药等人类活动可能会排放大量的细菌进入空气中进而引起空气污染。而空气中含有 NH_4^+ 、 NO_3^- 、Ca、Na、K、Mg 是细菌生长所需的营养物质,当空气具备相对湿度(RH)和温度等其他有利条件时,细菌的快速繁殖成了必然。同时雾霾期大气边界层降低,环境污染(如 VOC、 NH_3 和 NO_x)浓度增加^[45],细菌可以利用这些挥发性有机化合物作为营养物质来降解多环芳烃、氧化氮氧化物并清除羟基自由基^[46-48]。同时细菌在成长过程中会释放出许多碳氢化合物、醇类、醛类等污染物,进一步加剧空气质量的恶化。在这一反应过程中,由地面人类活动(例如,从制药厂或废水处理厂)排放到空气中的细菌,如不动杆菌、蜡样芽孢杆菌、短小芽孢杆菌等可对大气碳氮循环起到重要作用并影响气溶胶化学。

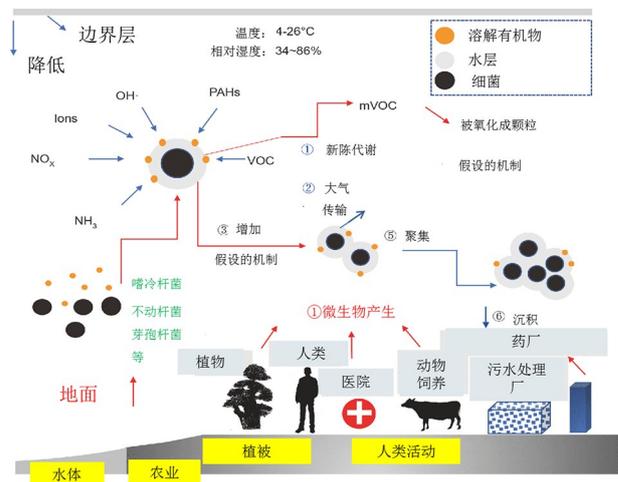


图 1 微生物气溶胶在大气气溶胶化学中的角色推断^[44]

3 微生物气溶胶对人体健康的危害

病原微生物气溶胶具有来源多样、活性易变、沉积再生、扩散复杂以及感染广泛的特征,是空气传播性疾病扩散传播感染人体的主要原因^[49-51]。同时微生物可负载于颗粒物表面(图 2),随呼吸进入人体支气管,甚至进入深肺区^[39],当机体被携带有病原菌的雾霾严重侵害时,机体固有的代谢稳态遭受破坏,进而引起疾病,严重时可危及生命^[52-55]。微生物生长繁殖迅速,由微生物引发的人类疾病尤其是呼吸系统疾病是威胁人类健康的第 4 大杀手。

空气传播性疾病主要以致病性微生物气溶胶的形式传播和感染人体,在拥挤的公共场所容易发生。空气传播疾病的流行是一个复杂的过程,受到病原体、宿主和环境因素的多重影响。目前可以证

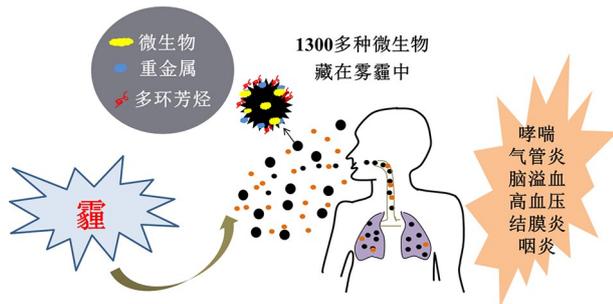


图 2 雾霾对人体健康的损害

实,人体呼吸道摄入是空气中病原体的主要感染途径。采取正确、科学的个人防护措施,对于预防和控制雾霾天气的健康危害,有效降低疾病的发生率具有重要意义。

可以选择合理科学佩戴口罩、勤洗手来降低空气传播疾病的风险,在雾霾天尽量减少户外运动,合理补充膳食,同时还可以定期清洁室内的空气。这些措施都能够有效减少雾霾天气对身体健康的伤害。

5 结论

目前而言,国内外专家学者关于空气微生物气

溶胶的研究主要集中在城市微生物气溶胶的粒度分布特征、群落结构和生态分布等,而病原微生物气溶胶传播机制、微生物气溶胶与雾霾相关性机制方面研究成果还较少。同时缺乏对城市不同功能区的微生物气溶胶进行系统、全面的比较分析。文章梳理了雾霾期空气微生物气溶胶的主要研究成果,得出如下结论:

1) 条件致病菌的检出应当引起人们足够重视,空气微生物气溶胶的分析鉴定应制定统一的检测标准,为雾霾天空气微生物的健康风险评估提供科学的定量指标。

2) 雾霾期空气中微生物气溶胶的浓度普遍高于非雾霾期,主要表现为真菌气溶胶浓度增加,但微生物的种群丰富度并不会因污染程度的增加而增加。

3) 在现行“大气十条”深入实施背景下,应加强微生物气溶胶传播途径及机制的研究,制订统一的微生物气溶胶监测评价体系,为人类健康风险评估提供基础数据。

4) 空气微生物气溶胶对人类健康构成重大威胁,应采取科学措施进行预防。

参考文献:

- [1] GIORGIO C D, KREMPFF A, GUIRAUD H, et al. Atmospheric pollution by airborne microorganisms in the city of Marseilles [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(1): 155-160.
- [2] 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.
- [3] 宋志文, 王琳, 徐爱玲, 等. 人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 [J]. *环境科学*, 2015(2): 415-420.
- [4] 孙平勇, 刘雄伦, 刘金灵, 等. 空气微生物的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 336-340.
- [5] 杜茜, 李劲松. 微生物气溶胶污染监测检测技术研究进展 [J]. *解放军预防医学杂志*, 2011, 29(6): 455-458.
- [6] ZHANG Q, JIMENEZ J L, CANAGARATNA M R, et al. Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L13801.
- [7] MATTHIAS-MASER S, JAENICKE R. Examination of atmospheric bioaerosol particles with radii $>0.2 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1994, 25: 1605-1613.
- [8] FROHLICH J, KAMPF C J, WEBER B, et al. Bioaerosols in the earth system: climate, health, and ecosystem interactions [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 346-376.
- [9] SANTL-TEMKIV T, SAHYOUN M, FINSTER K, HARTMANN S, et al. Characterization of airborne ice-nucleation-active bacteria and bacterial fragments [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109: 105-117.
- [10] WEI K, ZOU Z, ZHENG Y, et al. Ambient bioaerosol particle dynamics observed during haze and sunny days in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 751-759.
- [11] LIU H, ZHANG X, ZHANG H, et al. Effect of air pollution on the total bacteria and pathogenic bacteria in different sizes of particulate matter [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 483-493.
- [12] 李涛. 空气微生物采样及发展趋势 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2003, 13(5): 538-539.
- [13] 钱乐, 周明浩, 甄世祺, 等. 常见空气微生物采样器研究 [J]. *江苏预防医学*, 2012, 23(4): 49-51.
- [14] CAROLINE D, PETER S, ANNE M, et al. Comparison of endotoxin exposure assessment by bioaerosol impinger and filter-sampling methods [J]. *Applied and Environment Microbiology*, 2001, 67(6): 2775-2780.
- [15] 王汝彬. 过滤膜式大气微生物采样器的设计和实现 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [16] 韩笑, 李姣, 马翠卿. 雾霾与呼吸免疫 [J]. *中国细胞生物学学报*, 2018, 40(4): 617-624.

- [17] 刘洋, 谢珊珊, 杨凯, 等. 空气微生物气溶胶检测与空气消毒技术研究进展[J]. 职业与健康, 2017, 33(10): 1422-1425.
- [18] 刘敬博, 柴同杰, 苗增民, 等. 奶牛舍环境中气载微生物含量的检测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 56-60.
- [19] 姬洪飞, 王颖. 分子生物学方法在环境微生物生态学中的应用研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8234-8243.
- [20] 方治国, 欧阳志云, 胡利峰, 等. 空气微生物研究方法进展与展望[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(7): 8-13.
- [21] 郑云昊, 李菁, 陈灏轩, 等. 生物气溶胶的昨天, 今天和明天[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 878-894.
- [22] CAO C, JIANG W, WANG B, et al. Inhalable microorganisms in Beijing's PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants during a severe smog event [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48: 1499-1507.
- [23] 胡亚东. 北京和保定地区 PM_{2.5} 中微生物群落组成及相关性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [24] 李梦臣, 刘俏丽, 段广才, 等. 郑州市冬季雾霾空气中细菌的多样性及耐药性检测[J]. 郑州大学学报(医学版), 2018, 53(4): 508-510.
- [25] 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[J]. 广东化工, 2017, 44(1): 16-18.
- [26] 李亚子, 李丽婕, 徐保红, 等. 雾霾中库克菌属细菌的分离鉴定及药物敏感性分析[J]. 环境与健康杂志, 2017(34): 837.
- [27] 鞠承含, 李亚子, 吕国平, 等. 雾霾中检出 1 例西宫微球菌的报告[J]. 医学动物防制, 2017, 33(11): 1172-1176.
- [28] 杨清香, 辛媛, 李慧君, 等. 新乡市冬季严重雾霾下医院和校园气传微生物群落组成研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 78-85.
- [29] 顾为东. 中国雾霾特殊形成机理研究[J]. 宏观经济研究, 2014(6): 3-4.
- [30] 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.
- [31] 司恒波. 微生物气溶胶与大气颗粒物的相关性研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [32] 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3144-3149.
- [33] 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): 4494-4499.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] ATIN A, TIINA R, SERGEY A G, et al. Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone: a two-year study [J]. Environmental Pollution, 2006, 140(1): 16-28.
- [37] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4415-4420.
- [38] 王雪. 简述环境微生物引起的几种污染与人类健康的关系[J]. 农村科学实验, 2017(6): 115.
- [39] 王步英, 郎继东, 张丽娜, 等. 基于 16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2727-2734.
- [40] FIERER N, LIU Z Z, RODRIGUEZ H M, et al. Short term temporal variability in airborne bacterial and fungal populations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(1): 200-207.
- [41] 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.
- [42] 许鹏程, 张崇森, 袁琳, 等. 西安市典型场所微生物气溶胶的分布特征[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2410-2412.
- [43] 何炎忻, 李能树, 李聪慧, 等. 合肥市雾霾天气大气微生物监测与评价[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(16): 68-69.
- [44] ZHANG T, LI X, WANG M, et al. Microbial aerosol chemistry characteristics in highly polluted air [J]. Science China Chemistry, 2019, 62: 1051-1063.
- [45] QUAN J, TIE X, ZHANG Q, et al. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012 - 2013 winter in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, 88: 83-89.
- [46] CHADHAIN S M, NORMAN R S, PESCE K V, et al. Microbial dioxygenase gene population shifts during polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72: 4078-4087.
- [47] KRUMINS V, MAINELIS G, KERKHOF L J, et al. Substrate-dependent rRNA production in an airborne bacterium [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2014, 1: 376-381.
- [48] SAMAKE A, UAU G, MARTINS J M F, et al. The unexpected role of bioaerosols in the Oxidative Potential of PM [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 10978.
- [49] 张宝莹, 刘凡, 白雪涛. 病原微生物气溶胶对人群健康风险评估研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2015, 5(3): 287-293.

- [50] DOUWES J, THORNE P, PEARCE N, et al. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47(3): 187-200.
- [51] SRIKANTH P, SUDHARSANAM S, STEUNBERG R. Bio-aerosol in indoor environment: composition, health effects and analysis [J]. *Indian Journal of Microbiology*, 2008, 26(4): 302-312.
- [52] 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): 152-155.
- [53] DENG X B, ZHANG F, WANG L J, et al. Airborne fine particulate matter induces multiple cell death pathways in human lung epithelial cells [J]. *Apoptosis*, 2014, 19(7): 1099-1112.
- [54] 陈锸, 万东, 褚可成, 等. 空气微生物污染的监测及研究进展 [J]. *中国环境监测*, 2014, 30(4): 171-176.
- [55] ZHENG S, POZZER A, CAO C X, et al. Long-term (2001-2012) concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the impact on human health in Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 5715-5725.

(上接第 80 页)

- [6] JANSSON J, JOHANSSON J, GUSTAFSSON F. Decision making for collision avoidance systems [J]. *SAE Transactions*, 2002, 111: 197-204.
- [7] 章军辉, 李庆, 陈大鹏. 基于 BP 神经网络的纵向避撞安全辅助算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(7): 140-147.
- [8] 袁伟, 蒋拯民, 郭应时. 制动与转向协调动作的车辆避撞控制研究 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(1): 173-181.
- [9] 孙彦军. 智能车主动避撞控制策略研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [10] 初建圳. 考虑驾驶员风格的自适应巡航控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [11] 王润琪, 蒋科军. ABS 汽车制动距离分析与计算 [J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(2): 70-73.
- [12] 张雪峰. 汽车主动避撞控制系统控制方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [13] 单永刚. 汽车主动避撞控制系统的建模与仿真研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.