

第600次学术讨论会·生物气溶胶与人类健康、国家生物安全及大气污染

生物气溶胶的昨天、今天和明天

郑云昊, 李菁, 陈灏轩, 张婷, 李心月, 王敏妃, 要茂盛*

北京大学环境科学与工程学院, 国家污染模拟与控制重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: yao@pku.edu.cn

2018-01-30 收稿, 2018-03-13 修回, 2018-03-14 接受, 2018-03-28 网络版发表

国家杰出青年科学基金(21725701)、国家自然科学基金(91543126, 21611130103, 21477003, 41121004)、国家重点研发计划(2016YFC0207102)、国家重点基础研究发展计划(2015CB553401)和科技部国际科技合作与交流专项(2015DFG92040)资助



摘要 生物气溶胶在环境与健康、大气环境、生物反恐、传染病、公共卫生、生态环境、气候变化以及食品安全等方面均有重要影响。过去10年, 国内外生物气溶胶领域研究方向、研究对象、研究人员发生了巨大变化。例如, 从事大气化学研究专家学者也陆续开展生物气溶胶研究等。生物气溶胶的研究手段也日新月异, 其中新型生物气溶胶监测技术、捕获系统、各种生物传感器、微流控技术以及高通量测序等技术使得科学界对空气中的微生物有了更多新的认识。人体生物气溶胶排放与室内微生物健康效应等成为了当前研究热点之一, 包括对大气颗粒物的氧化潜能的影响。由气溶胶传播导致的呼吸系统感染仍然是危害人类生命的一大杀手, 特别是对于低龄儿童。呼吸道病原体的快速高通量筛查目前已取得了重要进展, 然而病原体在空气中的传播致病机理、大气污染对其活性的影响、有效传播距离等依然存在争议。局部地区军事冲突风险加剧, 生物气溶胶形式的大规模杀伤性武器的使用风险也在升高。此外, 空气中耐药基因成为新一类生物污染物, 其传播也得到了广泛的关注。通过集成空气采集、微流控以及多种生物传感器, 科学界在生物气溶胶的实时在线甄别、生物预警方面迈出了重要的一步。呼出气生物气溶胶也越来越被用来研究疾病的早期诊断筛查, 其中在医院环境中传播导致的感染受到特别关注。在生物防护与灭活控制方面, 如低温等离子体与纳米材料滤膜的研究, 科学界也取得了进步。该综述对生物气溶胶的过去、现在以及未来发展态势和前沿研究方向进一步凝练、讨论, 指出存在的科学问题与技术挑战。未来通过进一步加强多学科的交叉合作, 包括军民融合, 有望使得生物气溶胶的研究迈上新的台阶。

关键词 生物气溶胶, 人群健康, 生物安全, 公共卫生, 气候变化

生物气溶胶, 通常是指空气动力学直径在100 μm 以内的含有微生物或来源于生物物质的气溶胶^[1-6]。生物气溶胶颗粒包括病毒、细菌、真菌、花粉、过敏原、立克次体、衣原体、动植物源性蛋白, 各种菌类毒素和它们的碎片和分泌物等^[2,3]。生物气溶胶在传染病、公共卫生、大气环境、食品安全、生态环境、气候变化、生物反恐、疾病检测以及环境与健康等方面均有重要影响。最早的生物气溶胶研究可追溯到1833年, 查理斯·达尔文采集到了空气中的霉

菌孢子。1900年, 有关温度因素在潮湿空气中对细菌的作用的文章揭开了人类研究生物气溶胶的序幕^[7]。1908年, *Science*报道了第1篇有关空气中细菌液体撞击采集的新方法^[8]。经过一个多世纪的发展, 生物气溶胶领域文章逐年增多, 且呈现较强发展势头, 最近每年发表文章接近300篇, 其中在*Journal of Aerosol Science*上有4次专刊(J. Ho和D. Griffiths(客座编辑), 1994年; J. Lacey(客座编辑), 1997年; S. Grinshpun(客座编辑), 2004年; M. Yao(客座编辑), 2017年), 在

引用格式: 郑云昊, 李菁, 陈灏轩, 等. 生物气溶胶的昨天、今天和明天. 科学通报, 2018, 63: 878-894

Zheng Y H, Li J, Chen H X, et al. Bioaerosol research: Yesterday, today and tomorrow (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 878-894, doi: 10.1360/N972018-00121

Aerosol Science and Technology(J. Macher(客座编辑), 1999年)和*Clean Soil Air Water*(S. Grinshpun(客座编辑), 2008年)也各有1次专刊。相关研究人员主要分布在美国(35.3%)、德国(10.0%)、中国(7.9%)、波兰(5.9%)、韩国(5.4%)等国家(Web of Science, 数据截至2017年12月8日)。在每年气溶胶领域的国际前沿会议包括欧洲、美国气溶胶协会年会中,也都设立了生物气溶胶分场或专场研讨会。从研究进展来看,目前生物气溶胶的研究主要集中在捕获监测、灭活防护、大气环境与健康等方面,并取得了快速的进步。但由于不同学科的学者局限于自己的研究领域,相互间缺乏沟通与合作,在气溶胶传播致病机理等方面仍存在争议,对一些关键的科学问题,如生物气溶胶在大气环境中的作用及其与人体的交互机制等的了解仍非常有限。

由北京大学环境科学与工程学院要茂盛教授牵头组织申请,于2017年6月29~30日在北京召开了以“生物气溶胶与人类健康、国家生物安全及大气污染”为主题的第600次香山科学会议,这是首届生物气溶胶香山科学会议。来自国内外包括北京大学、清华大学、耶鲁大学等世界著名研究机构及政府部门的47名专家学者受邀参加会议。在会上,专家学者主要讨论了:(1)生物气溶胶来源排放、传播、感染致病机制及影响因素与人畜共患疾病;(2)生物气溶胶捕获、生物传感监测、洗消防护新方法理论体系与国家生物安全;(3)生物气溶胶与大气污染及灰霾形成机制、颗粒物毒性监测预报及人体健康效应等。过去10年,生物气溶胶领域发生了巨大变化,包括研究方向、研究对象、研究人员、研究广度等方面。总的来说,在人体健康、生物反恐及大气生物气溶胶方面均取得了重要进展。该综述是在第600次香山科学会议基础上,对生物气溶胶领域的前沿进展包括其来源、分布,气候、健康效应,生物气溶胶的传播及影响因素以及防护等进一步阐述,厘清与人群健康的关系,指出存在的问题,对未来发展态势以及前沿研究方向进一步凝练与讨论,为生物气溶胶的未来研究提供参考。

1 生物气溶胶的来源及时空分布

空气中所有生物成分都来自地面的排放。生物气溶胶在自然和人类环境中广泛存在,人们每天生活的环境中处处存在着各种各样的微生物^[9],甚至在平流层高达80 km的空中都发现了微生物^[10,11]。生物

气溶胶主要来源于土壤、植被、水体等面源排放和动物(包含人类)、医院、养殖场、垃圾填埋场、污水处理厂等点源排放^[12~22]。如图1所示,常见的微生物气溶胶粒径分布范围为10 nm(小病毒颗粒)~100 μm (大花粉颗粒)。例如风媒植物花粉颗粒的典型粒径在15~58 μm ,真菌的典型粒径在1~30 μm ,细菌的典型粒径在0.25~8 μm ,病毒的粒径则小于0.3 μm ^[23]。不同来源、不同粒径的生物气溶胶颗粒在空气中悬浮的时间不同,因而健康危害也存在显著差别。

如上所述,土壤是生物气溶胶最重要的自然源,空气细菌的种类与土壤中细菌种类相似。Cao等人^[24]研究表明,北京冬季空气中的昏暗地嗜皮菌相对丰度很高,而该菌就常存在于干燥的土壤环境中。空气细菌浓度也受到植物生长与农业活动的影响,研究植物附近的空气中菌群结构与下风向的空气样品十分相似,而与上风向则差异较大,表明顺风空气样本中的空气细菌可能来源于当地植物^[25];且不同植物表面微生物的种类和数量不同,如玉米叶片表面的细菌低于小麦^[26]。在不同季节,农业活动会对周边空气中的微生物结构造成一定的影响。此外,一些自然现象,如降雨过程中也会影响空气中微生物的浓度。一方面,降雨会对颗粒物表面附着的细菌有一定的冲刷作用;另一方面,雨滴会导致植物和土壤产生的生物气溶胶大量排放到空气中^[27],如一滴雨可以使得土壤中0.01%的细菌排放在空气里^[28]。研究表明,降雨过后,空气中的花粉、真菌和内毒素浓度均有明显升高^[29],潜在的致病菌的相对丰度也会增加^[30]。除了自然源,人类本身和其活动也能够持续

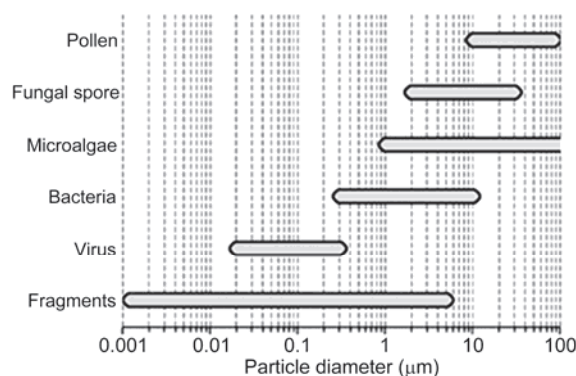


图1 典型的生物气溶胶颗粒粒径范围,其中碎片来自细胞、植物、生物膜以及沙子与岩石^[23]

Figure 1 Approximate size range of various individual bioaerosol particles. Fragments include, for instance, parts of cells, plants and biofilms or the crust on sand and rocks^[23]

地造成室内外微生物空气污染,人体携带无数种细菌,分布在人体内外各个部位.其中,人产生的呼出气,在1 h内会向环境中释放3.1 mg微生物颗粒物^[31],每小时可向空气中释放流感病毒的基因拷贝数为 $2.2 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^5$ 个^[32].患有呼吸道疾病的人还可以通过呼吸排出流感病毒、呼吸道合胞病毒等.研究指出,通过呼出气排放的细菌总数约为人体总排放的17%^[33].人类活动释放的微生物对室内菌群结构有一定影响,室内微生物的浓度大概至少是室外的10倍^[34,35].不同来源的微生物种类、排放浓度以及毒性都不同.

此外,一些非自然的活动如农业活动、污水处理和动物饲养等也是生物气溶胶的重要来源^[12-15,20],这些微生物中包含多种潜在的机会致病菌或病原体.在污水处理过程中,污水中的微生物形成微生物气溶胶,其中潜在的致病菌(包括一些耐药菌)会对污水处理厂内的工作人员造成暴露健康风险,例如过敏性鼻炎、哮喘、慢性支气管炎以及过敏性肺炎等^[20,36].同样,使用污水处理厂的剩余活性污泥施肥也会对大气环境造成污染^[37].制药污水处理厂中耐药菌和机会致病菌的浓度比普通社区和市政污水处理厂的浓度更高,其附近的职工和居民的潜在健康风险也更高^[38].动物饲养和繁殖过程也会产生生物气溶胶,释放到动物笼舍中,进而传播到周围的环境中,导致人畜传染性动物病原体的传播,危害人类和动物的健康^[19,22,39].此外,这些动物养殖场、废水处理厂也会排放耐药基因到空气中,从而对周边环境构成额外健康风险.室内的宠物和植物也是微生物气溶胶的重要来源.Barberán等人^[40]解释了动物,尤其是狗和猫对室内菌群结构的贡献:在有狗和猫的房间内,分别有56和24种细菌菌群丰度有明显增加.狗导致了卟啉单胞菌、莫拉克斯氏菌、拟杆菌属、节杆菌属和奈瑟氏菌属的丰度变化,猫与芽孢八叠球菌属、普氏菌属、莫拉克斯氏菌属和双歧杆菌属的丰度变化相关^[41].作为特殊的职业环境源,废水处理厂及动物饲养、宠物等释放的生物气溶胶对人体健康的影响存在不同,例如存在动物的卫生免疫假说.

生物气溶胶的二次悬浮排放也成为近年来研究的热点之一.粒径较大的生物气溶胶颗粒,由于重力作用会沉降于地面.例如,室内物品表面、地面长期沉降沉积的灰尘中均可能存在大量的病原微生物.当人员走动或清扫卫生时,造成污染物二次悬浮扩

散,为微生物污染物的传播提供动力^[42].同时,人通过触摸等方式接触物品表面(尤其是医院和地铁等公共场所),再触摸其他表面,也会传播扩散微生物污染物^[43].此外,长期放置的空气加湿器中也会有大量微生物沉积和繁殖,当再次打开加湿器时,微生物会随气化的小液滴释放到空气中,并且由于空气湿度增加,部分微生物更易于繁殖传播.室内空调通风循环系统、过滤膜和汽车空调过滤膜中沉积富集的微生物,也会在空调打开的瞬间排放到空气中,造成微生物的室内空气传播^[44,45].在大型楼宇建筑里,在冷却塔水中检测到军团菌^[46].研究还发现,在医院环境内,在烧伤护理病房或ICU中不同过程产生的传染性气溶胶会导致交叉感染^[47,48];使用氧气面罩、牙科的电动设备以及手术过程也会有空气污染的风险^[49,50].此外,废水的飞溅以及家庭卫生间的冲水,都有可能引起病原体的空气传播^[51,52].某些源释放的细菌中还可能含有耐药菌(如废水处理厂、医院环境等),进而对气候、大气环境、人体健康与生态环境等造成潜在危害.以上这些都是生物气溶胶的重要排放源,通过空气可传播到不同的环境中.

生物气溶胶的排放量受到气象条件、季节、污染条件和土地利用类型的影响.Heald和Spracklen^[53]模拟了北美、欧洲、亚洲和南美地区1~12月的生物气溶胶排放浓度(图2),结果显示生物气溶胶的排在夏季呈现顶峰的态势,冬季较低,这取决于气候因素.而南美的生物气溶胶排放浓度明显高于其他3个大洲,这可能是由于南美的雨林覆盖度高,自然排放量大.模拟结果还显示,全球生物气溶胶的年排放量在1000 Tg左右,其中细菌排放量为0.4~28.1 Tg,真菌孢子的排放量为8~186 Tg^[4,5,23,53].在中国,不同气候条件的城市间,生物气溶胶浓度、粒径分布及种群结构有明显不同,北京的浓度明显高于其他城市;污染严重的城市地区生物气溶胶浓度明显高于乡村地区^[34].而在印度,冬季空气中可培养的细菌气溶胶浓度明显低于夏季,真菌气溶胶浓度则与夏季相似^[54].研究指出发生灰霾时,有活性的生物气溶胶的浓度显著升高,而随着灰霾的持续,其浓度逐渐下降;灰霾中主要细菌种类为芽孢杆菌、甲基杆菌以及乳球菌等^[55,56].此外,在灰霾天气的内毒素水平显著升高^[55],研究发现内毒素与自然界来源元素如 K^+ 呈正相关,而与人类源元素如As呈负相关^[57].但也有研究提出,影响细菌群落的主要因素是气象条件,灰

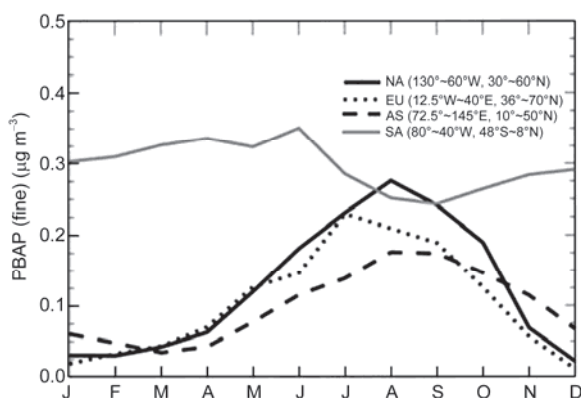


图2 细生物气溶胶颗粒(PBAP)季节性变化的平均模拟结果. 北美(黑线)、欧洲(点线)、亚洲(虚线)和南美地区(灰色线)^[53]

Figure 2 Seasonality in mean simulated fine mode primary biological aerosol particle (PBAP) surface concentrations over indicated domains. North America (NA, solid), Europe (EU, dotted), Asia (AS, dash) and South America (SA, grey)^[53]

霾发生时细菌群落的差异更多是由于气象因素导致^[58]. 研究还指出, 不同土地利用类型对空气中的菌群结构也会有所影响^[59]. 生物气溶胶种类结构的影响因素仍存在科学争议.

2 生物气溶胶的气候效应

近年来, 生物气溶胶的气候效应, 引起了科学家的广泛关注, 逐渐成为生物气溶胶领域乃至气溶胶领域研究的热点问题之一^[5,12,14,60-62]. 生物气溶胶的气候效应在文献中的报道主要表现在如下3个方面: (1) 生物气溶胶作为大气气溶胶的重要组成部分, 可通过吸收和散射太阳辐射与地面长波辐射, 影响地-气辐射平衡, 进而直接影响气候^[63]. (2) 生物气溶胶可以通过成核作用影响云的形成, 进而间接影响全球气候变化^[5,61,62]. 在大气环境中, 能够作为冰核的已知生物气溶胶颗粒包括花粉、藻类、真菌、地衣、昆虫、落叶和浮游生物等^[2]. 研究表明, 某些细菌类生物气溶胶可以作为有效冰核(ice nuclei, IN), 如假单胞菌、成团泛菌、黄单胞菌、腐质霉属和高山被孢霉属等^[5,64]; 或活性云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)^[5,65], 参与成云、成雨过程, 从而影响云的光学特性、云量和寿命等特征. 云中的细菌浓度可达 10^5 个/mL, 真菌和酵母浓度达 10^4 个/mL, 可培养的微生物主要有假单胞菌、鞘氨醇单胞菌、链霉菌、红球菌和芽孢杆菌等菌属^[14,61,65,66]. 一项研究指出, 在北京的雪样里也检测到大量的细菌, 包括优势芽孢

杆菌属^[65]. 最近的研究还在云水中检测到了蓝细菌、甲基杆菌和草酸杆菌等, 这些微生物可以抵御云层的恶劣条件^[67]. 研究表明, 生物气溶胶在原始热带雨林生态系统和中纬度半干旱地区森林生态系统中的水文循环过程中起着关键作用^[27]. 生物气溶胶的成核作用与其所存在的高度有关, 在某些高度, 生物气溶胶颗粒的成核作用并不明显^[68], 而生物成分相对于非生物成分能够在较高的温度下成核^[62]. 但是, 目前在冰核的影响程度方面, 例如形成冰核的量在大气环境中是否足以对云的形成以及气候变化产生影响等问题上仍存在争议. 同时, 一些研究也指出在原生态的空气中的冰核应该大部分是生物气溶胶颗粒, 相对来说对云的形成具有较大影响^[69], 生物颗粒既可以独立悬浮在空气中成为冰核, 又可以附着在其他有机和无机颗粒上, 共同发生作用^[62]. (3) 生物气溶胶还会参与大气物理和化学过程, 从其他方面改变大气物理化学性质, 从而影响气候. 微生物对大气化学可能有多方面的作用, 一是对有机碳进行降解, 二是对氧化物如过氧化氢等具有降解作用, 由此对大气污染物的清除过程产生负面影响, 并降低云氧化能力^[70]. 生物气溶胶还可能参与大气化学反应过程以及污染物的转化. 研究认为, 气溶胶作为大气颗粒物的凝结核, 可进行一系列非均相化学反应, 调节pH, 还可以中和碱性基团^[71], 这些气溶胶颗粒物也可能是细菌, 但相关研究目前尚未展开. 在空气相对湿度较大的时候, 细菌表面形成一层水膜, 可吸附空气中 NH_3 , NO_x 和挥发性有机化合物(VOCs)^[63]. 同时, 细菌在高湿度环境下具有很强的活性, 在不同的外界环境下, 细菌本身可以作为氧化剂或者还原剂. 冬季边界层压缩, 污染物不易扩散, 在这种气象条件下, 细菌就很可能作为雾霾的催化剂之一, 推动大气中氧化还原反应的进行. 因此监控细菌的排放来源, 如地表、污水处理厂和养殖场等, 研究不同细菌对灰霾过程的可能影响等具有重要意义. 此外, 通过人工排放或引入冰核细菌到大气中有可能改变一个地区的气候与生态条件, 这些是未来可以利用生物气溶胶来为人类可能做的有益之事. 图3是生物气溶胶在地球生态系统中的循环示意图, 展示了其来源、归趋、可能的转化, 以及对大气环境的影响.

在对大气环境的影响中, 生物气溶胶在大气物理化学扮演的角色近年来已成为气溶胶领域新的热

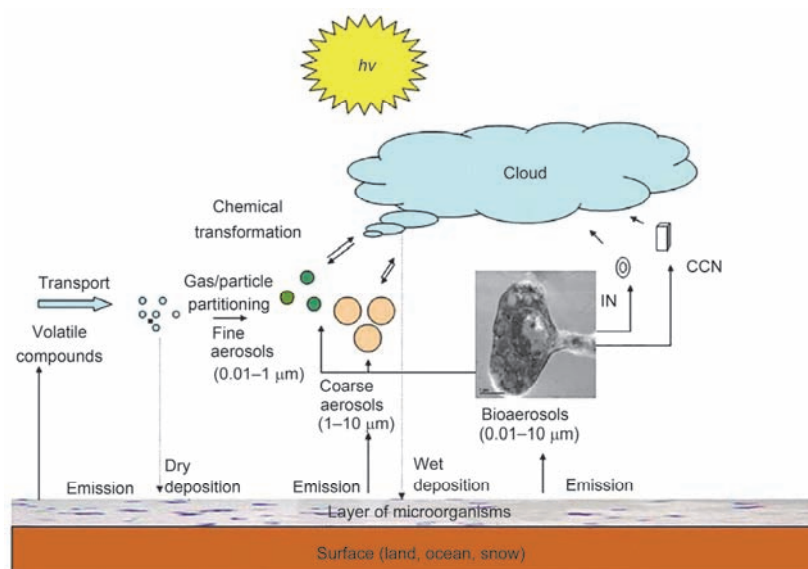


图3 地球生态系统中生物气溶胶循环过程简图^[72]

Figure 3 Simplified schematic of bioaerosols cycling in the Earth's ecosystem^[72]

点方向,越来越多地得到关注和证明^[14]。然而,因为生物气溶胶化学本身的复杂性,科学家面临的问题依然很多^[72]。但不可否认,越来越多的研究指出生物气溶胶具有非常重要的气候效应,在全球气候变化中扮演着重要角色。

3 生物气溶胶的健康效应与国家生物安全

作为大气颗粒物的主要成分之一,生物气溶胶的健康效应也日益受到关注。生物组分的健康效应在文献里关注的主要有过敏性疾病、呼吸系统感染与癌症、病态楼宇综合症等。致敏是生物气溶胶常见的健康效应之一。许多细菌、真菌可以分泌过敏原,引发过敏反应。对于儿童哮喘与环境中的细菌暴露量间的关系进行研究,结果表明,儿童长期暴露于高浓度的不动杆菌属、乳酸菌属、奈瑟氏菌属、松树葡萄球菌等中,其患哮喘和枯草热的几率与所暴露细菌的浓度成正比^[41,73]。空气中很多常见的真菌,如曲霉属、枝孢属、青霉属和微球菌属的暴露均与白介素-6(IL-6)和白细胞数(WBC)水平有显著的正相关性,进一步可能引发过敏性呼吸系统疾病,老年人的相关性比年轻人更强^[74]。Shang等人^[75]指出,内毒素是大气颗粒物引发炎症因子释放的关键因素之一,中国北京地区空气中内毒素的含量约为10.25 EU/mg PM_{2.5}(0.38~1627.29)^[76],发生灰霾时空气中内毒素含量是清洁天气的2倍^[55];美国西部高原的9个农场中,

89%的工人内毒素暴露水平超过健康标准^[39]。此外,内毒素还是一种致热源激活物。暴露于高水平的内毒素可引起血压迅速升高^[76],可见内毒素作用机制在大气颗粒物引起的健康效应中扮演着不可忽视的角色。有研究分析认为空气污染与气候变化进一步恶化了过敏性疾病的状况,空气中的污染物可以改变过敏原的特性,同时使得更多人向过敏性体质倾斜^[77]。最近的一些研究指出,微生物的存在比如真菌孢子显著影响大气颗粒物的氧化能力,而且能够产生活性氧簇(ROS),不同生物气溶胶种类产生不同的ROS,从而显著影响颗粒物的健康效应^[78,79]。北京大学科研人员利用活体酵母菌传感系统(SLEPTor)实现了在单个蛋白分子水平上对颗粒物毒性的实时在线表征^[78]。然而也有研究指出生物气溶胶的早期暴露可能对一些过敏性疾病如哮喘等有保护作用,例如在农场长大的儿童到成年时不易患哮喘^[75],儿童早期的内毒素暴露,可能与其哮喘发病率成负相关关系^[80]。研究还指出,真菌多样性的降低会促进过敏性疾病的发生^[81],而在养宠物如狗的家里,儿童患哮喘的几率很小^[80],金黄色葡萄球菌的感染可能也与哮喘的发病率呈负相关关系^[82]。

此外,生物气溶胶中的病原微生物,会直接导致呼吸系统感染的发生。呼吸系统疾病每年造成全球近500万人次的伤亡^[83],致病菌的空气传播使得这种状况更加严峻。研究表明,病原体的空气传播是导致

呼吸系统感染大规模爆发的重要原因^[52,84]。婴儿在出生时,鼻咽喉部位是无菌的,随着与大气环境及周围人群的接触,逐渐发生细菌的定植,形成一个菌群平衡状态。这种动态平衡的微生态系统,对人类健康有积极的作用^[85]。许多潜在的病原体也会定植在人体的上呼吸道中,如肺炎链球菌、流血嗜血杆菌、卡拉莫他菌和金黄色葡萄球菌等^[86]。通过呼吸暴露,人体也会吸入空气中的致病菌,改变原有的共生益生菌含量,打破稳态平衡,使机会致病菌趁虚而入。当呼吸道中的菌群结构平衡一旦被打破,某种优势微生物大量繁殖,那么就会造成呼吸道细菌感染或者病毒与细菌协同感染^[87,88]。此外,这种不平衡的状态也会引起细菌病原体的过度繁殖或者新的病原体入侵,造成呼吸道入侵式感染。研究指出,对于细菌呼吸系统感染的病例,大部分是由流感嗜血杆菌造成,而且一些耐药细菌如耐甲基西林金黄色葡萄球菌(MRSA)可以通过呼出气释放在环境中^[89],儿童哮喘的发生与莫拉菌属呈正相关^[90]。由气溶胶传播导致的呼吸系统感染仍然是危害人类生命的一大杀手,尤其是对低龄儿童。

此外,研究报道生物气溶胶特别是真菌释放的毒素还可能引发癌症。比如,已有研究报道了生物气溶胶暴露和某些特定癌症之间可能的关联^[3]。Johnson和Choi^[91]研究了肉类/家禽业工人的肺癌风险,即使控制吸烟,肺癌发生风险仍增高约30%,可能是由于肉类和禽类作物工人暴露于高浓度的生物气溶胶,包括粪便、皮屑、羽毛和微生物(例如病毒、内毒素、真菌和细菌)。在猪的养殖场中,由于高浓度内毒素暴露,也导致肺癌发生风险增加^[92]。此外,在一个有46819名家禽/非家禽类工人的探索性研究中,屠宰鸡可能会导致脑癌患病风险升高^[93]。这些研究都说明生物气溶胶作为大气环境的重要组成部分,对人体健康具有非常重要的影响,尤其是在室内环境内,生物气溶胶对人体健康的积极与负面的影响如病态楼宇综合症可能远比我们现在了解的复杂。比如,不同地区空气中的微生物(包括细菌、真菌等)对人体健康的影响目前还是未知数。未来,人类或许可实现通过改造室内空气微生物来营造一个健康的室内环境,包括利用微生物降解有毒有害化学气体等。除此之外,生物气溶胶也可能被恐怖分子或不负责任的个人、团体或国家用作大规模杀伤性生物武器,严重危害世界和平与人民财产安全。生物气溶胶危害实时

预警在国家生物安全、生物反恐领域举足轻重。

4 生物气溶胶的传播及影响因素

4.1 生物气溶胶在大气中的传输

大气中的生物性颗粒和非生物性颗粒主要是通过大气的气流进行迁移,沉降和沉积到达地面和植物表面以及被降雨冲刷而得以去除^[30]。根据颗粒物的粒径和空气动力学的特征,生物颗粒在大气中的平均停留时间的范围很广,从不到一天到几周不等。例如,花粉的粒径在100 μm 左右,因而其在大气里停留的时间较短,真菌孢子在大气中的停留时间大约为30 min,而粒径小的颗粒物如内毒素、过敏原等的停留时间能够达到60 h,粒径在100 nm以下的颗粒物如病毒的停留时间也能够达到60 h或更长^[94]。生物气溶胶颗粒的大气传输和气象条件如风等密切相关。不同粒径的生物气溶胶颗粒在大气中停留时间不同,因而对健康、生态环境的影响也不同。

大气中生物气溶胶的传输机制是其在大气反应过程中发挥作用的基础。通过大气的传输,足够量的生物气溶胶被传输到其相对应的大气环境中。大气对于微生物的传输体系包括多种源的释放如土壤、海洋、植物以及人与动物等,大气中的输送和沉降^[3]。第一步是微生物经扰动气化进入空气中。微生物释放进入大气主要取决于表面覆盖物的类型和不同生态系统(城市、乡村、森林、沙漠、海洋等),并且也随着昼夜交替和季节的变迁产生暂时性的变化^[59,95,96]。以海洋释放的生物气溶胶为例,气泡存在于包含有细菌的液体中,当气泡破裂时,细菌就会随着气流和液滴一起向上喷射^[97]。对于固体表面(土壤和植被)生物气溶胶的释放,风速被认为是最主要的决定因素。风吹过水和陆地表面产生气溶胶,其中也包括生物气溶胶,使其悬浮在空气中并进行传输^[98,99]。一些真菌的分生孢子可以通过一些气象因素如风速、温度、湿度等产生扰动,使得其气溶胶化^[100]。降雨会导致空气中花粉、内毒素和葡聚糖浓度的升高,真菌孢子浓度也升高^[27,29]。研究发现,沙尘天气室内和室外区域的生物气溶胶(细菌和真菌)浓度都显著增加,主要的细菌成分是芽孢杆菌属、微球菌属、链霉菌属和葡萄球菌属,革兰氏阳性菌的浓度高于阴性菌^[101],并且沙尘携带许多不同类型细菌进入下风向地区,对其生态环境和气候变化产生潜

在的重要影响(<https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2017-1172>). 此外, 候鸟在繁殖地和越冬地之间的迁徙, 也是生物气溶胶尤其是流感病毒远距离传输的另一途径. 候鸟中, 禽流感通常呈现低致病性, 但是通过种间传播, 可能出现致病性增强的现象, 从而对候鸟、家禽及人类构成了一定的威胁^[102,103]. 通过大气或其他媒介传播, 不同地区生物气溶胶颗粒混合在一起, 可能还会传递耐药基因等.

从对于空气传播的颗粒物的直接观测来看, 真菌由于其疏水性能在大气中大部分可能以单个孢子、聚合体或者碎片的形式存在^[104,105]. 而对于细菌来说, 大部分通过空气传播的有活性的生物气溶胶会与颗粒物吸附在一起^[106]. 研究发现, 在空气中的群簇性细菌颗粒表面会发现被类似于黏液物质所包围, 这些残留能够为大气中的细菌提供吸附颗粒物并以此为养料而存活的条件^[95]. 大气中的生物颗粒物可以说是无处不在, 通过大气或其他媒介输送可以传播到地球的任何角落, 从而对当地的气候、生态与健康产生不可忽略的影响.

4.2 病原微生物气溶胶的传播

世界卫生组织发布的报告显示, 2012年造成人类寿命损失的前3位原因分别是缺血性心脏病、下呼吸道感染(如肺炎)和中风, 由下呼吸道感染而导致的死亡人数为每年310万人, 位于全球前10位主要死亡原因的并列第3位, 是唯一的感染性死因(http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2014/en/). 2013年, 5岁以下儿童中由于急性下呼吸道感染而导致的死亡人数占总死亡人数的15%(http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2015/en/), 仍然是低龄儿童的一大杀手. 空气中除了自然的微生物外, 有各种呼吸系统感染的病原体微生物,

这些病原微生物通过空气传播^[52,83], 会引起有机体的传染性疾病, 过敏, 或者毒性作用, 也会影响局部、地区和全球的农业. 2003年严重急性呼吸综合征(SARS)病毒的爆发流行, 证明空气传播是其重要的传播方式^[107]. 2001~2002年在美国的生物恐怖事件中人员的伤亡也是由于吸入释放于空气中的炭疽引起的^[108], 而H5N1流感病毒也被证明可在雪貂间通过空气传播^[109]. 当传染性的病原微生物颗粒的粒径足够小时, 可以在空气中存留较长时间, 并传播到很远的地方, 气溶胶的远距离传输就会发生.

大部分微生物在室内的传播都是由飞沫传播或微生物气溶胶的空气传播造成的. Wells^[110]提出最早也是最经典的空气传播理论, 即生物气溶胶的传播方式有3种: 尘埃、飞沫(droplets)和飞沫核(droplets nuclei, airborne transmission). 世界卫生组织根据飞沫粒径大小为5 μm 来界定飞沫核传播($\leq 5 \mu\text{m}$)和飞沫传播($> 5 \mu\text{m}$). 对于同一种病原体, 也可能同时通过不同的形式进行传播. 根据飞沫粒径的不同, 可将其分为短距离传播(个体之间的, 距离一般小于1 m)和长距离传播(一般距离大于1 m)两种途径^[51,111]. 短距离空气传播途径主要是基于传染源与易感者之间的近距离接触^[51]. 飞沫核中的病原体由于有蛋白质膜壳的保护, 不易受到干燥和其他理化因素的影响, 能存活相当长的时间, 其传播能力和致病性也较强^[112]. 这些传播都会受到个体、呼吸模式如打喷嚏、咳嗽等因素的影响. 此外, 儿童与成人的传播模式也应该有所不同, 原因之一可能是由于呼吸高度不同. 儿童具有更强的地面活动力度, 微生物二次悬浮的力度也存在很大的差别.

通过呼吸传播疾病的过程机理已有报道. 图4展示了一个气溶胶烟羽, 可能是由咳嗽引起的一种病原体传播过程^[52], 三种不同大小的圆圈表示不同粒

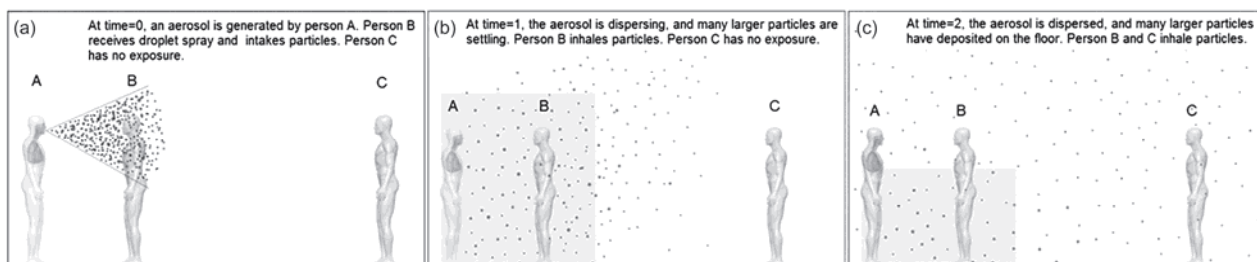


图4 咳嗽或呼吸引起的随时间变化的气溶胶传播和扩散模拟图^[52]

Figure 4 Schematic of aerosol emission and dispersion over time. Made by Carlyn Iverson, used with permission from the Center for Infectious Disease Research and Policy^[52]

径的颗粒物. 近距离接触烟羽的人, 颗粒物直接撞击面部, 并吸入呼吸道中. 随着时间的推移, 气溶胶粒子在空气中不断扩散. 相比小粒子而言, 由于重力作用, 粒径大的颗粒物在会迅速沉降, 因此只能在短距离内传输. 粒径小的粒子则不断在环境中扩散, 并传播至较远的距离, 导致远离传染源的人也有吸入风险. 易感人群B和C的暴露剂量受多种因素影响, 如人的呼吸速率和暴露面积, 以及病原微生物的浓度和存活能力等. 由此可见, 患病者产生的气溶胶不仅会导致附近人群的病原体暴露^[113]. 这些传播机理的描述与当时的环境温度、湿度、风速以及人体的活动力度等因素有关.

然而, 对于一些特定的疾病如禽流感, 其空气传播仍存在争议, 这主要受限于对“空气影响其活性”的认知不足^[104]. 一项研究在家禽饲养和批发市场周围的空气样本中检测到了禽流感病毒AIV的RNA, 养殖场中的浓度为 4.4×10^5 copies/m³, 下风向100 m处浓度为 2.6×10^4 copies/m³. 病毒在下风向的衰减速度较慢, 且由于每天大量的家禽流通, 即使没有直接接触的情况下, AIV也可能通过空气传播给附近居民, 带来感染风险^[114]. 越来越多的研究表明, 不同的病毒在空气中传播疾病的能力与可能存在很大的差别.

4.3 生物气溶胶传播的影响因素

影响微生物气溶胶在传播中活性变化的因素很多, 除微生物固有的属性外, 其在传播过程中会受各种环境因子的影响, 例如温度和相对湿度的变化、紫外辐射以及大气中的气体和污染物作用^[115,116]. 温度和湿度通常被认为会影响微生物的空气传播, 同时也会影响其传染性, 例如, 传染性颗粒的粒径会由于温湿度的变化而改变. 但是温度、湿度对病毒、细菌和真菌的影响有所不同^[51,117,118]. 例如, 有研究指出高湿度对病毒有杀灭作用^[119]. 病原体在空气中传播, 还会受到辐射的作用, 包括紫外辐射以及长波和可见光的辐射等. 其中, 紫外辐射波长短、能量强, 可以破坏病原体的DNA; 长波和可见光会影响酵母菌和细菌线粒体中的细胞色素^[120~123].

与室内传播相比, 微生物的室外传播受到的影响因素更复杂, 即使是光照和温湿度都相同的情况下, 室外(尤其是城市内)环境对微生物的毒性影响仍比室内更强^[115]. Cox^[121,122]将这些影响病原体活性的因素归结为室外因素, 包括污染物浓度、相对湿度、

大气压以及空气离子等. 例如, 臭氧会诱导膜磷脂的脂质过氧化反应, 导致细胞膜的完整性被破坏, 从而抑制真菌的活性^[124,125]. 对于大气污染物对过敏原的作用, 研究有相反的结果. 多项研究表明, 城市大气污染的加剧会导致花粉过敏发病率的增加^[127]. 大气中的气体, 如NO₂和O₃会对蛋白进行转译修饰, 增强空气过敏原(如桦树花粉、豚草和曲霉孢子等)的致敏潜力^[77,128]. 研究还发现, 气相污染物对不同的花粉蛋白质有特异性的作用, 例如酪氨酸残基的硝化和半胱氨酸残基的亚硝基化, 这些反应都是过敏发病率增加的可能原因^[129]. 空气污染和环境因素对微生物的影响十分复杂, 不同种类微生物对环境因素的响应存在很大的差别, 仍需要进一步的探究, 例如污染物对病原体的灭活作用与促进作用机制等.

5 生物气溶胶的检测方法

传统的微生物气溶胶检测一般采用离线分析的方法, 即先采样后分析. 目前常用的采样方法包括重力沉降法、液体或固体撞击法、静电采样法和膜采样等. 常用的离线分析方法主要包括培养、染色与显微镜观察、基因扩增(包括高通量测序等)、酶联免疫等. 培养技术可以用于定性和定量研究, 但由于其采样和培养的局限性, 基于碰撞的收集技术对于较小的微粒收集效率很低, 并且空气传播的微生物中只有少部分可以被培养, 因此培养法不能检测重要的微生物物种和不可培养的部分. 有研究通过油膜的方法对撞击法进行了改进, 一定程度上避免了颗粒反弹、干燥效应以及生物嵌入的现象^[130]. 目前生物气溶胶采集技术更多关注在大流量快速捕获技术, 例如每分钟采集1000 L空气的便携式HighBioTrap采样器^[131]. 在生物气溶胶分析方面, 过去利用分子生物学技术(如聚合酶链式反应(PCR), 定量PCR(qPCR)和逆转录PCR (RT-PCR))可以检测非可培养的细菌, 从而提高了对空气中微生物群落的理解和对相关风险的估计. 近年来, 环介导等温扩增(LAMP)的方法也开始应用于空气微生物的检测, 尤其是病原微生物的检测, 具有反应灵敏、检测限低等特点^[88]. 最新的研究表明, 利用微流控与LAMP可以实现空气中的病原体的检测^[132], 并且针对空气中低浓度病原体的快速检测, 研发了大流量快速生物气溶胶采样器, 其切割点为2 μm, 每分钟可采集1000 L空气, 对于快速富集等起到重要作用^[131]. 另一方面, 针对非可培养的生物组分,

例如内毒素、葡聚糖、过敏原等,则使用基于生物化学的方法(如酶联免疫法和鲎试剂法等)检测和分析。

生物气溶胶的实时在线检测是一个长期存在的挑战,越来越多的研究开始关注实时在线监测技术,包括生物气溶胶质谱法(BAMS)、表面增强拉曼光谱(SERS)、以及用荧光染料的流式细胞术(FCM)。使用质谱分析法,通过荷质比来分析微生物,可实现快速、实时的分析^[133,134],但是由于微生物组分复杂,缺乏特征谱峰,其在微生物气溶胶领域的应用并不广泛。荧光空气动力学粒度计(FLAPS)经常被描述成活性微粒的前端视觉感应器,通过使用340~360 nm的紫外线来测量FCM下的荧光信号。紫外气溶胶粒径分析仪(UV-APS)和宽频带集成生物气溶胶传感器(WIBS)是基于FLAPS原理而改进的微生物气溶胶在线监测仪器,目前研究及应用较多。UV-APS是单波段激发、单波段荧光检测的微生物气溶胶监测仪器,而WIBS则是目前代表性的双波段激光激发、多波段荧光检测的实时监测仪器。近年来针对WIBS监测性能、数据分析的相关研究逐渐增多,并开始将其用于热带雨林、城市、城郊等地区的微生物气溶胶连续观测,为微生物气溶胶的特征分布及排放研究等供了重要信息。但是,由于环境基质的影响、粒子大小影响以及无法检测细菌孢子等无荧光特性或荧光信号较弱的物质,其监测结果仍有待考究。此外,UVAPS和WIBS最大的缺点是不能鉴别物种,而且受到来自环境背景信号的影响很大。

此外,基于DNA、电学和纳米生物传感的技术正在成为有前途的生物气溶胶实时检测的平台。通过将生物识别分子和传感元件相结合,将生物信号转化为其他可检测的信号。例如表面等离子体共振生物传感器^[135]、压电晶体生物传感器^[136]、电化学生物传感器^[137]和硅纳米线场效应晶体管(SiNW-FET)生物传感器^[138]等。硅纳米线传感器通过场效应晶体管(FET)将分子结合瞬间转变成微电子信号,由于其灵敏度高、选择性好以及快速检测(电信号可以直接读数)的优点,已经被广泛用于检测化学物质、生物分子、病毒等^[138,139]。过去研究学者提出了通过集成空气采样、生物传感以及信号传输等技术GREATpa来实现生物气溶胶的实时在线监测^[3,139](<http://science.sciencemag.org/content/316/5825/695/tab-e-letters>)。Shen等人^[140]结合GREATpa与呼出气快速采集,通过采集呼出气冷凝液,将其稀释100倍后直接利用SiNW-

FET生物传感器进行病毒检测,可以在几分钟之内检测到H3N2流感病毒,特异性高,检测限达29个/ μL 。近年来,呼出气中的生物成分如生物标志物日益被用来做疾病的早期检测^[141,142],也有研究利用空气中人体脱落的细胞DNA来做医学指纹鉴定^[143,144]。在呼出气采集装置方面,也取得了一定的进展,比如北京大学研发的BioScreen呼出气采集装置,能够在几分钟内采集200~300 μL 呼出气冷凝液^[89,145]。

上述技术方法在检测空气中的微生物方面有很大应用价值,但仍存在很多挑战,例如对于极低的试剂浓度,生物气溶胶样品体积必须足够大,这使得其应用受到一定限制。近年来,生物气溶胶领域和多学科的交叉研究,分子生物学、光学、电学、纳米技术等研究手段的引入,已经开始推动生物气溶胶检测的相关研究。生物气溶胶监测亟需快速的、既能广谱检测又能进行物种甄别的、低检测限、高灵敏度的监测技术。总的来说,通过集成空气采集、微流控技术以及快速响应的纳米生物传感器(图5),科学界已经向实时在线甄别空气中的生物成分迈进了历史性的重要一步。未来,在高通量实时在线甄别空气中的微生物种类上仍然存在相当漫长的科学之路。

6 生物气溶胶的防护

传统地,生物气溶胶暴露的预防和控制一般有3个层次的干预,即从源头上消除、切断传播途径和减少暴露。近年来,已经开发了各种新技术,包括过滤、紫外处理、化学消毒剂喷洒、光催化氧化、离子发射、低温等离子体和静电场等^[146,147],低温等离子体和静电场具有良好的研究应用前景。过滤是常用的气溶胶颗粒控制技术,空调系统中过滤器是不可少的组件。但是,过滤使颗粒物被截留聚集在滤膜上,使微生物有条件生长繁殖,成为二次污染源,微生物的二次污染也是过滤技术面临的问题^[3,148]。

纳米纤维过滤膜能高效过滤颗粒物,这方面研究较多,而静电纺丝是制备纳米纤维过滤膜的新兴技术^[149]。另一方面研究较多的是在过滤膜上添加抗菌材料(如碘、碳纳米管、银等)来抑制微生物生长繁殖。在一项最近的研究中,基于碳纳米管的过滤器被用于控制生物气溶胶,结果显示1.6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳纳米管对枯草芽孢杆菌的物理去除效率达到95%^[150]。研究表明,碳纳米管对大肠杆菌有很强的毒性,并且有收集和灭活空中微生物孢子的能力。另外,高效粒子

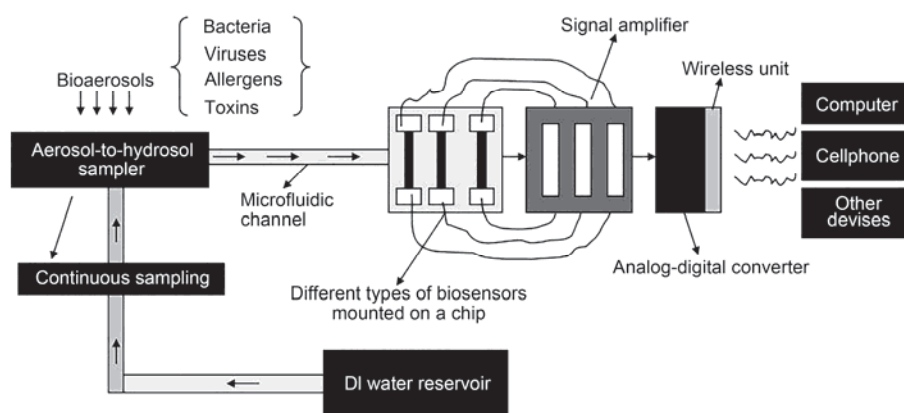


图5 集成不同技术实时在线监测生物气溶胶^[2]

Figure 5 Integration of different technologies for constant monitoring of biological aerosol exposure^[2]

空气过滤器-紫外空气过滤器也被用于控制微生物气溶胶. 对于个人暴露保护, 呼吸过滤口罩, 例如N95口罩和外科口罩都被广泛采用^[151]. 虽然添加抗菌材料可以抑制微生物在过滤膜上继续生长繁殖, 避免微生物二次污染, 但是也面临抗菌材料有效寿命短、对没有细胞结构的微生物(如过敏原、病毒等)灭活作用不明显等问题. 此外, 微生物过滤防护虽然效率较高, 但存在通气性差等技术瓶颈.

近年来, 一些其他生物气溶胶灭活的技术也日益兴起, 如低温等离子体^[152]、紫外辐射^[153]和微波辐射^[154]都已经用于控制生物气溶胶. 在办公楼宇内使用紫外杀菌灯照射通风系统的表面, 可使微生物和内毒素浓度明显降低, 有助改善病态楼宇综合症的状况. 在其他因素中, 湿度在紫外线杀菌灯的微生物灭活效率中起到重要的作用. 在最近的一项研究中, 将枯草芽孢杆菌暴露于2450 MHz微波辐射中1.5 min, 可以达到约70%的灭活率^[155]. 在另一研究中, 微波辐射与纳米纤维过滤器结合也被研究用来灭活生物气溶胶. 据表明, 微波辐射的功率水平和曝光时间在微生物灭活中起了重要的作用^[155]. 此外, 空气负离子也被证明可以有效地灭活空气中的生物制剂并控制疾病病毒的空气传播^[156]. 这些技术已经在实际环境中被应用或者有潜在的应用价值. 另一方面, 控制气流流动的方向, 例如在传染病人接受治疗的房间或医院里制造负压, 可有效地抑制空气中生物成分扩散到周围的微环境或污染源中, 因此来防止疾病的进一步传播^[3,7]. 一些比较简单的方法也可以有效控制有毒生物气溶胶, 比如尽量减少在公共场所的生物暴露. 例如在火车站、地铁、机场等公共场

所, 某些乘客可能患有传染性疾病, 其所携带的病原微生物可能通过呼吸、咳嗽、说话和打喷嚏等途径传播, 对人群造成很高的暴露风险, 因此这些场所需要有效的生物监测和有效的控制措施. 但是即使是在发达国家, 这些设备或措施也没有被妥善实施. 在未来的研究工作中, 既简单又环保、高效率的空气消毒方法需得到广泛的关注和推动.

7 总结与展望

生物气溶胶的研究是一个学科交叉性极强的领域, 涉及的领域包括大气科学、免疫学、生物学、机械工程、医学、流行病学、微生物学、生物化学、纳米与物理学等. 生物气溶胶对传染病、公共卫生、大气环境、食品安全、生态环境、气候变化、生物反恐、疾病检测以及环境与健康等方面有重要影响. 生物气溶胶领域存在着重大国家战略需求和研究空间, 例如不同源生物气溶胶浓度、种类、活性等及其主要的影响因素, 空气传播疾病的机制, 生物气溶胶对人体的健康影响等. 具体来说, 包括如下一些问题: (1) 空气中病毒是怎样传播的、能存活多久等科学问题, 其研究结果是制定科学的公共卫生策略的基础; (2) 能更好地表征生物气溶胶的一些新原理、方法、理论体系, 比如实时原位分析生物颗粒表面的物理化学特性在特定条件下如灰霾天的变化机制以及相关基因表达; (3) 识别空气中生物成分对空气质量以及健康效应的影响机制, 比如空气中细菌、病毒、真菌、花粉以及它们的副产物包括过敏原、内毒素对颗粒物的健康效应的协同机理; (4) 空气中的生物成分, 如细菌和大气化学污染物的交互机制以及在其转化中

的可能作用,以及对云的形成与气候变化的影响的进一步了解等;(5)生物气溶胶与大气污染及灰霾形成机制是否有关系,大气中微生物是否会参与氧化还原反应等都是些从未探讨的科学问题,都值得去研究.未来我们可以通过发展新技术,实现实时、在线的检测颗粒物浓度及综合毒性指标,不仅仅局限于PM_{2.5}浓度,还包括一些生物因素,如内毒素及过敏原等;(6)在健康效应方面,空气中部分微生物可能在一定程度上通过中和其他有毒物质来实现对人群健康的保护.从婴儿出生的第一声啼哭开始,空气进入肺部,微生物

与人类共生对人类既有有利的一面,也有不利的一面,我们需要加深对微生物与人体健康关系的认识.未来,是否可以通过调控室内微生物种群结构,实现对化学污染物的降解等,在某种意义上构建一个绿色健康的室内环境的研究也值得尝试.总之,生物气溶胶研究虽已在诸多方面取得了进步,但目前我们对其存在的意义及影响的了解依然相当有限,特别是在大气化学中究竟扮演什么角色尚不清楚.未来通过进一步加强多学科的交叉合作,包括军民融合,有望使得生物气溶胶的研究迈上新的台阶.

参考文献

- 1 Cox C S, Wathes C M. *Bioaerosols Handbook*. Boca Raton & London: CRC Press, 1995
- 2 Xu Z Q, Wu Y, Shen F X, et al. Bioaerosol science, technology and engineering: Past, present, and future. *Aerosol Sci Technol*, 2011, 45: 1337–1349
- 3 Després V R, Huffman J A, Burrows S M, et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review. *Tellus B Chem Phys Meteorol*, 2012, 64: 15598
- 4 Fröhlich-Nowoisky J, Kampf C J, Weber B, et al. Bioaerosols in the earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmos Res*, 2016, 182: 346–376
- 5 Yue S Y, Ren H, Fan S Y, et al. High abundance of fluorescent biological aerosol particles in winter in Beijing, China. *ACS Earth Space Chem*, 2017, 1: 493–502
- 6 Kim K H, Kabir E, Jahan S A. Airborne bioaerosols and their impact on human health. *J Environ Sci*, 2017, doi: 10.1016/j.jes.2017.08.027
- 7 Macfadyen A. On the influence of the temperature of liquid air on bacteria. *Proc Royal Soc London*, 1900, 66: 180–182
- 8 Winslow C E A. A new method of enumerating bacteria in air. *Science*, 1908, 28: 28–31
- 9 Humphries C. Indoor ecosystems. *Science*, 2012, 335: 648–650
- 10 Imshenetsky A A, Lysenko S V, Kazakov G A. Upper boundary of the biosphere. *Appl Environ Microbiol*, 1978, 35: 1–5
- 11 DasSarma P, DasSarma S. Survival of microbes in Earth's stratosphere. *Curr Opin Microbiol*, 2018, 43: 24–30
- 12 Bowers R M, Sullivan A P, Costello E K, et al. Sources of bacteria in outdoor air across cities in the midwestern United States. *Appl Environ Microbiol*, 2011, 77: 6350–6356
- 13 Gangamma S, Patil R S, Mukherji S. Characterization and proinflammatory response of airborne biological particles from wastewater treatment plants. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 3282–3287
- 14 DeLeon-Rodriguez N, Latham T L, Rodriguez-R L M, et al. Microbiome of the upper troposphere: Species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 2575–2580
- 15 Tanaka D, Terada Y, Nakashima T, et al. Seasonal variations in airborne bacterial community structures at a suburban site of central Japan over a 1-year time period using PCR-DGGE method. *Aerobiologia*, 2015, 31: 143–157
- 16 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. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2015, 99: 4867–4877
- 17 Bhangar S, Adams R I, Pasut W, et al. Chamber bioaerosol study: Human emissions of size-resolved fluorescent biological aerosol particles. *Indoor Air*, 2016, 26: 193–206
- 18 Patil N S, Kakde U B. Assessment of fungal bioaerosol emission in the vicinity of a landfill site in Mumbai, India. *Int J Environ Waste Manage*, 2017, 20: 75–91
- 19 Wu B, Duan H Y, Qi Q, et al. Identifying virulence factor genes in *E. coli* in animal houses and their transmission to outside environments. *J Aerosol Sci*, 2018, 117: 189–199
- 20 Li J, Zhou L, Zhang X, et al. Bioaerosol emissions and detection of airborne antibiotic resistance genes from a wastewater treatment plant. *Atmos Environ*, 2016, 124: 404–412
- 21 Han Y P, Wang Y J, Li L, et al. Bacterial population and chemicals in bioaerosols from indoor environment: Sludge dewatering houses in nine municipal wastewater treatment plants. *Sci Total Environ*, 2018, 618: 469–478

- 22 Blais L P, Duchaine C, Thibaudon M, et al. Health impacts of bioaerosol exposure. In: Delort A M, Amato P, ed. *Microbiology of Aerosols*. New York: John Wiley & Sons Inc., 2018. 249–268
- 23 Löndahl J. *Bioaerosol Detection Technologies*. New York: Springer, 2014
- 24 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. *Environ Sci Technol*, 2014, 48: 1499–1507
- 25 Lympelopoulou D S, Adams R I, Lindow S E. Contribution of vegetation to the microbial composition of nearby outdoor air. *Appl Environ Microbiol*, 2016, 82: 3822–3833
- 26 Bovallius A K E, Bucht B, Roffey R, et al. Three-year investigation of the natural airborne bacterial flora at four localities in Sweden. *Appl Environ Microbiol*, 1978, 35: 847–852
- 27 Huffman J A, Prenni A J, DeMott P J, et al. High concentrations of biological aerosol particles and ice nuclei during and after rain. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13: 6151
- 28 Joung Y S, Ge Z, Buie C R. Bioaerosol generation by raindrops on soil. *Nat Commun*, 2017, 8: 14668
- 29 Rathnayake C M, Metwali N, Jayarathne T, et al. Influence of rain on the abundance of bioaerosols in fine and coarse particles. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 2459–2475
- 30 Jang G I, Hwang C Y, Cho B C. Effects of heavy rainfall on the composition of airborne bacterial communities. *Front Env Sci Eng*, 2018, 12: 12
- 31 Qian J, Hospodsky D, Yamamoto N, et al. Size-resolved emission rates of airborne bacteria and fungi in an occupied classroom. *Indoor Air*, 2012, 22: 339–351
- 32 Milton D K, Fabian M P, Cowling B J, et al. Influenza virus aerosols in human exhaled breath: Particle size, culturability, and effect of surgical masks. *PLoS Pathog*, 2013, 9: e1003205
- 33 Xu C J, Wu C Y, Yao M S. Fluorescent bioaerosol particles resulting from human occupancy with and without respirators. *Aerosol Air Qual Res*, 2017, 17: 198–208
- 34 Wei K, Zheng Y H, Li J, et al. Microbial aerosol characteristics in highly polluted and near-pristine environments featuring different climatic conditions. *Sci Bull*, 2015, 60: 1439–1447
- 35 Adams R I, Bhanger S, Pasut W, et al. Chamber bioaerosol study: Outdoor air and human occupants as sources of indoor airborne microbes. *PLoS One*, 2015, 10: e0128022
- 36 Sánchez-Monedero M A, Aguilar M I, Fenoll R, et al. Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants. *Water Res*, 2008, 42: 3739–3744
- 37 Bibby K, Peccia J. Identification of viral pathogen diversity in sewage sludge by metagenome analysis. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 1945–1951
- 38 Zhang M, Zuo J, Yu X, et al. Quantification of multi-antibiotic resistant opportunistic pathogenic bacteria in bioaerosols in and around a pharmaceutical wastewater treatment plant. *J Environ Sci*, 2017, doi: 10.1016/j.jes.2017.12.011
- 39 Davidson M E, Schaeffer J, Clark M L, et al. Personal exposure of dairy workers to dust, endotoxin, muramic acid, ergosterol and ammonia on large-scale dairies in the high plains western United States. *J Occup Environ Hyg*, 2018, 15: 182–193
- 40 Barberán A, Dunn R R, Reich B J, et al. The ecology of microscopic life in household dust. *Proc Roy Soc B*, 2015, 282: 20151139
- 41 Dannemiller K C, Gent J F, Leaderer B P, et al. Influence of housing characteristics on bacterial and fungal communities in homes of asthmatic children. *Indoor Air*, 2016, 26: 179–192
- 42 Khare P, Marr L C. Simulation of vertical concentration gradient of influenza viruses in dust resuspended by walking. *Indoor Air*, 2014, 25: 428–440
- 43 Lin D, Ou Q, Lin J, et al. A meta-analysis of the rates of *Staphylococcus aureus* and methicillin-resistant *S aureus* contamination on the surfaces of environmental objects that health care workers frequently touch. *Am J Infect Control*, 2017, 45: 421–429
- 44 Rosario K, Fierer N, Miller S L, et al. Diversity of DNA and RNA viruses in indoor air as assessed via metagenomic sequencing. *Environ Sci Technol*, 2018, 52: 1014–1027
- 45 Li J, Li M, Shen F, et al. Characterization of biological aerosol exposure risks from automobile air conditioning system. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 10660–10666
- 46 Dondero Jr T J, Rendtorff R C, Mallison G F, et al. An outbreak of Legionnaires' disease associated with a contaminated air-conditioning cooling tower. *New Engl J Med*, 1980, 302: 365–370
- 47 Yuan B, Zhang Y H, Leung N H, et al. Role of viral bioaerosols in nosocomial infections and measures for prevention and control. *J Aerosol Sci*, 2018, 117: 200–211
- 48 Yang L, Huang C Y, Zhou Z B, et al. Risk factors for hypothermia in patients under general anesthesia: Is there a drawback of laminar airflow operating rooms? A prospective cohort study. *Int J Surg*, 2015, 21: 14–17

- 49 Somogyi R, Vesely A E, Azami T, et al. Dispersal of respiratory droplets with open vs closed oxygen delivery masks: Implications for the transmission of severe acute respiratory syndrome. *Chest*, 2004, 125: 1155–1157
- 50 Vijayasegaran P, Knibbs L D, Morawska L, et al. Surgical space suits increase particle and microbiological emission rates in a simulated surgical environment. *J Arthroplasty*, 2017, doi: 10.1016/j.arth.2017.12.009
- 51 Tang J W, Li Y, Eames I, et al. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *J Hosp Infect*, 2006, 64: 100–114
- 52 Jones R M, Brosseau L M. Aerosol transmission of infectious disease. *J Occup Environ Med*, 2015, 57: 501–508
- 53 Heald C L, Spracklen D V. Atmospheric budget of primary biological aerosol particles from fungal spores. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L09806
- 54 Lee B U, Lee G, Heo K J. Concentration of culturable bioaerosols during winter. *J Aerosol Sci*, 2016, 94: 1–8
- 55 Wei K, Zou Z, Zheng Y H, et al. Ambient bioaerosol particle dynamics observed during haze and sunny days in Beijing. *Sci Total Environ*, 2016, 550: 751–759
- 56 Xie Z S, Li Y P, Lu R, et al. Characteristics of total airborne microbes at various air quality levels. *J Aerosol Sci*, 2018, 116: 57–65
- 57 Guan T J, Yao M S, Wang J, et al. Airborne endotoxin in fine particulate matter in Beijing. *Atmos Environ*, 2014, 97: 35–42
- 58 Zhen Q, Deng Y, Wang Y Q, et al. Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants. *Sci Total Environ*, 2017, 601: 703–712
- 59 Mhuireach G, Johnson B R, Altrichter A E, et al. Urban greenness influences airborne bacterial community composition. *Sci Total Environ*, 2016, 571: 680–687
- 60 Christner B C, Morris C E, Foreman C M, et al. Ubiquity of biological ice nucleators in snowfall. *Science*, 2008, 319: 1214
- 61 Delort A M, Vařtilingom M, Joly M, et al. Clouds: A transient and stressing habitat for microorganisms. In: Chénard C, Lauro F M, ed. *Microbial Ecology of Extreme Environments*. Cham: Springer International Publishing, 2017. 215–245
- 62 Hill T C J, DeMott P J, Conen F, et al. Impacts of bioaerosols on atmospheric ice nucleation processes. In: Delort A M, Amato P, ed. *Microbiology of Aerosols*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2017
- 63 Estillore A D, Trueblood J V, Grassian V H. Atmospheric chemistry of bioaerosols: heterogeneous and multiphase reactions with atmospheric oxidants and other trace gases. *Chem Sci*, 2016, 7: 6604–6616
- 64 Creamean J M, Suski K J, Rosenfeld D, et al. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western US. *Science*, 2013, 339: 1572–1578
- 65 Shen F X, Yao M S. Are we biologically safe with snow precipitation? A case study in Beijing. *PLoS One*, 2013, 8: e65249
- 66 Pöschl U, Martin S T, Sinha B, et al. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. *Science*, 2010, 329: 1513–1516
- 67 Joly M, Amato P, Sancelme M, et al. Survival of microbial isolates from clouds toward simulated atmospheric stress factors. *Atmos Environ*, 2015, 117: 92–98
- 68 Cziczo D J, Froyd K D, Hoose C, et al. Clarifying the dominant sources and mechanisms of cirrus cloud formation. *Science*, 2013, 340: 1320–1324
- 69 Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Sci Rev*, 2008, 89: 13–41
- 70 Vařtilingom M, Deguillaume L, Vinatier V, et al. Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 559–564
- 71 Shen X L, Zhao Y, Chen Z, et al. Heterogeneous reactions of volatile organic compounds in the atmosphere. *Atmos Environ*, 2013, 68: 297–314
- 72 Ariya P A, Amyot M. New directions: The role of bioaerosols in atmospheric chemistry and physics. *Atmos Environ*, 2004, 38: 1231–1232
- 73 Ege M J, Mayer M, Schwaiger K, et al. Environmental bacteria and childhood asthma. *Allergy*, 2012, 67: 1565–1571
- 74 Faridi S, Naddafi K, Kashani H, et al. Bioaerosol exposure and circulating biomarkers in a panel of elderly subjects and healthy young adults. *Sci Total Environ*, 2017, 593: 380–389
- 75 Shang Y, Fan L L, Zhang L. The combined effects of endotoxin and PM_{2.5} on cytotoxicity and reactive oxygen species generation in A549 cells. *Adv Mater Res*, 2013, 610: 794–797
- 76 Zhong J, Urch B, Speck M, et al. Endotoxin and β -1, 3-D-glucan in concentrated ambient particles induce rapid increase in blood pressure in controlled human exposures. *Hypertension*, 2015, 66: 509–516
- 77 Reinmuth-Selzle K, Kampf C J, Lucas K, et al. Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: Abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 4119–4141
- 78 Wei K. Investigation of single living yEas PM toxicity sensor (SLEPTor) system and its performance influencing factors (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Peking University, 2017 [魏恺. 基于单活体酵母菌的大气颗粒物毒性在线检测系统及影响因素的研究.

博士学位论文. 北京: 北京大学, 2017]

- 79 Samake A, Uzu G, Martins J M F, et al. The unexpected role of bioaerosols in the oxidative potential of PM. *Sci Rep*, 2017, 7: 10978
- 80 Ege M J, Mayer M, Normand A C, et al. Exposure to environmental microorganisms and childhood asthma. *N Engl J Med*, 2011, 364: 701–709
- 81 Tischer C, Weigl F, Probst A J, et al. Urban dust microbiome: Impact on later atopy and wheezing. *Environ Health Perspect*, 2016, 124: 1919–1923
- 82 Lynch S V, Wood R A, Boushey H, et al. Effects of early-life exposure to allergens and bacteria on recurrent wheeze and atopy in urban children. *J Allerg Clin Immunol*, 2014, 134: 593–601
- 83 Thompson W W, Shay D K, Weintraub E, et al. Mortality associated with influenza and respiratory syncytial virus in the United States. *Jama*, 2003, 289: 179–186
- 84 Buss B F, Keyser–Metobo A, Rother J, et al. Possible airborne person-to-person transmission of *Mycobacterium bovis*—Nebraska 2014–2015. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2016, 65: 197–201
- 85 Blaser M J, Falkow S. What are the consequences of the disappearing human microbiota? *Nat Rev Microbiol*, 2009, 7: 887–894
- 86 Man W H, de Steenhuijsen P, Bogaert D. The microbiota of the respiratory tract: Gatekeeper to respiratory health. *Nat Rev Microbiol*, 2017, 15: 259
- 87 Bisgaard H, Hermansen M N, Buchvald F, et al. Childhood asthma after bacterial colonization of the airway in neonates. *N Engl J Med*, 2007, 357: 1487
- 88 Murphy T F, Bakaletz L O, Smeesters P R. Microbial interactions in the respiratory tract. *Pediatr Infect Dis J*, 2009, 28: S121–S126
- 89 Zheng Y H, Chen H X, Li X G. Bacterial pathogens were detected from human exhaled breath using a novel protocol. *J Aerosol Sci*, 2018, 117: 224–234
- 90 Depner M, Ege M J, Cox M J, et al. Bacterial microbiota of the upper respiratory tract and childhood asthma. *J Allergy Clin Immunol*, 2017, 139: 826–834
- 91 Johnson E S, Choi K M. Lung cancer risk in workers in the meat and poultry industries—A review. *Zoonoses Public Health*, 2012, 59: 303–313
- 92 Hofmann J N, Shiels M S, Friesen M C, et al. Industrial hog farming is associated with altered circulating immunological markers. *Occup Environ Med*, 2017, 75: 212–217
- 93 Gandhi S, Felini M J, Ndetan H, et al. A pilot case-cohort study of brain cancer in poultry and control workers. *Nutr Cancer*, 2014, 66: 343–350
- 94 Gong S L, Barrie L A, Blanchet J P. Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere: 1. Model development. *J Geophys Res Atmos*, 1997, 102: 3805–3818
- 95 Lighthart B. The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. *FEMS Microbiol Ecol*, 1997, 23: 263–274
- 96 Burrows S M, Butler T, Jöckel P, et al. Bacteria in the global atmosphere—Part 2: Modeling of emissions and transport between different ecosystems. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 9281–9297
- 97 Blanchard D C. The ejection of drops from the sea and their enrichment with bacteria and other materials: A review. *Estuaries Coasts*, 1989, 12: 127–137
- 98 Griffin D W. Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health. *Clin Microbiol Rev*, 2007, 20: 459–477
- 99 Dueker M E, O’Mullan G D, Martínez J M, et al. Onshore wind speed modulates microbial aerosols along an urban waterfront. *Atmosphere*, 2017, 8: 215
- 100 Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—A review. *Sci Total Environ*, 2004, 326: 151–180
- 101 Soleimani Z, Goudarzi G, Sorooshian A, et al. Impact of Middle Eastern dust storms on indoor and outdoor composition of bioaerosol. *Atmos Environ*, 2016, 138: 135–143
- 102 Kraus R H, Zeddeman A, Hooft P V, et al. Evolution and connectivity in the world-wide migration system of the mallard: Inferences from mitochondrial DNA. *BMC Genet*, 2011, 12: 99
- 103 Thangavel R R, Bouvier N M. Animal models for influenza virus pathogenesis, transmission, and immunology. *J Immunol Method*, 2014, 410: 60–79
- 104 Pinkerton J N, Johnson K B, Stone J K, et al. Factors affecting the release of ascospores of *Anisogramma anomala*. *Phytopathology*, 1998, 88: 122–128
- 105 Fuzzi S, Decesari S, Facchini M C, et al. Overview of the inorganic and organic composition of size-segregated aerosol in Rondonia, Brazil, from the biomass-burning period to the onset of the wet season. *J Geophys Res Atmos*, 2007, 112: 107–119

- 106 Li M, Yu X, Kang H, et al. Concentrations and size distributions of bacteria-containing particles over oceans from China to the Arctic Ocean. *Atmosphere*, 2017, 8: 82
- 107 Yu I T S, Li Y, Wong T W, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med*, 2004, 350: 1731–1739
- 108 Shepard C W, Soriano-Gabarro M, Zell E R, et al. Antimicrobial postexposure prophylaxis for anthrax: Adverse events and adherence. *Emerg Infect Dis*, 2002, 8: 1124
- 109 Herfst S, Schrauwen E J A, Linster M, et al. Airborne transmission of influenza A/H5N1 virus between ferrets. *Science*, 2012, 336: 1534–1541
- 110 Wells W F. On air-borne infection. Study II. Droplets and droplet nuclei. *Am J Hyg*, 1934, 20: 611–618
- 111 Mao J, Gao N. The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: A review. *Build Environ*, 2015, 94: 516–531
- 112 Nicas M, Nazaroff W W, Hubbard A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens. *J Occup Environ Hyg*, 2005, 2: 143–154
- 113 Tang J W, Gao C X, Cowling B J, et al. Absence of detectable influenza RNA transmitted via aerosol during various human respiratory activities-experiments from Singapore and Hong Kong. *PLoS One*, 2014, 9: e107338
- 114 Wei J J, Zhou J, Cheng K, et al. Assessing the risk of downwind spread of avian influenza virus via airborne particles from an urban wholesale poultry market. *Build Environ*, 2018, 127: 120–126
- 115 Ijaz M K, Zargar B, Wright K E, et al. Generic aspects of the airborne spread of human pathogens indoors and emerging air decontamination technologies. *Amer J Infect Control*, 2016, 44: S109–S120
- 116 Todd M C, Belteton M V F. Factors involved in aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare. In: Esquinas A M, ed. *Noninvasive Ventilation in High-Risk Infections and Mass Casualty Events*. Vienna: Springer, 2014. 269–277
- 117 Verreault D, Marcoux-Voiselle M, Turgeon N, et al. Resistance of aerosolized bacterial viruses to relative humidity and temperature. *Appl Environ Microbiol*, 2015, 81: 7305–7311
- 118 Cutler T D, Wang C, Hoff S J, et al. Effect of temperature and relative humidity on ultraviolet (UV 254) inactivation of airborne porcine respiratory and reproductive syndrome virus. *Vet Microbiol*, 2012, 159: 47–52
- 119 Pyankov O V, Bodnev S A, Pyankova O G, et al. Survival of aerosolized coronavirus in the ambient air. *J Aerosol Sci*, 2018, 115: 158–163
- 120 Aliabadi A A, Rogak S N, Bartlett K H, et al. Preventing airborne disease transmission: Review of methods for ventilation design in health care facilities. *Adv Pre Med*, 2011, 2011: 124064
- 121 Cox C S. Airborne bacteria and viruses. *Sci Prog*, 1989, 73: 469–499
- 122 Cox C S. *The Aerobiological Pathway of Microorganisms*. New York: John Wiley & Sons, 1987
- 123 Tang J W. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *J R Soc Interface*, 2009, 6: S737–S746
- 124 Yang W, Marr L C. Mechanisms by which ambient humidity may affect viruses in aerosols. *Appl Environ Microbiol*, 2012, 78: 6781–6788
- 125 Khan A A H, Karuppaiyil S M. Fungal pollution of indoor environments and its management. *Saudi J Biol Sci*, 2012, 19: 405–426
- 126 Pagès M, Kleiber D, Pierron R J G, et al. Ozone effects on botrytis cinerea conidia using a bubble column: Germination inactivation and membrane phospholipids oxidation. *Ozone Sci Eng*, 2016, 38: 62–69
- 127 Schröder P C, Li J, Wong G W K, et al. The rural-urban enigma of allergy: What can we learn from studies around the world? *Pediatr Allergy Immunol*, 2015, 26: 95–102
- 128 Lang-Yona N, Shuster-Meiseles T, Mazar Y, et al. Impact of urban air pollution on the allergenicity of *Aspergillus fumigatus* conidia: Outdoor exposure study supported by laboratory experiments. *Sci Total Environ*, 2016, 541: 365–371
- 129 Abdullahi Mahmood M, Bloss W, Pope F. Posttranslational modification of bioaerosol protein by common gas pollutants: NO₂ and O₃. *Geophys Res Abstracts*, 2016, 18: 725
- 130 Xu Z Q, Wei K, Wu Y, et al. Enhancing bioaerosol sampling by Andersen impactors using mineral-oil-spread agar plate. *PLoS One*, 2013, 8: e56896
- 131 Chen H X, Yao M S. A high-flow portable biological aerosol trap (HighBioTrap) for rapid microbial detection. *J Aerosol Sci*, 2017, 117: 212–223
- 132 Liu Q, Zhang X, Li X, et al. A semi-quantitative method for point-of-care assessments of specific pathogenic bioaerosols using a portable microfluidics-based device. *J Aerosol Sci*, 2018, 115: 173–180
- 133 Stowers M A, Van Wuijckhuijse A L, Marijnissen J C M, et al. Fluorescence preselection of bioaerosol for single-particle mass spectrometry. *Appl Optics*, 2006, 45: 8531–8536

- 134 Lavine B K, Mirjankar N, LeBouf R, et al. Prediction of mold contamination from microbial volatile organic compound profiles using solid phase microextraction and gas chromatography/mass spectrometry. *Microchem J*, 2012, 103: 37–41
- 135 Usachev E V, Usacheva O V, Agranovski I E. Surface plasmon resonance–based real-time bioaerosol detection. *J Appl Microbiol*, 2013, 115: 766–773
- 136 Farka Z, Kovář D, Skládal P. Piezoelectric biosensor coupled to cyclone air sampler for detection of microorganisms. *Chem Listy*, 2013, 107: S302–S304
- 137 Skládal P, Švábenská E, Žeravík J, et al. Electrochemical immunosensor coupled to cyclone air sampler for detection of *Escherichia coli* DH5α in bioaerosols. *Electroanalysis*, 2012, 24: 539–546
- 138 Shen F X, Wang J, Xu Z, et al. Rapid flu diagnosis using silicon nanowire sensor. *Nano Lett*, 2012, 12: 3722–3730
- 139 Kim J Y, Ahn J H, Moon D I, et al. Multiplex electrical detection of avian influenza and human immunodeficiency virus with an underlap-embedded silicon nanowire field-effect transistor. *Biosens Bioelectron*, 2014, 55: 162–167
- 140 Shen F X, Tan M M, Wang Z, et al. Integrating silicon nanowire field effect transistor, microfluidics and air sampling techniques for realtime monitoring biological aerosols. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 7473–7480
- 141 Hayes S A, Haefliger S, Harris B, et al. Exhaled breath condensate for lung cancer protein analysis: A review of methods and biomarkers. *J Breath Res*, 2016, 10: 034001
- 142 Glendinning L, Wright S, Tennant P, et al. Microbiota in exhaled breath condensate and the lung. *Appl Environ Microbiol*, 2017, 83: e00515
- 143 Goray M, Fowler S, Szkuta B, et al. Shedder status—An analysis of self and non-self DNA in multiple handprints deposited by the same individuals over time. *Forensic Sci Int Gene*, 2016, 23: 190–196
- 144 Olewi A A, Morris M R, Schmerer W M, et al. The relative DNA-shedding propensity of the palm and finger surfaces. *Sci Justice*, 2015, 55: 329–334
- 145 Xu Z Q, Shen F X, Li X G, et al. Molecular and microscopic analysis of bacteria and viruses in exhaled breath collected using a simple impaction and condensing method. *PLoS One*, 2012, 7: e41137
- 146 Ghosh B, Lal H, Srivastava A. Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms. *Environ Int*, 2015, 85: 254–272
- 147 Luengas A, Barona A, Hort C, et al. A review of indoor air treatment technologies. *Rev Environ Sci Bio/Technol*, 2015, 14: 499–522
- 148 Yu B F, Hu Z B, Liu M, et al. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health. *Int J Refriger*, 2009, 32: 3–20
- 149 Zhu M, Han J, Wang F, et al. Electrospun nanofibers membranes for effective air filtration. *Macromol Mater Eng*, 2017, 302: 1600353
- 150 Guan T J, Yao M S. Use of carbon nanotube filter in removing bioaerosols. *J Aerosol Sci*, 2010, 41: 611–620
- 151 Lee J H, Wu C Y, Wysocki K M, et al. Efficacy of iodine-treated biocidal filter media against bacterial spore aerosols. *J Appl Microbiol*, 2008, 105: 1318–1326
- 152 Park C W, Byeon J H, Yoon K Y, et al. Simultaneous removal of odors, airborne particles, and bioaerosols in a municipal composting facility by dielectric barrier discharge. *Sep Purif Technol*, 2011, 77: 87–93
- 153 Ryan K, McCabe K, Clements N, et al. Inactivation of airborne microorganisms using novel ultraviolet radiation sources in reflective flow-through control devices. *Aerosol Sci Technol*, 2010, 44: 541–550
- 154 Wu Y, Yao M S. Inactivation of bacteria and fungus aerosols using microwave irradiation. *J Aerosol Sci*, 2010, 41: 682–693
- 155 Zhang Q, Damit B, Welch J, et al. Microwave assisted nanofibrous air filtration for disinfection of bioaerosols. *J Aerosol Sci*, 2010, 41: 880–888
- 156 Hagbom M, Nordgren J, Nybom R, et al. Ionizing air affects influenza virus infectivity and prevents airborne-transmission. *Sci Rep*, 2015, 5: 11431

Summary for “生物气溶胶的昨天、今天和明天”

Bioaerosol research: Yesterday, today and tomorrow

Yunhao Zheng, Jing Li, Haoxuan Chen, Ting Zhang, Xinyue Li, Minfei Wang & Maosheng Yao*

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: yao@pku.edu.cn

Bioaerosols have important impacts on many scientific fields, including atmospheric environment, ecology, climate change, food safety, anti-bioterrorism, infectious diseases, public health and environmental health. This review was carried out based on the scientific outcomes from the 600th Xiangshan Science Conference held in Beijing, for which 47 scientists including those overseas were invited to discuss the bioaerosol research progress. Over the past 10 years, great strides have been made in the bioaerosol field, such as the expansion of research directions, research broadness and also scientists. For example, atmospheric chemistry researchers have also started to carry out studies about bioaerosol impacts on the atmospheric environment, including those on the cloud droplets, the climate and bioaerosol dynamics during haze events. In addition, new methods and instruments for bioaerosol studies are increasingly being developed in bioaerosol monitoring and capture systems, various biosensors, microfluidics, high-throughput sequencing, and they have helped the scientific community obtain a better understanding of microbes in the air. In terms of health effects, human and indoor bioaerosol emissions have become one of the hot research areas. In addition, bioaerosols were also shown to directly affect the oxidation potential of atmospheric particles and thus on the human health, however, the relevant mechanisms remain to be very limited and could be far more complex than what we have known so far. On the other hand, respiratory infections/outbreaks, caused largely by the spread of bioaerosols, continue to be a major killer for humans, especially for younger children. Currently, although a significant progress has been made in high-throughput screening of respiratory pathogens, the airborne disease transmission mechanisms are still not well understood, including the influences on the pathogen viability and effective transmission distance. The risk of military conflicts in certain regions is increasing, which could potentially lead to possible use of biological weapons via bioaerosol for mass human destruction. In addition, the airborne transmission of antibiotic resistant genes has also received wide attention as an emerging biological pollutant. By integrating sampling, microfluidics, biosensors and electronics, the scientists have taken an important step towards real-time online bioaerosol screening and biological hazard early warning. As a special type of bioaerosol, biomarkers in exhaled breath are also increasingly being studied for early disease diagnosis and screening. At the same time, surgical and nosocomial infections caused by the spread of bioaerosols in the hospital settings are also receiving wide attention. The scientific researchers have also made significant advances in the controlling airborne biological agents, e.g., microwave irradiation, cold plasma and nanomaterial filtration. This review intends to broadly review current state-of-the-art advances in bioaerosol studies, to summarize and discuss the existing problems, correspondingly providing references for the future studies. Despite of great progress made in many aspects of bioaerosols, our understanding of its significance and relevant impacts on our surroundings and health is still quite limited. In the years to come, bioaerosol research is expected to turn a new chapter if multidisciplinary collaboration can be further strengthened.

bioaerosols, human health, biosafety, public health, climate change

doi: 10.1360/N972018-00121