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

霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展

李彦鹏^{1,2*}, 刘鹏霞¹, 谢铮胜¹, 范春兰¹, 路瑞¹, 李婉欣¹, 邓顺熙^{1,2}

1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054;

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054

* 联系人, E-mail: liyanp01@chd.edu.cn

2017-11-19 收稿, 2017-12-17 修回, 2017-12-20 接受, 2018-01-11 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFC0212206)、陕西自然科学基金基础研究(2017JM5054)和中央高校基本科研业务费专项(310829163406, 310829172001)资助

摘要 自从2013年以来, 中国霾事件频发, 霾污染已经成为全国人民广泛关注的环境问题之一。霾污染的本质是大气细颗粒物污染。大气颗粒物的生物成分(即生物气溶胶)与其化学成分一样, 不仅对空气质量和人群健康具有潜在威胁, 而且对全球气候变化以及大气物理化学过程也具有间接影响。然而, 目前学术界对大气颗粒物的生物成分及其性质的研究相对滞后, 尤其是对霾污染天气大气颗粒物中微生物的多样性、丰度及其时空变异特性等基本科学问题认识不足。因此, 本文综述了目前霾污染天气大气微生物气溶胶的研究现状, 结合我们的研究着重阐述了在不同霾污染程度下生物气溶胶的浓度、粒径分布与群落结构特性, 以及空气污染和环境因子对生物气溶胶分布的影响机理等方面存在的问题。最后, 给出了未来霾污染过程生物气溶胶研究应主要开展的5个方面的工作展望, 以期对深入理解霾天生物气溶胶的来源、变化机理以及评估不同空气质量的健康影响提供参考。

关键词 霾污染, 微生物气溶胶, 浓度, 粒径分布, 群落结构

自2013年以来, 中国中东部许多地区入冬后均多次出现大范围的霾天气, 区域重度空气污染事件频发, 给当地人民的生产、生活与健康带来严重影响。为此, 中央和地方政府组织多方力量, 对灰霾成因、发展与转化、危害与控制展开了大量研究。在现阶段的认识中, 霾被定义为大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于10 km的空气普遍混浊现象。霾是不利气象条件和人类活动产生的污染物共同作用的结果, 其本质是细颗粒物污染, 属于大气气溶胶科学研究的范畴^[1-5]。然而, 在与霾污染相关的大气气溶胶研究中, 大多数都讨论气溶胶的理化性质, 关注其生物成分及性质的研究十分有限。

悬浮于大气的固体和液体微粒中, 有相当部分

是由陆地和水生环境的生物活动所产生的, 这些含有微生物或其代谢物质(包括细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉、孢子、动植物碎片等)的具有生命活性的微小粒子统称为生物气溶胶^[6]。这其中既包括了诸如细菌、真菌与病毒等能够在培养基上生长的可培养生物气溶胶, 也包括了像动植物碎片、花粉等不可培养的部分, 以及那些可以在环境中生存但是无法培养的生物气溶胶。而总微生物气溶胶则包含了可培养的和不可培养的生物气溶胶。作为大气气溶胶的重要组成部分, 生物气溶胶的数浓度通常可占到大气气溶胶数浓度的30%左右, 在热带雨林地区甚至可以达到80%^[7,8]。由于其固有的生物属性, 生物气溶胶在地球生态系统, 尤其是大气环境、生物圈、气候和公众健康之间的相互作用中扮演着至关重要

引用格式: 李彦鹏, 刘鹏霞, 谢铮胜, 等. 霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展. 科学通报, 2018, 63: 940-953

Li Y P, Liu P X, Xie Z S, et al. Recent research progress and perspective of characteristics of ambient bioaerosols during hazy pollution in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 940-953, doi: 10.1360/N972017-01214

的角色。比如,生物活性粒子通过远距离水平和垂直方向的输运,可以对大气中的物理化学过程造成潜在的重要影响^[9-11]。微生物在空气中传播和扩散,通过损伤的皮肤、黏膜、消化道及呼吸道侵入机体,可引起和增加人们的皮肤过敏、呼吸道感染、哮喘、心血管疾病和慢性肺部疾病等的发病几率,从而对人类的健康造成巨大威胁^[7,12,13]。因此,生物气溶胶的研究,最近十年受到越来越多的关注并取得了相当大的进展。Xu课题组^[14], Ghosh等人^[15], Fröhlich-Nowoisky等人^[7]和Smets等人^[16]分别从生物气溶胶的采样与监测技术、来源与传输、健康效应与控制等方面对生物气溶胶的研究现状进行了综述。本文将从生物气溶胶的环境效应出发,综述与探讨霾污染条件下生物气溶胶的污染特征,以期为全面了解生物气溶胶的时空分布与变化、深入理解生物气溶胶与空气污染的相互影响提供参考。

1 生物气溶胶的来源与时空分布

通常情况下,空气中由于缺少可以直接利用的养料,微生物不能很好地在其中繁殖生长,因此空气中没有固定的微生物群系。但是,微生物可以通过土壤、尘埃、地面水、动植物以及人类的活动等方式进入大气气溶胶中,即气溶胶化过程,最终以液态或固态粒子的形式存在于空气中,如图1所示。

排放到空气中的生物微粒,有的附着在空气中的尘埃、水滴等非生物颗粒上,有的则独立悬浮在大气中。由于粒径较小而且能附着在微粒上,生物气溶

胶上的微生物在环境中可能具有较长的停留时间(能够达到几天),而且通过风的作用能够进行较长距离的输运。此外,空气中微生物来源多样,还受到各种环境因素和人类活动的多重影响。因此,生物气溶胶中微生物的浓度分布具有明显的空间和时间差异性。表1为我国微生物气溶胶浓度的空间分布。由表可见,在有1年以上长期观测记录的北京、西安和青岛3个城市,可培养细菌、真菌气溶胶和总生物气溶胶的年均浓度分别是1110 CFU/m³, 948 CFU/m³和2.4×10⁵ cells/m³^[17,18], 1311 CFU/m³, 896 CFU/m³和4.03×10⁵ cells/m³^[19,20], 739.5 CFU/m³, 952.5 CFU/m³和6.55×10⁵ cells/m³^[21,22],显示出较明显的空间差异性。表1中其他地区的浓度数值由于都是在半个月内的短期监测结果,所以数值变化不大,基本都在0.5×10⁵ cells/m³左右^[23]。表1还说明,迄今为止我国已开展生物气溶胶监测的地区主要集中在中东部几个城市,西北、西南、东北及华南等大部分地区还没有相关研究。因此,非常有必要在全国范围内开展生物气溶胶的监测研究,以便获得更为充分与全面的生物气溶胶时空分布的基础数据。

由于不同地区不同季节的气象条件、气候因素和微生物来源不同,生物气溶胶浓度的差异不仅体现在空间上,在季节分布上也有很大的不同。Haas等人^[25]观察到,澳大利亚的真菌孢子的浓度在秋季达到最大,而冬季浓度最低。Bowers等人^[26]发现美国科罗拉多州的真菌浓度的最大值出现在初春和夏末,而细菌浓度在夏末和初秋达到最大值。Bovallius等

图1 生物气溶胶的生成与传输示意图

Figure 1 Sketch of generation and transmission of bioaerosols

表 1 中国微生物气溶胶浓度的空间分布^{a)}

Table 1 Spatial distributions of microbial aerosol concentrations in China

监测时间	采样城市	细菌浓度(CFU/m ³)	真菌浓度(CFU/m ³)	总微生物浓度(cells/m ³)
长周期监测	青岛 ^[21,22]	739.5	952.5	6.55×10 ⁵
	北京 ^[17,18]	1110.0	948.0	2.40×10 ⁵
	西安 ^[19,20]	1311.0	896.0	4.03×10 ⁵
	台北 ^[24]	—	1339.0	—
短周期监测	静海 ^[23]	—	—	4.45×10 ⁴
	包头 ^[23]	—	—	5.89×10 ⁴
	鸣沙 ^[23]	—	—	6.06×10 ⁴
	陇西 ^[23]	—	—	8.28×10 ⁴
	合肥 ^[23]	—	—	1.40×10 ⁵
	武汉 ^[23]	—	—	5.15×10 ⁴
	上海 ^[23]	—	—	3.16×10 ⁴

a) “—”表示未检测

人^[27]研究表明,在瑞典乡村地区,夏季的生物气溶胶中微生物浓度最高,秋季次之,而冬季最低. Bo-rodulin等人^[28]研究发现,在西伯利亚南部地区不同高度上生物气溶胶的分布存在一定的季节性变化规律. 在我国华北的北京地区,夏季的微生物气溶胶浓度要高于冬季^[29]. 在沿海的青岛地区,生物气溶胶中的微生物浓度在秋季达到最高值,春夏次之,冬季最低^[21,22]. 而在内陆的西安地区,生物气溶胶浓度在

秋冬季明显高于春夏季,如图2所示^[20].

2 霾污染过程生物气溶胶的浓度水平

除了地域和气候因素外,中国许多城市生物气溶胶浓度的季节变化可能也与秋冬季频繁出现的霾污染过程有关. 近年在西安、北京与青岛等地冬季的观测结果,都发现了霾天生物气溶胶的浓度水平显著高于非霾天的浓度水平(图3). Wei等人^[23]采用紫外

图 2 西安市 2016 年 4 月~2017 年 2 月四季总微生物气溶胶的浓度日变化^[20]

Figure 2 The diurnal variation of the concentration of total airborne microbes in Xi'an from Apr. 2016 to Feb. 2017^[20]

图3 (网络版彩色)霾天与非霾天生物气溶胶浓度水平的比较。(a) 西安市可培养微生物气溶胶^[19]。✕代表最大值和最小值,箱线图上下边代表上四分位数和下四分位数,箱中横线代表中位数;□代表平均值; *代表统计学上的差异性检验 $P<0.05$; (b) 北京市荧光生物颗粒(BioPM)^[23]

Figure 3 (Color online) Comparison of bioaerosol concentrations between hazy days and non-hazy days. (a) Concentrations of viable bioaerosols in Xi'an^[19]. Whiskers denote range, box frames represent the upper quartile and lower quartile, line represents the median, and "□" represents mean. "*" indicates a statistically significant difference between concentrations ($P<0.05$); (b) concentrations of total biological aerosol particles (BioPM) in Beijing^[23]

空气动力学颗粒物粒径分光仪(UV-APS)对北京的荧光生物颗粒(BioPM, 总生物气溶胶)进行了监测, 其范围是 $0.1 \times 10^6 \sim 1.4 \times 10^6$ cells/m³。而Dong等人^[22]采用荧光染色法观测到青岛市2013年10月~2014年8月间霾天的总生物气溶胶平均浓度为 7.09×10^5 cells/m³, 显著高于非霾天的 6.55×10^5 cells/m³。对于可培养空气微生物也具有类似的规律。Li等人^[19]在2014年8月~2015年7月对比了西安市晴天、阴云天、雨天和霾天可培养微生物气溶胶的浓度, 发现霾天可培养细菌和真菌气溶胶的平均浓度分别为 1311 ± 371 和 896 ± 559 CFU/m³, 均为4种天气条件中的最高值。由

于中国北方冬季取暖造成大量细颗粒物排放, 使附着于其上的生物成分也会随之增加, 从而导致灰霾天气生物气溶胶浓度的增加; 此外, 灰霾天的出现往往伴随着空气的异常稳定和极差的大气扩散条件, 因此空气微生物容易累积而导致浓度增大^[18,22,30]。

然而, Gao等人^[31]和胡凌飞等人^[32]分别在北京市选取了两次明显的霾污染爆发期, 对其中的细菌和真菌气溶胶浓度进行了研究, 却得到了不同的结论: 非霾天晴朗天气时的细菌和真菌气溶胶浓度反而明显高于霾天气时的浓度。他们认为这可能与雾霾天空气颗粒物中含有大量的有毒有害物质有关。两种相反的结果, 说明目前学界在霾污染对生物气溶胶有什么样的影响以及影响程度有多大等问题尚不明确, 需要长期大量的监测数据来详细准确地了解污染对生物气溶胶的影响规律。

两个最近的研究在认识霾污染程度与生物气溶胶的相互作用方面迈进了一步。Wei等人^[23]在对北京市2014年2月21日~3月5日霾期间进行监测时发现, 霾初始几天, 荧光生物颗粒的数浓度明显增加, 但是随着霾的发展生物颗粒的浓度又有了下降, 如图4(a)所示。Xie等人^[20]基于西安市一年总微生物气溶胶的观测数据, 将空气微生物浓度变化与中国环境空气质量标准中的空气质量指数(AQI)联系起来, 发现随着空气质量由优变到中度污染时, 空气微生物的浓度是增加的, 但是空气质量继续变差到重度污染和严重污染时, 空气微生物的浓度反而下降了(图4(b))。两个新结果从短期与长期时间尺度都说明了霾污染时可能存在互为相反的影响生物气溶胶的竞争机制: 细颗粒的载体与促进作用以及污染物中化学物质的毒性作用共同决定了空气微生物的浓度变化。当然, 这个推测仍需要更多的监测与毒理学数据验证, 也需要进行烟雾箱实验来详细考察可能的化学物质对其的影响。

3 霾污染过程生物气溶胶的粒径分布

生物气溶胶的粒径范围变化较大, 不同种类的微生物其气溶胶粒径大小不一: 细菌的粒径范围为 $0.25 \sim 8$ μm , 真菌孢子为 $1 \sim 30$ μm , 病毒则小于 0.3 μm , 而源于动植物碎片的生物气溶胶粒径范围相对较宽泛^[33]。生物气溶胶的动力学粒径决定了其进入人体呼吸道的区域及沉积效率^[7,34], 进而影响对人体健康的危害程度。因此, 国内外学者也开展了对霾污染下

图4 (网络版彩色)微生物气溶胶浓度与空气质量的关系. (a) 短期霾^[23]; (b) 一年霾^[20]. *代表最大值和最小值, 箱体图上下边代表上四分位数和下四分位数, 箱中横线代表中位数, □代表平均值, **代表统计学上的差异性检验 $P<0.01$

Figure 4 (Color online) The relationship between bioaerosol concentrations and air quality. (a) During short-term haze event^[23]; (b) during long-term haze events^[20]. Whiskers denote the upper quartile and lower quartile, box frames represent the upper quartile and lower quartile, line represents the median, and "□" represents mean. "*" indicates a statistically significant difference between concentrations ($P<0.01$)

图5 (网络版彩色)霾天与非霾天总生物气溶胶的粒径分布比较. (a) 短期霾^[23]; (b) 一年霾^[22]

Figure 5 (Color online) Comparison of size distributions of total bioaerosols during haze days and non-haze days. (a) During short-term haze event^[23]; (b) during long-term haze events^[22]

生物气溶胶粒径分布的研究.

对于总生物气溶胶, Wei等人^[23]通过比较3个独立的晴朗天和3个独立的雾霾天后得出结论, 在 $PM_{2.5}>300 \mu g/m^3$ 的严重污染天中, $1 \mu m$ 左右的荧光生物颗粒的浓度最高, 但在轻微污染和晴朗天气中粒径分布更加符合正态分布, 且粒径在 $2 \mu m$ 处为浓度峰值(图5(a)). 他们推断在雾霾条件下以细荧光颗粒物的存在为主. Dong等人^[22]对青岛总微生物气溶胶进行了长达1年的观测后也发现了类似的规律, 由于灰霾天空有大量的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} , 导致在细粒径上($1.4 \mu m$ 左右)微生物丰度高于粗粒径范围(图5(b)).

相比于总微生物气溶胶的观测, 由于采样与检测的低成本, 可培养生物气溶胶的粒径分布研究更加普遍. Li 等人^[30]利用六级安德森生物采样器对西安市2015年10月一次灰霾爆发过程进行监测发现, 非霾天可培养细菌气溶胶粒径符合正态分布, 峰值出现在 $2.1\sim 3.3 \mu m$, 而霾天的粒径分布分别在 $1.1\sim 2.1 \mu m$ (占总数的 $25.0\pm 6.8\%$)和 $\geq 7.0 \mu m$ (占总数的 $17.8\pm 4.5\%$)出现两个峰值; 而对于可培养真菌气溶胶, 霾天和非霾天的粒径分布规律基本一致, 均在 $4.7\sim 3.3 \mu m$ 出现峰值. 李婉欣等人^[35]使用同样的方法研究了西安市不同污染程度下可培养生物气溶胶的粒径分布, 发现5种空气质量下细菌气溶胶大都分布在粗粒径范围内($>2.1 \mu m$), 均超过了总数的66%, 且随着空气污染程度的加重, 细菌气溶胶的粒径谱向粗粒径移动, 而细颗粒百分比逐渐减小; 对于真菌气溶胶, 当空气质量处于优、良和轻度污染时, 呈现正态分布, 粒径峰值集中在 $2.1\sim 4.7 \mu m$, 但在中度和重度污染时, 粒径峰值向细颗粒偏移(图6). 韩晨等

图6 (网络版彩色)不同空气质量下可培养生物气溶胶粒径分布^[35]
Figure 6 (Color online) Size distributions of culturable bioaerosols under different air quality conditions^[35]

人^[36]、Xu和Yao^[37]也发现了类似的粒径分布规律。Gao等人^[38]的研究认为,粒径分布受霾污染的影响不大。他们观察到霾天和非霾天大部分(55%~80%)的细菌都分布在粗颗粒(>2.1 μm)上;全年都检测到非霾天细粒径上细菌占比高于重霾天比例;而春、秋和夏季,真菌气溶胶在霾天和非霾天其相对丰度的峰值都分布在中等粒径范围(2.1~4.7 μm),这与几个非霾天的粒径分布规律相似,如北京的最高浓度在2.1~3.3 μm ^[39],台北与青岛在3.4~4.7 μm ^[21,40]。不同时期真菌气溶胶的这个分布也表明其受霾污染影响不是很大。

综合上述粒径分布的研究进展可知,尽管观测地点相差千里,非霾天细菌和真菌气溶胶主要还是分布于粗粒径范围(>2.1 μm);虽然有的研究者观察到粒径分布的双峰模式,但粒径分布主要还是以单峰正态分布为主。霾天与非霾天相比,总生物气溶胶在灰霾条件下多以细颗粒物为主,这可能主要是由于霾污染中细颗粒物浓度显著增加的缘故。霾污染时,较高浓度的细颗粒物为空气中的微生物提供了更多的载体及有利于微生物生长的环境物质,导致了细粒径范围的微生物比例提高。但是对于可培养生物气溶胶来说,细菌和真菌气溶胶在霾天和非霾天的变化趋势不尽相同。总体来说,霾天和非霾天的真菌粒径分布没有显著的变化,粒径峰值集中在2.1~4.7 μm ;但细菌粒径谱在霾污染情况有轻微向粗粒径区间移动趋势。这主要是因为,微生物气溶胶的尺寸影响因素复杂,除了受大气污染程度的影响之

外,还受到微生物来源与种属、气溶胶化类型、孢龄、相对湿度和风等多种因素的综合影响。然而,目前关于相对湿度、颗粒物浓度等因素与微生物气溶胶粒径分布的关联性研究较多(详见后面章节),但霾污染条件下微生物的种属、孢龄、气溶胶化类型与营养物质供给等的变化对其粒径分布的影响规律则缺乏了解。因此,未来的研究应加强考察气象因素、环境因素和生物本身属性对微生物气溶胶粒径分布的影响规律与机理。

4 霾污染过程大气微生物群落结构

大气中微生物的浓度和粒径分布影响了进入人体的微生物量的多少,导致了不同程度的生物气溶胶人体暴露风险,但是同一科或属的不同微生物种类的潜在致病性是不同的,可能导致不同的人体健康威胁,因此研究大气气溶胶上微生物的群落组成同样得到了越来越多的关注。当前,随着分子生物学的快速发展,聚合酶链式反应(PCR)和高通量测序等新方法为人们深入了解大气微生物气溶胶的群落组成提供了可能^[15,41~43]。近年来,在中国的许多城市都有大气微生物群落的研究报告^[44~48],表2概括了已有文献中报道的各地秋冬季大气细菌群落结构的分布。

可以看到,在我国不同的地域,秋冬季生物气溶胶中细菌群落结构在门水平上有很大的相似性,但在丰度上差异较大:北京的优势菌为放线菌门(*Actinobacteria*, 62.3%),济南是厚壁菌门(*Firmicutes*, 74.1%),青岛、乌鲁木齐和厦门则为变形菌门(*Proteobacteria*)。然而,在属水平上时,各地生物气溶胶上的菌属组成和含量差异明显。如北京、济南、青岛和西安的优势菌属分别为节杆菌属(*Arthrobacter*)、乳球菌属(*Lactococcus*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)。而在同一地点,由于受气象条件、气候因素及微生物来源变化的影响,类似于生物气溶胶的浓度分布特征,微生物群落结构也具有较明显的季节分布规律。比如,Du等人^[49]利用高通量测序技术考查了北京市一年时间内不同季节PM_{2.5}上微生物群落的变化情况发现,不同季节细菌优势属的种类变化不大,但其所占的比例却有显著的差异。他们还发现冬季的细菌和真菌的物种丰富度都大于其他的季节。

除了地域和季节差异,生物气溶胶群落结构是否因霾污染过程而存在差异,更是关注的焦点。王伟等

表 2 中国各地秋冬季主要的细菌群落结构分布(门和属水平)^{a)}

Table 2 Spatial distributions of bacterial community structures in autumn and winter in China (at phylum and genus levels)

城市	变形菌门(%)	放线菌门(%)	厚壁菌门(%)	拟杆菌门(%)
厦门 ^[44]	44.66	10.68	41.75	2.91
北京 ^[45]	11.47	62.34	14.64	3.46
青岛 ^[46]	78.80	4.00	14.60	—
乌鲁木齐 ^[47]	74.10	6.20	15.30	—
济南 ^[48]	16.50	1.70	78.90	2.40
西安	53.76	2.37	37.73	2.57

城市	节杆菌属 (%)	弗兰克氏菌属 (%)	地嗜皮菌属 (%)	芽孢杆菌属 (%)	类诺卡氏菌属 (%)	绿脓杆菌属 (%)	不动杆菌属 (%)	葡萄球菌属 (%)	假单胞杆菌属 (%)	乳球菌属 (%)	新鞘脂单胞菌属 (%)
北京 ^[45]	27.0	11.56	8.64	2.38	6.20	—	—	—	—	—	—
青岛 ^[46]	—	—	—	—	—	—	39.70	11.30	—	—	4.00
济南 ^[48]	—	—	—	28.40	—	7.60	—	—	—	43.40	—
西安	—	—	—	1.25	—	—	—	—	64.50	7.28	—

a) “—”表示未检测

人^[50]较早地利用可培养方法,对西安市秋季生物气溶胶的群落变化进行了探究.对于细菌群落结构,在霾天和非霾天都检测出葡萄球菌属(*Staphylococcus*)与微球菌属(*Micrococcus*)两种细菌属.但在非霾天,它们的丰度分别为64.6%和36.4%,而在霾天分别为54.5%和18.2%.此外,在霾天还检出非霾天未曾检测出的奈瑟氏菌属(*Neisseria*),丰度为27.3%.而霾与非霾天的真菌群落结构也有显著差异,非霾天的优势菌属为曲霉属(*Aspergillus*)与短梗霉属(*Aureobasidium*),所占比例达到87.1%;而在霾天,曲霉属(*Aspergillus*)所占比例最大(66.7%),其次为拟青霉(*Paecilomyces*)(25%),其他检出的还包括青霉属(*Penicillium*)与头孢霉属(*Cephalosporium*),其所占比例均低于5%.可见,相比于非霾天,霾天检出了更多的致病菌,这与Du人^[49]和Cao等人^[51]在冬季检出更多的致病菌的结论相一致.但是,也应该看到该研究只是鉴定了生物气溶胶中可培养的部分,由于这部分占大气总生物气溶胶的比例一般不到1%,因此仅能为霾天大气微生物群落结构的变化提供一定的参考.

为了更全面地了解灰霾对大气微生物群落结构的影响,一些研究者采用膜采样与基因测序的手段详细比较了霾天与非霾天空气微生物组成与群落结构. Du等人^[49]利用主坐标分析(PCoA)考察了一年中北京市PM_{2.5}上细菌和真菌群落落在不同污染等级的变化,发现微生物群落结构和污染等级之间没有显著

的关联性,而主要受季节变化的影响. Wei等人^[23]通过焦磷酸测序方法发现在北京市三天霾污染天和两天非霾天的细菌群落结构也没有明显的差别,主要的菌属为乳球菌属(*Lactococcus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和明串珠菌属(*Leuconostoc*).

此外,霾天与非霾天不同粒径上的微生物群落结构变化也获得了关注.本课题组利用高通量基因测序发现西安市霾天和非霾天的可吸入颗粒物(PM₁₀)和空气细颗粒物(PM_{2.5})上的细菌群落组成具有相似性,细菌种属和其相对丰度没有显著的差异;在大气总悬浮颗粒物(TSP)上,假单胞菌属(*Pseudomonas*)和乳球菌属(*Lactococcus*)的相对丰度变化较大;但总体来看,霾天和非霾天细粒径气溶胶上细菌优势种属及其丰度分布具有相似性(图7).王步英等人^[45]利用16S核糖体核糖核酸(16S rRNA)技术分析了北京霾污染过程中PM_{2.5}和PM₁₀上的细菌群落特征,发现霾污染时两种粒径颗粒物上的细菌群落结构差别不大. Gou等人^[47]利用16s和18s基因序列测定了乌鲁木齐冬季PM₁(空气动力学直径<1 μm的颗粒物)和PM₁₀上的微生物群落组成,同样发现两种粒径颗粒细菌群落有较大的相似性,且乌鲁木齐市不同采样点之间细菌相对丰度的差异性要大于不同粒径之间相对丰度差.此外, Xu等人^[48]使用高通量测序技术分析了山东济南严重霾污染时期3种不同粒径的亚微米粒子(PM_{0.18-0.32}, PM_{0.32-0.56}, PM_{0.56-1})上的微生物群落组成,发现在门、目、属3种水平上,3种不同

图7 (网络版彩色)不同粒径生物气溶胶上的细菌群落结构

Figure 7 (Color online) Bacterial community structures on bioaerosols with different sizes

粒径的亚微米粒子上的细菌类群的分布具有相似性。

由于致病菌对人群健康的危害风险较大,部分研究者也特别考察了霾天大气微生物种群中特定致病菌的变化。Du等人^[49]考查了北京不同季节PM_{2.5}上潜在的病原菌的变化规律,发现冬季的细菌和真菌病原菌的量显著高于其他季节病原菌的量。Gou等人^[47]的研究表明,冬季乌鲁木齐PM₁和PM₁₀中存在的致病菌或条件致病菌主要有假单胞菌(*Pseudomonas*)、不动杆菌(*Acinetobacter*)、代尔夫特菌(*Delftia*)、沙雷氏菌(*Serratia*)和子囊菌(*Ascomycetes*)。在临床上,不动杆菌属于条件致病菌,可引起人体不同部位的感染,如肺部感染,肺炎等。沙雷氏菌是引起疾病感染的重要条件致病菌。Cao等人^[51]的研究发现,随着污染程度由轻度污染转为重度污染,革兰氏阳性菌显著增多,如肺炎双球菌(*Streptococcus pneumoniae*)和曲霉菌(*Aspergillus f. umigatus*)的含量分别由0.024%和1.5%增长到0.05%和5.8%。肺炎双球菌是兼性厌氧菌,部分具有致病性,能够引起大叶肺炎、腹膜炎、胸膜炎、中耳炎、乳突炎以及败血症等疾病。除此之外,Xu等人^[48]还对济南严重霾污染时期的亚微米粒子上的致病菌进行研究,发现检出的细菌中的43.7%对人

类、动物和植物有健康威胁,其中包括乳球菌(*Lactococcus piscium*, 35.4%)、莓实假单胞菌(*Pseudomonas fragi*, 7.1%)、无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*, 0.7%)和菊苣假单胞菌(*Pseudomonas cichorii*, 0.5%)。乳球菌可以引发败血症,使器官萎缩,导致休克。无乳链球菌会诱发感染性疾病,如皮肤感染、尿路感染和脑膜炎。显然,相比于非霾天,霾天检测出更多对人体有害的微生物种属,且霾天致病菌的数量也有增长的趋势,这些都增大了人体患病的风险。

总体来说,无论是长周期还是短周期的数据统计结果都指出,在相同地点的同一季节、同一气象条件下不同粒径颗粒物上的微生物群落具有相似性,不同空气污染条件与大气微生物群落结构之间没有显著的关联性。大气中微生物群落特性主要还是受到季节因素与地域因素的影响。究其原因,首先微生物来源广泛,在一个季节的时间内,除非受到大的气象条件改变的影响,这些源保持了充分的稳定性,因此短时间内,一个季节的微生物的数量和群落结构不会出现太大的变化。Bowers等人^[26]的研究结果也证明了相比于大气条件的短期转变,陆地源环境对

于大气中微生物种群结构的影响更大。其次,相比于短时间内空气污染条件的变化,不同季节环境条件的改变更加显著。如不同季节的大气相对湿度、风速、光照和降水等的变化较大,而这些因素都不可避免的对于生物气溶胶的释放源、释放条件、在空气中的扩散、生长和沉降造成影响^[26,52-54]。但是,这些因素的影响程度和影响机理目前还不清楚,需要更多的研究。此外,作为微生物群落组成的一部分,致病菌在霾天的分布变化规律也可能主要受到源和气象因素等的影响。然而这些因素对特定致病菌的影响规律目前还不清楚,同样需要进一步的研究,为霾污染条件下人体健康防护提供更多的科学依据。

5 气象因子和环境因子对灰霾天微生物气溶胶的影响

无论是空气中的总微生物,还是可培养微生物,他们的浓度、粒径分布和群落结构等特征在不同的研究地点,具体的研究数据和结果也不尽相同,即使在同一研究地点,不同采样时期或不同天气条件下的分布特性也会有差异。这些都充分说明,生物气溶胶中微生物浓度和群落组成并不稳定,气象因素和环境污染因子的改变都会引起其发生变化。

影响空气微生物特性变化的主要气象因素有:风、温度、湿度、太阳辐射和降水等。风是大气生物气溶胶产生和传播的动力。一些研究者发现当风速在界面上的临界值超过1~3 m/s时,生物颗粒才能够进入大气中形成生物气溶胶^[55]。风速增大,如图1所示的风力释放作用增强,空气中的细菌粒子和真菌孢子浓度会有所升高^[56,57],但是风速过大,大气扩散稀释作用也会造成生物气溶胶浓度的降低。总体来说,在春夏季普遍认为风速与大气中生物气溶胶的浓度呈正相关^[17],冬季由于灰霾的出现二者负相关报道较多^[20-22]。另一方面,微生物在空气中会随风传播,不同的风向就会带来不同的微生物源,从而会对生物气溶胶中微生物的群落结构产生一定的影响^[58]。

大气温度能够直接影响微生物的缓慢释放与生长繁殖过程。Harrison等人^[56]提出了微生物在其依附表面上缓慢释放取决于附着力和脱附力的假说,并且认为附着力的大小与温度直接相关。在适宜的温度下,水体、土壤环境中的微生物会被释放到大气中,影响生物气溶胶的浓度。另外,温度的增加也会对某

种组分的微生物施加一个合适的选择压,从而引起微生物群落结构的变化^[16,26]。不过,较高的温度会使生物气溶胶中的微生物细胞失水,蛋白质发生变性,从而失去活性;而较低温度虽然能使微生物的存活时间延长,但却会抑制它们的繁殖和生长^[59]。因此,一部分研究发现温度和大气中的生物气溶胶浓度呈正相关^[17,29,32],而另一部分得到了负相关的结果^[18,19,22],也就毫不奇怪了。

相对湿度、降水和太阳辐射也是影响大气微生物浓度的非常重要的因素。通常,相对湿度与大气中的生物气溶胶浓度呈正相关关系^[17,29,32]。这主要是因为湿度增加会产生有利于微生物生长繁殖的环境;另外,当相对湿度较高时,大多数革兰氏阳性菌容易存活,反之,革兰氏阴性菌在较低的相对湿度更容易存活^[56,59,60]。这说明相对湿度也会对生物气溶胶中微生物的群落有一定的影响。尽管降水会带来湿度的增加,但是降雨和降雪对空气中的微生物的冲刷净化作用更强,因此最终会使大气中生物气溶胶的浓度明显减少^[20,61]。大气辐射对生物气溶胶中微生物群落有复杂的影响,较强的日光辐射有杀菌作用,对生物气溶胶中微生物产生不利影响;而当辐射较低,相对湿度条件较为适宜时,可能会导致孢子大量释放,从而对生物气溶胶中微生物群落组成造成影响^[56,62,63]。

除了上述气象因素,空气污染物等环境因素与生物气溶胶的浓度也密切相关。对于气态污染物,统计分析结果普遍显示O₃浓度和空气微生物浓度呈现负相关关系,而NO₂、SO₂和CO与微生物浓度呈现正相关关系^[20,22,23]。究其原因,一般推测O₃由于其强烈的杀菌作用而使微生物死亡或失活^[64],而NO₂、SO₂和CO可能通过化学反应转化为硫酸根、硝酸根离子,为微生物的生长提供了碳源与氮源等营养物质,从而促进了其生长^[22]。

对于颗粒污染物,大多数研究都认为PM_{2.5}和PM₁₀与空气微生物的浓度呈现正相关关系。较高的颗粒物浓度,使得附着在颗粒物上的微生物增多,且高颗粒物浓度易出现的霾天大气条件稳定,附着在颗粒物上的微生物不容易扩散^[18-20,22,30]。但是,Gao等人^[17]的研究是个例外,他们发现在低霾污染水平下,颗粒物与细菌生物气溶胶的浓度呈正相关,而随着颗粒物浓度继续升高,其与细菌微生物气溶胶的关联性由正相关变为负相关;他们认为这可能是由

于低霾污染水平,附着于其上的微生物随着颗粒物浓度升高也相应的增加,这时附着在粗颗粒物上的各种有毒化学物质如金属元素、有机污染物的浓度还较低,随着颗粒物浓度继续增大,有毒化学物质的积聚增多,对微生物产生毒害作用加强,继而呈现出负相关的关系。而最新的一个研究综合比较了气象因素和环境污染因子对细菌群落结构的影响后,认为相对于空气污染,各种气象因素对大气微生物气溶胶具有更加显著的影响^[65]。

需要指出的是,除了气象因素和环境污染因子对生物气溶胶的影响之外,每个研究者所使用的采样与鉴定方法各不相同,也可能造成结果上的差异。Zhen等人^[66]研究发现,在较长采样时间条件下,单阶冲击式生物气溶胶采样器(Biostage)所采集的可培养细菌和真菌浓度比离心采样器(RCS)的高,但是在短时间采样条件下,对总细菌的采集效率则正好相反。Yao等人^[67]比较了静电采样法和液体撞击生物采样法对生物气溶胶的采集效率,发现在多数情况下,利用静电采样法采集得到的微生物过敏原和生物毒素(内毒素和(1,3)- β -D-葡聚糖)的浓度更高。但是,目前还缺乏不同采样鉴定方法引起生物气溶胶浓度与组成差异性的定量研究结果。这就要求在今后的大气微生物气溶胶污染特性的研究中,需要重视并开展不同采样与鉴定方法对研究结果的影响这一基础性工作。

综合以上,生物气溶胶中微生物浓度、粒径和群落结构受到多种气象与污染因素的综合影响,目前人们只对太阳辐射、降水以及臭氧等少数因子的影响规律达成共识,对于其他大部分气象因子和污染因子的影响规律还没有形成统一认识,对影响微生物浓度和群落的主控因素和影响机制更是不清楚,因此十分有必要深入研究霾污染时气象因子、气态污染物和颗粒物化学组分对大气微生物浓度、粒径和群落结构特征的影响。

6 结论与展望

近年来,霾污染过程生物气溶胶的特性研究已经取得了长足的进步,人们对霾污染条件下生物气溶胶的浓度、粒径和群落结构、以及各种气象与环境因子对生物气溶胶特性的影响规律等方面的认识逐渐深入。但是生物气溶胶来源的广泛性、组成成分的

多样性、生物活性的易变性与影响因素的综合性等决定了霾污染条件下生物气溶胶研究的复杂性和多样性,人们对霾污染与生物气溶胶如何相互影响、影响程度怎样、影响因素与机制等科学问题的认识还非常有限。因此,我们建议下述问题将是今后进一步研究的重点。

(1) 目前关于霾污染对生物气溶胶浓度和群落结构的影响规律和机理的认识众说纷纭,一方面是由于问题本身的复杂性,另一方面也是由于每个研究者所使用的采样与鉴定方法各不相同,因此为了更好地分析与比较众多监测结果和数据,亟需发展与制定标准化的采样和鉴定分析技术。当然,发展先进的灵敏、实时与在线检测技术以分析颗粒物的生物特性,同样也是具有重要意义的亟需解决的基础性工作。(2) 目前国内生物气溶胶污染特性的研究,只是集中在少数几个城市且多是短期灰霾污染过程的监测,为了获取更多更充分的数据来深入理解生物气溶胶的时空变化特征及影响因素,还需要进行全国范围内的覆盖更多气候与污染条件的地区,以及在各种时间尺度的野外测试;另外,现有文献进行的霾污染群落结构差异性的分析中还存在不能解释的某些未被发现的环境影响因素,因此还需要考虑与收集诸如边界层高度、极大温度、极大风速、气压等气象因子以及颗粒重金属含量、多环芳烃等污染因子,以更深入理解霾污染对生物气溶胶的影响。(3) 目前的研究已经表明很多气态与颗粒污染物都与生物气溶胶的浓度具有相关性,但是具体的作用机理还并不清楚。所以,除了野外监测之外,设计并开展室内烟雾箱实验以确定单一环境与污染因素对生物气溶胶的影响规律也是十分必要的。(4) 霾的形成机制复杂,除了有不同程度的霾污染,也有不同种类的霾污染,比如夏季光化学反应成霾和冬季高湿度下液相反应成霾等。因此,应该增加对不同机制成霾过程中生物气溶胶的分布与变化研究,从而更加全面地认识灰霾天对生物气溶胶的影响。(5) 目前对于灰霾污染生物气溶胶的来源还难以识别,而且还受到气象条件的明显影响。这就需要对其输运与转化规律进行进一步的研究,同时借鉴大气化学中的源解析方法发展基于生物气溶胶种属与组成库的生物源追踪技术,以揭示灰霾天生物气溶胶的来源与变化机理。

参考文献

- 1 Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2013, 58: 1178–1187 [张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58: 1178–1187]
- 2 Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 2014, 514: 218–222
- 3 Fu H B, Chen J M. Formation, features and controlling strategies of severe haze-fog pollutions in China. *Sci Total Environ*, 2017, 578: 121–138
- 4 Gao J H, Woodward A, Vardoulakis S, et al. Haze, public health and mitigation measures in China: A review of the current evidence for further policy response. *Sci Total Environ*, 2017, 578: 148–157
- 5 Cao J J. Major causes and control strategies of the PM_{2.5} pollution in China (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2016, 34: 74–80 [曹军骥. 中国大气 PM_{2.5} 污染的主要成因与控制对策. 科技导报, 2016, 34: 74–80]
- 6 Ariya P A, Amyot M. New directions: The role of bioaerosols in atmospheric chemistry and physics. *Atmos Environ*, 2004, 38: 1231–1232
- 7 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
- 8 Huffman J A, Sinha B, Garland R M, et al. Size distributions and temporal variations of biological aerosol particles in the Amazon rain-forest characterized by microscopy and real-time UV-APS fluorescence techniques during AMAZE-08. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 11997–12019
- 9 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
- 10 Morris C E, Conen F, Alex H J, et al. Bioprecipitation: A feedback cycle linking earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biol*, 2014, 20: 341–351
- 11 Tobo Y, Prenni A J, Demott P J, et al. Biological aerosol particles as a key determinant of ice nuclei populations in a forest ecosystem. *J Geophys Res*, 2013, 118: 10100–10110
- 12 Douwes J, Thorne P S, Pearce N, et al. Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Ann Occup Hyg*, 2003, 47: 187–200
- 13 Walser S M, Gerstner D G, Brenner B, et al. Evaluation of exposure-response relationships for health effects of microbial bioaerosols—A systematic review. *Int J Hyg Environ Health*, 2015, 218: 577–589
- 14 Xu Z, Wu Y, Shen F, et al. Bioaerosol science, technology, and engineering: Past, present, and future. *Aerosol Sci Technol*, 2011, 45: 1337–1349
- 15 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
- 16 Smets W, Moretti S, Denys S, et al. Airborne bacteria in the atmosphere: Presence, purpose, and potential. *Atmos Environ*, 2016, 139: 214–221
- 17 Gao M, Yan X, Qiu T L, et al. Variation of correlations between factors and culturable airborne bacteria and fungi. *Atmos Environ*, 2016, 128: 10–19
- 18 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
- 19 Li Y P, Lu R, Li W X, et al. Concentrations and size distributions of viable bioaerosols under various weather conditions in a typical semi-arid city of Northwest China. *J Aerosol Sci*, 2017, 106: 83–92
- 20 Xie Z S, Li Y P, Lu R, et al. Characteristics of total airborne microbes at various air quality levels. *J Aerosol Sci*, 2017, doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.11.001
- 21 Li M F, Qi J H, Zhang H D, et al. Concentration and size distribution of bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region. *Sci Total Environ*, 2011, 409: 3812–3819
- 22 Dong L J, Qi J H, Shao C C, et al. Concentration and size distribution of total airborne microbes in hazy and foggy weather. *Sci Total Environ*, 2016, 541: 1011–1018
- 23 Wei K, Zou Z L, Zheng Y H, et al. Ambient bioaerosol particle dynamics observed during haze and sunny days in Beijing. *Sci Total Environ*, 2016, 550: 751–759

- 24 Wu Y H, Chan C C, Rao C Y, et al. Characteristics, determinants, and spatial variations of ambient fungal levels in the subtropical Taipei metropolis. *Atmos Environ*, 2007, 41: 2500–2509
- 25 Haas D, Galler H, Luxner J, et al. The concentrations of culturable microorganisms in relation to particulate matter in urban air. *Atmos Environ*, 2013, 65: 215–222
- 26 Bowers R M, Clements N, Emerson J B, et al. Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near surface atmosphere. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 12097–12106
- 27 Bovallius A, 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
- 28 Borodulin A I, Safatov A S, Shabanov A N, et al. Physical characteristics of concentration fields of tropospheric bioaerosols in the South of Western Siberia. *J Aerosol Sci*, 2005, 36: 785–800
- 29 Gao M, Qiu T L, Jia R Z, et al. Concentration and size distribution of bioaerosols at non-haze and haze days in Beijing (in Chinese). *Environ Sci*, 2014, 35: 4415–4421 [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. *环境科学*, 2014, 35: 4415–4421]
- 30 Li Y P, Fu H L, Wang W, et al. Characteristics of bacterial and fungal aerosols during the autumn haze days in Xi'an, China. *Atmos Environ*, 2015, 122: 439–447
- 31 Gao M, Jia R Z, Qiu T L, et al. Seasonal size distribution of airborne culturable bacteria and fungi preliminary estimation of their deposition in human lungs during non-haze and haze days. *Atmos Environ*, 2015, 118: 203–210
- 32 Hu L F, Zhang K, Wang H B, et al. Concentration and particle size distribution of microbiological aerosol during haze days in Beijing (in Chinese). *Environ Sci*, 2015, 36: 3144–3149 [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径特征. *环境科学*, 2015, 36: 3144–3149]
- 33 Stanley R G, Linskens H F. Plant reproduction. *Science*, 1975, 190: 45–46
- 34 Niu C, Bai Z P, Liu Y T, et al. Deposition of air particulate matter in human respiratory system: A review of recent studies (in Chinese). *J Environ Health*, 2010, 27: 838–841 [牛璨, 白志鹏, 刘雅婷, 等. 空气颗粒物在人体呼吸系统的沉积机制及影响因素研究进展. *环境与健康杂志*, 2010, 27: 838–841]
- 35 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 (in Chinese). *Environ Sci*, 2017, 38: 4494–4499 [李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 等. 西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布. *环境科学*, 2017, 38: 4494–4499]
- 36 Han C, Xie M C, Qi J H, et al. Size distribution characteristics of culturable bioaerosols in relation to air quality levels in Qingdao (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2016, 29: 1264–1271 [韩晨, 谢绵测, 祁建华, 等. 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: 1264–1271]
- 37 Xu Z Q, Yao M S. Monitoring of bioaerosol inhalation risks in different environments using a six-stage Andersen sampler and the PCR-DGGE method. *Environ Monit Assess*, 2013, 185: 3993–4003
- 38 Gao M, Qiu T L, Jia R Z, et al. Concentration and size distribution of viable bioaerosols during non-haze and haze days in Beijing. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 22: 4359–4368
- 39 Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, et al. Concentration and size distribution of culturable airborne microorganisms in outdoor environments in Beijing, China. *Aerosol Sci Technol*, 2008, 42: 325–334
- 40 Lin W H, Li C S. Size characteristics of fungus allergens in the subtropical climate. *Aerosol Sci Technol*, 1996, 25: 93–100
- 41 Mbareche H, Brisebois E, Veillette M, et al. Bioaerosol sampling and detection methods based on molecular approaches: No pain no gain. *Sci Total Environ*, 2017, 599–600: 2095–2104
- 42 Yoo K, Lee T K, Choi E J, et al. Molecular approaches for the detection and monitoring of microbial communities in bioaerosols: A review. *J Environ Sci*, 2017, 51: 234–247
- 43 Haddrell A E, Thomas R J. Aerobiology: Experimental considerations, observations, and future tools. *Appl Environ Microb*, 2017, 83: 1–15
- 44 Liao X, Hu A Y, Yang X Y, et al. Community composition and environmental sources of bacteria and eukaryotic microorganisms in fine air particulate (PM_{2.5}) of Xiamen in winter (in Chinese). *Ecol Environ*, 2013, 22: 1395–1400 [廖旭, 胡安谊, 杨晓永, 等. 厦门冬季 PM_{2.5} 颗粒物中细菌和真核微生物群落组成及其来源分析. *生态环境学报*, 2013, 22: 1395–1400]
- 45 Wang B Y, Lang J D, Zhang L N, et al. Characterizing Beijing's airborne bacterial communities in PM_{2.5} and PM₁₀ samples during haze pollution episodes using 16S rRNA gene analysis method (in Chinese). *Environ Sci*, 2015, 36: 2727–2734 [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. *环境科学*, 2015, 36: 2727–2734]
- 46 Wang L, Song Z W, Xu A L, et al. Phylogenetic diversity of airborne microbes in Qingdao downtown in autumn (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 1121–1129 [王琳, 宋志文, 徐爱玲, 等. 青岛市秋季空气微生物群落多样性. *应用生态学报*, 2015, 26: 1121–1129]

- 47 Gou H, Lu J, Li S, et al. Assessment of microbial communities in PM₁ and PM₁₀ of Urumqi during winter. *Environ Pollut*, 2016, 214: 202–210
- 48 Xu C, Min W, Chen J, et al. Bacterial characterization in ambient submicron particles during severe haze episodes at Ji'nan, China. *Sci Total Environ*, 2017, 580: 188–196
- 49 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. *Sci Total Environ*, 2018, 610–611: 308–315
- 50 Wang W, Fu H L, Wang T L, et al. Characteristics of microbial aerosols on haze days in autumn in Xi'an, China (in Chinese). *Acta Sci Circum*, 2016, 36: 279–288 [王伟, 付红蕾, 王廷路, 等. 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: 279–288]
- 51 Cao C, Jiang W, Wang B, 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
- 52 Bertolini V, Gandolfi I, Ambrosini R, et al. Temporal variability and effect of environmental variables on airborne bacterial communities in an urban area of Northern Italy. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, 97: 6561–6570
- 53 Lighthart B. An hypothesis describing the general temporal and spatial distribution of alfresco bacteria in the earth's atmospheric surface layer. *Atmos Environ*, 1999, 33: 611–615
- 54 Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—A review. *Sci Total Environ*, 326: 151–180
- 55 Borodulin A I, Safatov A S, Belan B D, et al. Measurement errors in determining tropospheric bioaerosol concentrations in the southern region of Western Siberia. *Dokl Biol Sci*, 2005, 403: 260–262
- 56 Harrison R M, Jones A M, Biggins P D, et al. Climate factors influencing bacterial count in background air samples. *Int J Biometeorol*, 2005, 49: 167–178
- 57 Tong Y. Diurnal distribution of total and culturable atmospheric bacteria at a rural site. *Aerosol Sci Technol*, 1999, 30: 246–254
- 58 Sadys M, Skjøth C A, Kennedy R. Back-trajectories show export of airborne fungal spores (*Ganoderma* sp.) from forests to agricultural and urban areas in England. *Atmos Environ*, 2014, 84: 88–99
- 59 Tang J W. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *J R Soc Interface*, 2009, 6: 737–746
- 60 Theunissen H J, Lemmens-den Toom N A, Burggraaf A, et al. Influence of temperature and relative humidity on the survival of chlamydia pneumoniae in aerosols. *Appl Environ Microbiol*, 1993, 59: 2589–2593
- 61 Zhong X, Qi J, Li H, et al. Seasonal distribution of microbial activity in bioaerosols in the outdoor environment of the Qingdao coastal region. *Atmos Environ*, 2016, 140: 506–513
- 62 Tong Y Y, Lighthart B. Solar radiation has a lethal effect on natural populations of culturable outdoor atmospheric bacteria. *Atmos Environ*, 1997, 31: 897–900
- 63 Ulevicius V, Peculyte D A, Andriejauskiene J. Field study on changes in viability of airborne fungal propagules exposed to UV radiation. *Environ Toxicol*, 2004, 19: 437–441
- 64 Sharma M, Hudson J B. Ozone gas is an effective and practical antibacterial agent. *Am J Infect Control*, 2008, 36: 559–563
- 65 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, 601–602: 703–712
- 66 Zhen S Q, Li K J, Yin L H, et al. A comparison of the efficiencies of a portable BioStage impactor and a Reuter centrifugal sampler (RCS) High Flow for measuring airborne bacteria and fungi concentrations. *J Aerosol Sci*, 2009, 40: 503–513
- 67 Yao M S, Zhang H L, Dong S F, et al. Comparison of electrostatic collection and liquid impinging methods when collecting airborne house dust allergens, endotoxin and (1,3)- β -D-glucans. *J Aerosol Sci*, 2009, 40: 492–502

Summary for “霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展”

Recent research progress and perspective of characteristics of ambient bioaerosols during hazy pollution in China

Yanpeng Li^{1,2*}, Pengxia Liu¹, Zhengsheng Xie¹, Chunlan Fan¹, Rui Lu¹, Wanxin Li¹ & Shunxi Deng^{1,2}

¹ School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

² Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

* Corresponding author, E-mail: liyanp01@chd.edu.cn

Since the haze event occurred in many areas of central and eastern China in 2013, haze pollution has become one of the most important environmental issues and has attracted more and more attention from government, industry circle, scholars and the general public in China. Haze pollution is characterized by atmospheric particular matter (PM) being one of the top pollutants. A large number of studies have been conducted to investigate the chemical components of atmospheric PM during haze pollution, while little is known about the biological components and characteristics of PM in the atmosphere, especially during haze pollution. Biological particles in the atmosphere, generally defined as bioaerosols, are airborne particles or large molecules carrying living organisms or released from living organisms (e.g., bacteria, fungi, viruses, pollen, bacterial endotoxins and mycotoxins, etc.). Bioaerosols not only pose potential risks on air quality and human health, but also have direct effects on the alteration of global climate and atmospheric physical and chemical processes. Up to now, however, the concentration and size distribution, diversity, and abundance of different types of bioaerosols as well as their temporal and spatial variability are not well characterized on hazy days. Moreover, due to the changeable community structure, flexible biological activity and comprehensive influential factors, the knowledge involving how haze pollution affects bioaerosols, to what extent it affects, and the influence mechanism is still unclear so far. Therefore, this review first has presented an overview of the state of bioaerosol research during haze pollution, including concentration level, size distribution and community structure of microorganisms in bioaerosols. Subsequently, the current understanding and open questions have been emphatically discussed concerning the characteristics of bioaerosols at different air pollution levels and effects of air pollution on airborne microbes. Finally, we suggest that the following research activities should be pursued in future studies of bioaerosols during haze pollution: (1) It is extremely urgent to develop and establish uniform standardized sampling and identification criterion to better judge and measure the numerous monitoring data from different researchers. It is also essential to develop advanced, sensitive, real-time and online detection techniques to quantify the biological properties of bioaerosols. (2) The nationwide field monitoring of bioaerosols covering more climate types and pollution levels at various time scales should be carried out to obtain more comprehensive data for fully understanding the temporal and spatial variability of bioaerosols and its influential factors. Some other meteorological influential factors (e.g., boundary-layer height, atmospheric extreme temperature, extreme wind speed, and atmospheric pressure, etc.), and pollution factors such as the concentration of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in PM should be taken into account to deeply understand the effect of haze pollution on bioaerosols. (3) Current studies have shown that many gaseous and particulate pollutants are related to the concentration of bioaerosols. However, little is known about the influence mechanisms of pollutants. Therefore, in addition to field monitoring, it is also necessary to design and conduct the laboratory experiment of smog chamber to determine the influence mechanism of each single environmental factor or pollution factor on bioaerosols. (4) In addition to different degrees of haze pollution, there are different kinds of haze pollution including the formation of haze by photochemical reaction in summer and liquid phase reaction at high RH in winter. Therefore, it is also essential to examine the distribution and variation of bioaerosols during different haze formation processes in order to improve our understanding of haze pollution effects on bioaerosols. (5) It is necessary to develop a biological source-tracking technology based on the bioaerosol species and community composition to reveal the possible sources of bioaerosols during haze episodes.

hazy pollution, bioaerosols, concentration, size distribution, community structure

doi: 10.1360/N972017-01214