

生物气溶胶的吸湿性

陈兰夏迪^{1,3}, 林钦浩², 彭超¹, 唐明金¹, 王新明¹, 毕新慧^{1*} (1.中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 粤港澳环境污染过程与控制联合实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广东 广州 510640; 2.广东工业大学环境健康与污染控制研究院, 环境科学与工程学院, 广东省环境催化与健康风险控制重点实验室, 广东 广州 510006; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 归纳了有关气溶胶吸湿性的测量方法以及过去近 30a 来文献中报道的生物气溶胶吸湿性的主要研究成果, 总结了不同种类生物气溶胶之间吸湿性的差异. 已有研究表明, 绝大部分的生物气溶胶粒子都具有一定的吸湿性, 当相对湿度为 90% 时, 吸湿增长因子约为 1.04(真菌孢子)~1.22(细菌), 花粉颗粒物吸湿后的质量与之前的比值为 1.30~1.55. 最后, 提出了目前关于生物气溶胶吸湿性研究中尚未解决的科学问题及该领域的主要发展方向.

关键词: 生物气溶胶; 吸湿性; 细菌; 真菌孢子; 花粉; 藻类

中图分类号: X142, X502, X513, P593

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2020)12-5105-10

Hygroscopicity of bioaerosols. CHEN Lan-xia-di^{1,3}, LIN Qin-hao², PENG Chao¹, TANG Ming-jin¹, WANG Xin-ming¹, BI Xin-hui^{1*} (1.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Joint Laboratory of Environmental Pollution Process and Control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.Guangdong Key Laboratory of Environmental Catalysis and Health Risk Control, School of Environmental Science and Engineering, Institute of Environmental Health and Pollution Control, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5105~5114

Abstract: This article introduces techniques used to investigate bioaerosol hygroscopicity, review hygroscopicity of bioaerosols reported in the last thirty years, and compares difference in hygroscopicity for various bioaerosols. Bioaerosols in general show moderate hygroscopicity: hygroscopic growth factors at 90% RH were found to vary between 1.04 for fungal spores and 1.22 for bacteria, and mass growth factors at 90% RH were found to be in the range of 1.30~1.55. Finally, we outline important questions which remained to be answered in this field and also propose some future research priorities.

Key words: bioaerosol; hygroscopicity; bacteria; fungal spores; pollen; algal

生物气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 是从生物圈进入大气圈的一类生物物质粒, 包括活性的或死亡的生物体(细菌、古菌、藻类等)、生物颗粒(真菌孢子、植物花粉等)以及由有生命活性的有机体所释放到空气中的各种质粒^[1-2]. 其粒径范围可以从几纳米(病毒、细胞碎片)到几百微米(花粉、植物碎片)不等. 粒径更大的生物气溶胶也可以被提升至空气中, 但由于其沉降速度过快而无法悬浮于空气中, 因此通常不属于大气气溶胶粒子.

相关研究表明, 全球生物气溶胶(主要为植物碎片与真菌孢子)的总排放量在<10~1000Tg/a 的范围内, 其中细菌的年排放量为 0.4~28Tg, 真菌孢子为 8~190Tg, 花粉为 47~84Tg. 从数浓度与质量浓度来看, 粒径大于 1 μ m 的生物气溶胶通常占城市和农村空气中总悬浮颗粒物(TSP)的 30%, 占原始森林空气中

TSP 的 80%^[1-3]. 从总体来看, 主要生物气溶胶的数浓度与质量浓度分别在 10⁴ 个/m³ 与 1 μ g/m³ 左右^[2]. 最近的研究表明, 陆地区域的细菌和真菌孢子的平均排放通量约为 10²/(m²·s)^[2,4], 反映了大气和生物圈之间的生物物质交换非常迅速.

生物气溶胶在全球气候、人体健康以及生态系统中扮演着重要角色. 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, 从而直接影响全球气候^[1-2,5]. 另一方面, 生物气溶胶还可以通过活化形成云凝结核(CCN)和冰核粒子(INPs)影响云的光学性质、云量以及云的寿命等, 对全球气候产生

收稿日期: 2020-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42041002); 广东省科技计划项目(2019B121205006); 广东省环境催化与健康风险控制重点实验室开放基金资助项目(GKECHRC-08)

* 责任作者, 研究员, bixh@gig.ac.cn

间接影响^[3,6-15].Möhler 等^[8]与 Pope^[9]认为粒径较大的生物气溶胶,如花粉,被称为巨云凝结核,可在更低的过饱和状态下形成云滴,并迅速生长至较大的液滴尺寸,从而促进雨的形成.此外,微生物在大气中的一些代谢活动也可能影响云和气溶胶.某些微生物(细菌、酵母菌、真菌等)已被发现可影响云内化学过程^[16],表明微生物可利用云内物质作为营养来源,从而参与云内化学过程.有的微生物也可作为生物催化剂,加快云水中光化学反应的速率^[16].

生物气溶胶可对生物有机体产生传染性、致敏性或毒性等影响,在区域和全球范围内影响人类健康和农业生产.许多植物、动物和人类病原体均可以通过空气进行传播,有些植物病原体还可以进行远距离传输,从而将疾病传播到各地^[17].一些植物病原体,如引起锈病、霜霉病和白粉病的病原体,曾造成全球农业的重大经济损失^[18].人类和动物的各种主要传染病,如炭疽、手足口病、结核病、流行性感冒和麻疹,也是由细菌或病毒气溶胶引起的^[19-20].此外,吸入和沉积在呼吸系统不同区域的生物气溶胶可引起人和动物的过敏或中毒反应^[21],例如风媒花粉、真菌孢子、动物皮屑以及螨虫排泄物等.生物气溶胶在呼吸道的沉积取决于颗粒物的物理性质如粒径分布,吸湿性以及人体的气道形态和呼吸特征等^[21-22].生物气溶胶对生态系统的进化有着重要影响.对很多微生物而言,在大气中的远距离扩散是一种重要的生存策略,使其得以“开疆拓土”或者进行季节性迁移^[23].例如风媒植物得以繁衍的决定性因素是其产生的花粉可借风力输送至空气中,从而进行传粉.

吸湿性是大气颗粒物的一个重要物化性质,常用于表达气溶胶的含水量.首先,气溶胶的吸湿性会影响气溶胶粒子的大小与折射率,改变其光学特性,进而影响能见度和直接辐射强迫^[24-26].此外,吸湿性也与气溶胶的云凝结核活性密切相关,吸湿性强的颗粒物通常更易成核,继而影响降水的形成^[27].生物气溶胶可以做为大气中气态污染物的源或汇,也可以为大气中一些重要反应的发生提供反应床,而这些很大程度上依赖于其吸湿性.Estillore 等^[5]发现当空气的 RH 较大时,细菌表面会形成一层水膜,可吸附空气中 NH_3 、 NO_x 和挥发性有机化合物(VOCs).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^[28].此外,生物气溶胶在大气中的传播、停留时间与寿命也依赖于其吸湿性^[29-31],并间接影响生态系统的演变.同时,吸湿性也将影响颗粒物在人体呼吸系统传输和沉降,且生物气溶胶致病性大,传染性强,与一般气溶胶相比,更易对人体健康造成威胁.例如,由于部分微生物的粒径较大,如花粉,这些粒子将会通过在空气中的传播和扩散侵入人体的皮肤、粘膜、呼吸道等部位,从而引起过敏与肺炎等疾病,对公共健康产生一定的负面影响^[2,32-33].Reponen 等^[34]发现在生物气溶胶的典型尺寸中,0.5~2 μm 尺寸范围的粒子在吸湿增长中最容易沉积.Brodsky 等^[35]认为粒子的吸湿性可能会增强中等尺寸粒子的沉积,并阻碍细粒子在呼吸道的沉积.

近年来,人们对生物气溶胶的大气过程有了一定认识^[1-2],但对其吸湿性的研究相对还比较匮乏.本文总结了有关气溶胶吸湿性的测量技术以及过去近 30a 来文献中报道的不同种类生物气溶胶的吸湿性测量结果,并浅谈了生物气溶胶吸湿性研究中尚未解决的科学问题以及未来发展态势,以期为进一步认识生物气溶胶在大气化学、气候以及人体健康等方面的影响提供参考.

1 吸湿性研究方法

1.1 大气颗粒物吸湿性的表征参数

目前,表征气溶胶吸湿性的参数有吸湿增长因子(GF)、粒子的质量变化(m/m_0)以及吸湿性参数(κ)等.其中 GF 是指气溶胶在某一给定 RH 下的粒径(D_p)与干燥条件下粒径 (D_0)的比值,即 $\text{GF}(\text{RH}) = D_p/D_0$.粒子吸湿前后的质量变化(m/m_0)定义为一定 RH 下粒子质量(m)与干燥条件下粒子质量(m_0)的比值,由于生物气溶胶通常具有形貌不规则且粒径较大的特点,测量粒子的 GF 并非易事,因此 m/m_0 也常被用于表征生物气溶胶的吸湿性.吸湿性参数(κ)已被广泛用于描述气溶胶粒子在亚饱和以及过饱和状态下的吸湿性^[27].由于 κ 只与颗粒物的化学组成有关,与颗粒物的粒径与其所处的 RH 环境无关,因此也是用于表征生物气溶胶吸湿性的常见方法.

当开尔文效应可以忽略不计时(这对于通常粒径 $>1\mu\text{m}$ 的细菌、真菌孢子、花粉等生物气溶胶粒子是有效的),气溶胶的吸湿增长因子(GF)与 RH 的

关系可由式(1)表达^[27,36]:

$$RH = \frac{GF^3 - 1}{GF^3 - 1 + \kappa} \quad (1)$$

假设粒子为球形,且在给定 RH 的条件下,气溶胶粒子的体积等于干燥条件下粒子体积与粒子吸收水的体积之和,那么颗粒物的质量变化(m/m_0)与 RH 的关系可由式(2)表达^[37]:

$$\frac{m}{m_0} = 1 + \kappa \frac{\rho_w}{\rho_p} \left(\frac{1}{RH} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: ρ_w 为水的密度, 1g/cm^3 ; ρ_p 为干粒子的密度。

近日, Tang 等^[38]系统评述了目前已有的吸湿性测量技术并总结了各个测量技术的优势与不足,本节将以生物气溶胶吸湿性的主要测量方法为主来进行概述。

1.2 生物气溶胶吸湿性的测量方法

1.2.1 蒸汽吸附分析仪

蒸汽吸附分析仪(VSA)曾被用于测定生物气溶胶在不同温度以及 RH 下的吸湿性^[37,39]。该仪器能够精准地控制温度与湿度,并通过测定颗粒物的质量变化来测量吸湿性。其质量测量范围为 0~100mg,灵敏度可达 0.1 μg ;温度控制范围为 5~85 $^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$;RH 控制范围为 0%~98%,精度为 $\pm 1\%$ 。目前,相关研究已系统评估了 VSA 的性能,并将 VSA 用于测定大气相关粒子的吸湿性^[40],该仪器的原理如图 1 所示,主要包括用于测量样品质量的高精度天平和可精准控制温度与湿度并进行在线监测的湿度室。Gu 等^[40]测定了不同温度下(5~30 $^{\circ}\text{C}$),6 种不同物质的潮解点(DRH),包括 NaCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等常见化合物,其测量值与理论值的差异不超过 1%。此外,已有研究利用 VSA 测定了花粉的吸湿性^[39],多次证明该仪器可以精准地测定大气气溶胶颗粒物的绝对含水量。

1.2.2 电动力学天平法

电动力学天平法(EDB)的基本原理是通过带电气溶胶颗粒在电场\重力场共同作用下的平衡,来获得悬浮态气溶胶在不同 RH 下的质量变化^[38]。正是由于颗粒物在测量过程中处于悬浮状态,减少了样品与器壁的接触,从而在很大程度上避免非均相凝聚作用,因此对于研究气溶胶中水分的脱附等具有极大的优势。在无其它力的情况下,粒子受到的重力与电场力相平衡,如式(3)所示。

$$mg = nqC \frac{V_{\text{DC}}}{z} \quad (3)$$

式中: m 为粒子的质量; g 为引力常数; q 为带电粒子的电荷量; z 为两个电极之间的距离; C 为常数,取决于 EDB 的几何构型; V_{DC} 是悬浮粒子所需要的直流电压。由式(3)可得,若粒子上的电荷保持不变,其质量则与平衡所需的直流电压成正比。因此,粒子的相对质量变化可以通过测量直流电压来进行测定。

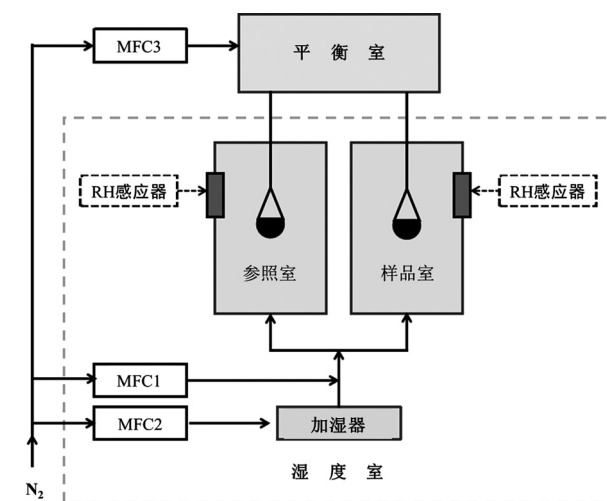


图 1 蒸汽吸附分析仪原理

Fig.1 Schematic diagram of a vapor sorption analyzer
VSA 型号为 Q5000SA, MFC 为质量流量控制器(MFC1:干燥气流;MFC2:加湿气流;MFC3:吹扫控制室的干燥气流),以上三种气流的气体均为高纯度 N_2 。

Pope^[9]与 Griffiths^[12]等利用 EDB 测量了多种花粉在不同 RH 下的吸湿性,发现测定的花粉样品具有一定的吸湿性。然而,由于 EDB 只能表征单颗粒的吸湿特性,因此对于复杂气溶胶以及实际大气颗粒物的研究并不具有很好的代表性。

1.2.3 吸湿串联差分电迁移率分析仪

吸湿串联差分电迁移率分析仪(H-TDMA)是吸湿性最常见的测量方法之一^[38]。该仪器可以直接测量气溶胶颗粒物在不同 RH 条件下的粒径变化来获得吸湿增长因子。H-TDMA 的基本组成包括:气溶胶雾化器、干燥器、荷电装置、2 个差分电迁移率分析仪(DMA)以及与之对应的颗粒计数器(CPC)、温湿度控制器等。该仪器的实验原理为下:(1)将干燥的多分散气溶胶通入第一个 DMA,进行气溶胶颗粒物的粒径选择;(2)将获得的单分散气溶胶通过加湿系统,使颗粒物进行吸湿增长;(3)通入第二个 DMA 与 CPC 对气溶胶粒子进行监测,得到气溶胶粒径分布随 RH 的变化,

获得吸湿增长因子 GF 值.

H-TDMA 虽已被广泛应用于气溶胶吸湿性的研究,但根据文献调研,仅有极少研究利用 H-TDMA 测定了生物气溶胶的吸湿性.其中,Fuentes 等^[11]采用 H-TDMA 同时测定了人工配置的不含海洋有机物与含有藻类渗出液的海洋气溶胶吸湿性,该研究发现含有藻类渗出液的海洋气溶胶 GF 值小于不含有机物的海洋气溶胶,且这种效应会随着海水有机质含量的增加而增强,表明藻类渗出液可抑制海洋气溶胶的吸湿性.

除了以上常用的方法外,生物气溶胶吸湿性的测量技术还包括分析天平、光谱仪、环境扫描电子显微镜(ESEM)与环境透射电子显微镜(ETEM)等常用方法,其中分析天平可以直接测定颗粒物在不同 RH 下的质量变化^[41],与热重分析天平的原理较相似.

由于光谱法无法准确定量测定颗粒物的吸湿增长,且在实际研究中,将红外吸收强度转化为颗粒物的含水量并不容易,因此目前运用光谱法测量生物气溶胶吸湿性的研究非常少.根据文献调研,仅 Tang 等^[37]利用透射傅里叶红外光谱(FTIR)与漫反射傅里叶变换红外光谱仪(DRIFTS)测定了 6 种常见花粉在不同 RH 下的吸湿性.ESEM 与 ETEM 则可以直接用于研究水蒸气吸附于颗粒物的过程以及粒子的粒径与形貌特征等,已被广泛应用于实验室研究和外场观测^[9,42-44].例如,Pope^[9]通过 ESEM 观察发现,当 RH 逐渐升高至 93%时,桦属花粉仅出现内部膨胀现象,表面并没有明显吸收水分;但当 RH 高达 95%及以上时,在该颗粒物的表面可观察到液态水.表 1 总结了上述几种主要研究方法的原理、优缺点以及该方法研究过的生物气溶胶.

表 1 生物气溶胶吸湿性实验室测量技术总结
Table 1 The summary of the measuring techniques for bioaerosol hygroscopicity in the laboratory

测量技术	原理	优点	缺点	已测定的生物气溶胶的种类	参考文献
蒸汽吸附分析仪	测定不同 RH 下的样品质量	质量和温湿度控制精度高、可测量样品的绝对含水量、对样品形态无要求	样品堆积态的形式可能会干扰测量结果	花粉	[38]
电动力学天平法	测量悬浮粒子在不同 RH 下的质量	可测量单颗粒的吸湿性、对样品形态无要求	不能较好的代表复杂气溶胶的吸湿性	花粉	[9]
吸湿串联差分电迁移率分析仪	测量气溶胶在不同 RH 下的粒径	可直接测量气溶胶的粒径变化,大量用于实验室研究和外场观测	价格昂贵、操作复杂、对样品形态要求高、对于测量难溶性颗粒物在低湿度范围吸附水的精确度较低	含有藻类渗出液的海洋气溶胶	[10]
分析天平	测定不同 RH 下的样品质量	质量控制精度高、可测量样品的绝对含水量、对样品形态无要求	难精准控制温湿度	花粉	[41]
光谱仪	测定不同 RH 下样品的红外吸收强度	可给出水在不同界面上的物理状态、吸附特征等相变过程中的红外吸收信息	无法进行绝对定量测量、干扰大	花粉	[38]
环境扫描电子显微镜/环境透射电子显微镜	观察颗粒物的形貌和大小随 RH 的变化	可表征颗粒物的形貌和粒径特征	无法研究单层水吸附过程、无法准确测定吸水量	花粉	[12]

2 生物气溶胶吸湿性的实验室测量结果

目前,对于生物气溶胶吸湿性的测量主要是在实验室进行的研究.表 2 总结了过去近 30a 关于细菌、真菌孢子、花粉以及其它生物气溶胶,如藻类或浮游植物的分泌物(即胞外聚合物,EPS)吸湿性的测量结果.

2.1 细菌

细菌是单细胞原核微生物,其直径在 1μm 左右,

某些细菌如芽孢杆菌可以形成孢子以抵御极端条件,如低温、紫外辐射、氧化、化学反应等,从而长时间存活^[1-2,45].由于细菌的这些特性,其几乎存在于地球的所有环境中,包括极端环境,如深海、冰川、热泉等.

Madelin 等^[46]利用空气动力学粒径谱仪(Aerodynamic Particle Sizer, APS 33,TSI Inc., St Paul, Minnesota, USA)测定了不同湿度和温度下两种嗜热放线菌的空气动力学直径,从而得到细菌在不同

RH 下的吸湿增长因子.该研究利用改良的 Henderson 装置雾化产生细菌气溶胶粒子,然后将含有细菌气溶胶粒子的气流通入两个控制室中,其中一个控制室称为干燥/冷调节室,该控制室的温度与 RH 分别为 20℃ 与 40%;另外一个控制室称为湿润/热调节室,而该控制室的温度与 RH 则分别为 38℃ 与 95%.当粒子在两个控制室内达到平衡时(假定 1h 后可达到平衡),便分别测定两种环境条件下粒子的粒径.该实验发现两种放线菌的粒径在 38℃、95% RH 条件下与干燥条件下(20℃,40% RH)相比有明显的增长.其中,绿色糖单胞菌(*Saccharomonospora viridis*)和白色链霉菌(*Streptomyces albus*)在 95% RH

下的吸湿增长因子分别为 1.30 和 1.09.

Johnson 等^[47]研究了不同 RH(10%、20%、40%、60%、80%、90%)条件下,雾化过程中不同缓冲液浓度对枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)与丁香假单胞菌(*Pseudomonas syringae*)粒径变化的影响.结果表明磷酸盐缓冲溶液的浓度显著影响了两种气溶胶的粒径大小分布,当 RH 在 80%以上时更为明显.此外,在没有缓冲溶液的情况下,两种细菌气溶胶的粒径分布也会受到 RH 的影响,且不同细菌受到的影响不同,其中枯草芽孢杆菌在 90% RH 下的 GF 约为 1.22,而丁香假单胞菌的较小,为 1.15.因此,认为细菌的吸湿性与其种类息息相关.

表 2 文献报道的生物气溶胶吸湿性的实验室测量结果
Table 2 Laboratory measurements of hygroscopicity of bioaerosols reported in the literatures

种类	粒径(μm)	最大 GF 及对应的 RH	参考文献	种类	粒径	最大 m/m_0 或 GF 及对应的 RH	参考文献	
细菌	绿色糖单胞菌	1.15 D_{gma}	1.30at 95%	[46]	桦树,赤杨,白杨,橡树,松树等 11 种落叶树、针叶树以及草类植物的花粉	22~115μm	3.0at 95%	[41]
	白色链霉菌	1.15 D_{gma}	1.09at 95%	水仙、水桦、柳树、黑胡桃的花粉		25μm	1.3at 85%	[9]
	枯草芽孢杆菌	0.94 D_{mma}	1.22at 90%	黑麦草、地肤、三齿蒿、假苍耳的花粉		—	1.8at 85%	[12]
	丁香假单胞菌	0.89 D_{mma}	1.15at 90%	美洲山杨,美洲黑杨,山核桃,豚草等 6 种风媒植物花粉	—	1.5at 90% (25°C)	[37]	
	革兰氏阴性大肠杆菌	0.63 D_{mma}	1.34at 98%	马尾松,油松,梨树,油菜花等 11 种中国植物花粉	—	1.4at 90% (25°C)	[39]	
	革兰氏阳性枯草杆菌	0.75 D_a	1.16at 98%					
真菌孢子	黄曲霉	3.3 D_{gma}	1.15at 95%	[46]	其它(藻类分泌物的人工海水:海链渗出液) 藻、角毛藻、赫氏圆石藻、棕囊藻	25~500nm	~4.0 (GF) at 99%	[10]
	烟曲霉	1.9 D_{gma}	1.16at 98%			40~105nm	~2.5 (GF) at 92%	[11]
	芽枝状枝孢霉	2.3 D_{gma}	1.12at 98%					
	宛氏拟青霉	2.5 D_{gma}	1.06at 98%					
	产黄青霉	2.6 D_{gma}	1.07at 98%					
	朱黄青霉	1.6 D_{gma}	1.12at 98%					
	短柄帚霉	5.1 D_{gma}	1.08at 95%					
	短密青霉	2.9 D_{gma}	1.05at 90%					
	梅林青霉	2.4 D_{gma}	1.08at 90%					
	采色曲霉	2.1 D_{gma}	1.07at 90%					
	烟曲霉	2.1 D_{gma}	1.06at 90%					
	枝状枝孢菌	1.8 D_{gma}	1.04at 90%					

注: D_{gma}为几何质量空气动力学直径;D_{mma}为质量中位空气动力学直径;D_a为空气动力学直径.

气溶胶的表面性质是决定吸湿性的重要因素, Lee 等^[48]利用粒度谱仪(TSI Aerosizer 3220)研究了细胞壁结构不同的两种细菌革兰氏阴性大肠杆菌(*Escherichia coli*)与革兰氏阳性枯草杆菌(*Bacillus subtilis*)在不同 RH 条件下的粒径分布,同时选取 NaCl 和聚苯乙烯乳胶(PSL)两种气溶胶颗粒做对比.其中, NaCl 气溶胶的 GF 在约 95% RH 时为 1.65, 与前人的研究相比较小; PSL 小球气溶胶几乎没有吸湿增长; 大肠杆菌气溶胶的 GF 显著大于枯草杆菌, 其 GF 在 98% RH 下分别为 1.34 与 1.16. 研究表明除了与气溶

胶表面的可溶性成分有关之外,造成两种细菌不同吸湿性的原因还与细菌的细胞壁结构密切相关.

2.2 真菌孢子

真菌普遍存在于植物、土壤、动物、水以及室内等环境中.其中,多细胞真菌大多是丝状(菌丝体),其在繁殖期形成孢子.孢子释放可以看作成有性或无性生殖的一部分,这些孢子通常在大气中扩散,而环境条件如湿度、温度对真菌孢子粒径分布带来的影响至关重要.

Madelin 等^[46]测定了多种真菌孢子的吸湿性.该

研究表明当 RH 从 40% 升高至 95%, 且温度从 20°C 升高至 38°C 时, 真菌孢子链发生了断裂, 其粒径迅速增大, 而后, 当 RH 升至 98% 时, 大部分真菌气溶胶的空气动力学直径仍有明显的提升. 由表 1 可知, 当 98% RH 条件下, 真菌的吸湿增长因子范围为 1.06 (宛氏拟青霉, *Paecilomyces variotii*) 至 1.16 (烟曲霉, *Aspergillus fumigatus*). 因此, 该研究认为微生物所处的环境条件, 尤其是 RH 能够显著影响微生物气溶胶的粒径分布, 并与其沉积于人体肺部内的物理行为密切相关, 这对于研究霉菌引起的过敏性哮喘以及肺炎有着一定的意义.

此外, Reponen 等^[34]研究了 5 种不同真菌的空气动力学直径随 RH (30%~100%) 的变化, 实验结果如表 2 所示. 该研究表明, 5 种真菌包括短密青霉 (*Penicillium brevicompactum*)、梅林青霉 (*Penicillium melinii*)、采色曲霉 (*Aspergillus versicolor*)、烟曲霉 (*Aspergillus fumigatus*)、枝状枝孢菌 (*Cladosporium cladosporioides*) 在 90% RH 下的 GF 变化较小, 为约 1.04 (枝状枝孢菌) 至约 1.08 (梅林青霉), 但是当 RH 提高至约 100% 时, 真菌气溶胶的粒径可增大至原来的 27% 左右, 表现出较强的吸湿性.

2.3 花粉

花粉粒是大气中的重要生物成分, 特别是借助风力作为传播媒介的花粉 (风媒花粉), 包括裸子植物 (如冷杉、松树等)、一些被子植物 (如橡树、桦树、柳树和杨树等) 和草类等. 每到花粉季, 风媒植物产生和释放大量的花粉弥漫在大气中^[17,49], 落在植物雌性器官上, 得以完成授粉过程. 很多植物的花粉存在过敏原, 鼻炎、结膜炎和哮喘是花粉过敏的典型症状. 花粉在空气中的传播以及沉积于人体肺部的物理行为则与其吸湿性密切相关. 许多研究^[9,12,37,39,41]表明花粉粒子可以在高 RH 下吸收大量水分, 相关研究的结果总结见表 2.

Diehl 等^[41]利用可以调节湿度的分析天平, 测定了在 RH 为 73% 和 95% 条件下多种花粉包括新鲜采集和干燥状态下花粉颗粒的质量增长. 花粉样品来自于 4 种落叶树: 桦树 (*Betula alba*)、赤杨 (*Alnus incana*)、白杨 (*Populus nigra*)、橡树 (*Quercus rubra*); 2 种松柏科植物: 松树 (*Pinus sylvestris*) 与云杉 (*Picea alba*); 4 种草类植物: 小糠草 (*Agrostis alba*)、果园草 (*Dactylis glomerata*)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、黑

麦 (*Secale cereale*). 该研究表明当 RH 为 73% 时花粉吸收的水质量约为干燥颗粒的 10%, 当 RH 增加至 95% 时, 花粉的质量约为干燥时的 3 倍. 此外, Diehl 等^[41]发现草类的花粉比落叶树与松柏科植物的花粉吸水能力更强, 且天然采集的花粉与干燥的花粉相比吸水量较少.

Pope^[9]采用 EDB 方法测定了 4 种花粉在 295K 时不同 RH 条件下的吸湿增长, 包括水仙 (*Narcissus* sp.)、水桦 (*Betula occidentalis*)、柳树 (*Salix caprea*) 和黑胡桃 (*Juglans nigra*) 的花粉. 研究发现当 RH 为 75% 时, 4 种花粉的质量较干燥状态相比增加了约 16% (如图 2 所示). 另外, 该研究还发现在一定假设下, 花粉的吸湿增长可以通过修正后的 κ -Köhler 理论来进行描述, 得到的吸湿性参数 (κ) 的范围为 0.05~0.1. 此外, 通过 ESEM 实验表明, 在高 RH 下可以明显观察到花粉颗粒物的表面是湿润的. 在此基础上, Griffiths 等^[12]同样使用了 EDB 测量了另外 4 种类型花粉的吸湿性, 分别为黑麦草 (*Secale cereale*)、地肤 (*Kochia scoparia*)、三齿蒿 (*Artemisia tridentata*) 和假苍耳 (*Iva xantifolia*) 的花粉. 该研究的结果与 Pope 类似.

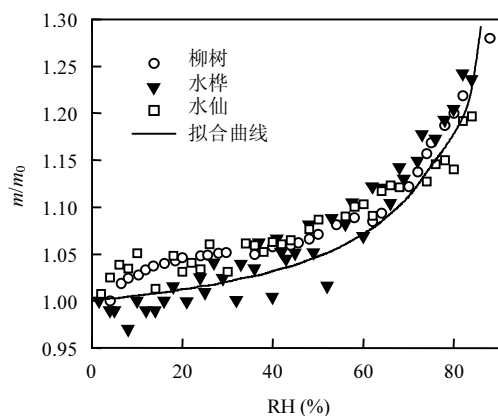


图 2 三种花粉的质量增长 (m/m_0) 随 RH 的变化.

Fig.2 Measured change of sample mass (m/m_0) of three pollen samples as a function of RH

最近, Tang 等^[37]使用 VSA、DRIFTS 和透射傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR), 系统研究了国内外 6 种代表性风媒植物花粉在多种温度下 (5, 15, 25 和 37°C) 的吸湿性, 包括美洲山杨 (*Populus tremuloides*)、美洲黑杨 (*Populus deltoides*)、山核桃、纸桑树、豚草与玉米的花粉颗粒物. 该研究发现, 这 6 种花粉颗粒物均具有较强的吸湿性. 在室温条件下 (25°C), 90% RH

下花粉颗粒物的质量相比干燥条件增大了 30%~50%,吸湿性参数(κ)范围为 0.034~0.061.另外该研究还发现花粉颗粒物的吸湿性普遍随着温度的升高而降低.DRIFTS 与 transmission FTIR 实验表明,花粉的吸湿性在很大程度上取决于花粉颗粒物中羟基的相对含量.该研究对于深入认识花粉颗粒物的环境行为具有重要意义,尤其是 37℃的实验结果,为模拟花粉颗粒物在呼吸系统内的传输和沉降以及评估其对人体健康的影响提供了关键基础数据.

随后,Chen 等^[39]首次测定了我国 11 种代表性花粉的吸湿性.该研究测定了 25 和 37℃条件下 6 种风媒植物:马尾松(*Pinus massoniana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、黄山松(*Pinus taiwanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、白皮松(*Pinus bungeana*)、蒲黄(*Typha angustifolia*)与 5 种虫媒植物:梨树(*Pyrus* sp.)、苹果树(*Malus pumila*)、桃树(*Amygdalus persica*)、李子树(*Prunus salicina*)、油菜花(*Brassica campestris*)花粉的吸湿性,并发现这些花粉都具有一定的吸湿性.在温度为 25℃时,RH 由 0%升高至 90%时,花粉颗粒物的质量增加了 33%~43%,所对应的吸湿性参数(κ)约为 0.04.就目前已有的数据来看,风媒花粉和虫媒花粉的吸湿性似乎没有系统差异,而中国常见花粉与欧洲/北美常见花粉的吸湿性也非常相似.此外,2 个温度下(25 和 37℃)花粉颗粒物吸湿性的差异比较小.

2.4 其它微生物气溶胶

除细菌、真菌以及花粉颗粒物之外,海洋气溶胶中的微生物吸湿性也是不少学者关注的焦点.海洋气溶胶包括初级和次级气溶胶成分.海洋气溶胶是由一次排放物质(例如海洋溅射产生的海盐以及其它有机物质)与二次生成的物质(来源于气粒转换过程,如成核和凝结过程)^[10, 50].海洋气溶胶中的微生物成分有着多种来源,其中一个来源是海洋浮游植物的代谢活动,浮游植物可产生溶解性和非溶解性的复杂混合物,包括有机化合物,如羧酸、脂类、氨基酸和碳水化合物.在海洋泡沫破裂过程中,这些成分可以被整合到粒子中.

研究表明^[10-11]不同藻类释放的有机物对海洋气溶胶粒子吸湿增长有一定的影响.Wex 等^[10]采用 H-TDMA 与 Leipzig 气溶胶与云相互作用模拟器(LACIS)测定了 6 种海水样品经雾化后形成的海洋

气溶胶在不同 RH 下的粒径变化,从而得到其 GF 值.6 种样品包括不含有机物的人工配置的海洋气溶胶和含营养物质的天然海洋气溶胶,另外 4 个样品是含有 4 种不同藻类:角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、赫氏圆石藻(*Emiliana huxleyi*)、棕囊藻(*Phaeocystis*)和海链藻(*Thalassiosira rotula*)渗出液的海水替代样品.研究结果表明人工配置的含有机物的海洋气溶胶吸湿增长因子较相似,GF 于 99% RH 时约为 4.0 左右,且略低于不含有机物的海洋气溶胶.因此推测藻类渗出液并不会增加海洋气溶胶的吸湿特性.但是,研究还指出除了浮游植物产生的分泌物以外,海洋气溶胶可能还含有从气相获得的有机物,这些物质也可能影响海洋气溶胶的吸湿性,进而影响全球气候.Fuentes 等^[11]同样利用 H-TDMA 测定了人工海洋气溶胶、含硅藻类海洋气溶胶和含纳米浮游生物渗出液海水气溶胶 3 类人工海洋气溶胶的 GF 值,结果与 Wex 等^[10]类似,含硅藻类海水雾化形成的气溶胶 GF 较不含有机物的人造海水相比低 9%~17%,且上述 2 个研究中渗出液混合物海水气溶胶于 90% RH 的 GF 均约为 2.0,表现出良好的一致性.

2.5 结果与讨论

图 3 总结了细菌、真菌孢子与花粉在高 RH (85%、90%、95%)下的吸湿增长因子 GF 以及吸湿前后质量的比值 m/m_0 .从总体来看,绝大部分的生物气溶胶都表现出了一定的吸湿性.其中,细菌于 90% RH 条件下的 GF 为约 1.08~1.22,高于同一 RH 下真菌孢子的 GF(约 1.04~1.08),且在其它两种高 RH 的条件下(80%、95%)也出现了类似的结果,但从整体来看,这 2 种微生物的吸湿性较相似.此外,含有藻类渗出液的人工海洋气溶胶 GF 显著高于其它类型的生物气溶胶粒子,其 GF 于 90% RH 约为 2.5,甚至高于氯化钠(GF~1.65,RH=98%)^[48].另外 Wex 等^[10]与 Fuentes 等^[11]一致认为藻类渗出液的存在会抑制人工海洋气溶胶的吸湿增长.

随着 RH 的增加,花粉的质量呈现显著增长的趋势,当 RH 为 95%时,花粉的质量可达到其干燥状态下质量的 3 倍.另外不同文献报道的花粉粒子于 90% RH 条件下的吸湿性测量结果较吻合,其中 Tang 等^[37]与 Chen 等^[39]测量的 $m(90\%)/m_0$ (RH 为 90%时的质量比)分别为 1.30~1.55 和 1.33~1.43,但其余文献报道的 m/m_0 在 85%与 95% RH 下有一定差

距.值得注意的是,不同的花粉类型和测量手段均会导致测量结果的差异,因此不同研究的测量结果从总体上来看是一致的.

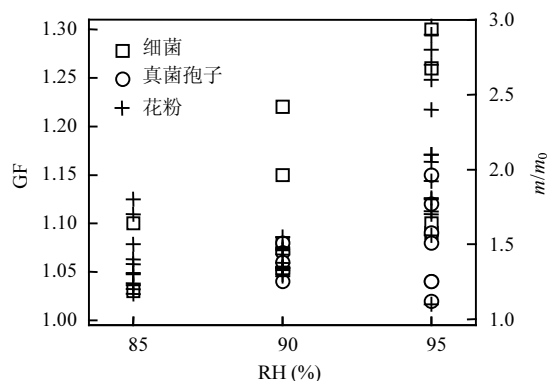


图3 生物气溶胶于高 RH 条件下的 GF 和 m/m_0
Fig.3 Hygroscopic growth factors (GF) and normalized sample mass (relative to that at <1% RH, m/m_0) at high RH for bioaerosols

花粉的测量结果以 m/m_0 来表示,其余生物气溶胶的测量结果以 GF 来表示

当 RH 为 90% 时,生物气溶胶的 GF 值约为 1.04~1.22,花粉颗粒物吸湿后的质量与之前的比值为 1.30~1.55,由此可以看出不同种类的生物气溶胶,其吸湿性有一定的差距,而引起差异的原因可能与生物气溶胶的化学成分与微观结构密切相关^[37,48],但确切的原因目前尚不明确.

3 结论与展望

3.1 结论

关于大气中生物气溶胶粒子的科学研究可以追溯到 19 世纪.此后,在各种不同的研究领域引起了学者的普遍关注,涉及的领域包括大气科学、免疫学、生物学、医学、生物化学、纳米与物理等^[49].经过过去近 30a 的实验室研究,积累了在不同温度和 RH 条件下,不同来源生物气溶胶的吸湿性数据.

由于细菌与真菌的存活时间长且可以在各种极端环境条件下生存,对流行病学、农业以及生态等方面有着很重要的影响,因此已有不少学者对细菌与真菌孢子的吸湿性进行了较广泛的研究,并发现其所研究的细菌与真菌样品均具有一定的吸湿性,并在一定过饱和度条件下可活化为云凝结核.花粉作为一种最丰富的生物气溶胶粒子,特别是由风媒植物产生的花粉,能够大量存在于大气中,与许多过敏性疾病息息相关.不少种类的花粉,尤其是风媒

花粉的吸湿性与云凝结核活性也亦有报道.研究表明随着 RH 的升高,这些花粉均能够吸水,有些甚至出现表面膨胀现象,证明了花粉具有良好的吸湿性.此外,有学者对海洋中浮游植物所分泌的有机体是否具有吸湿性进行了研究,他们发现含 EPS 人工海洋气溶胶虽在一定过饱和度下可被活化为云凝结核,但其吸湿性却略低于不含有机物的人工海洋气溶胶.需要注意的是,在实际海洋生物气溶胶中,还有许多其它因素如除海盐以外的二甲基硫或其它有机物也会对气溶胶的吸湿性与云凝结核活性产生影响.

对细菌、真菌、花粉以及其它生物气溶胶吸湿性的研究有助于更好地了解其对地-气辐射平衡、气候以及人类健康的影响.

3.2 展望

目前对于微生物气溶胶吸湿性方面的研究还存在很多不足,未来还需在以下方面开展研究:

(1)丰富生物气溶胶吸湿性的研究种类.除细菌、真菌孢子以及花粉等生物气溶胶之外,其他在空气中悬浮的生物气溶胶的吸湿性也亟待研究,例如病毒、地衣与其他种类的浮游植物如甲藻、蓝藻等.

(2)生物气溶胶在大气中的停留时间、传输与吸湿性之间是否可以建立一个定量关系或模型,从而更好地模拟颗粒物在对流层的传输和沉降.

(3)造成不同生物气溶胶吸湿性差异的机制.虽然有部分研究推测造成同种生物气溶胶吸湿性差异的因素,如气溶胶的化学成分和微观结构等,但是不同种类生物气溶胶为什么会具有不同的吸湿性?生物气溶胶的代谢产物是否会影响其吸湿性?这些问题都还需要进一步探索研究.

(4)云凝结核活性代表了颗粒在水蒸气过饱和状态下的吸湿性.生物气溶胶对气候的主要影响之一是一些生物气溶胶具有良好的云凝结核活性等,因此,今后应深入研究微生物气溶胶的实际大气排放浓度、在区域和全球尺度上的季节变化以及光学特性等,并将实验室实验结果与大气外场观测结果联系起来,从而更加精确地估计生物气溶胶粒子对全球气候变化的影响.

(5)在我国复合污染条件下^[51],生物气溶胶的浓度、粒径分布规律、群落结构均会发生变化,例如,李等^[51]和马等^[52]发现雾霾期间真菌群落的主要菌

属种类与非雾霾天有显著差异。此外,相关研究表明^[53]严重污染地区的生物气溶胶粒子对气候和生态系统的潜在影响可能更为复杂,那么作为生物气溶胶的重要物化性质之一,吸湿性是否会在复合污染条件下发生改变,是否会显著影响其与大气污染物的反应速率与产物,这些问题都值得进一步探讨。

(6)在健康效应方面,建立生物气溶胶如花粉,细菌在呼吸系统内的传输和沉降模型,并研究吸湿性对其产生的影响。

参考文献:

- [1] Després V, Huffman J A, Burrows S M, et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review [J]. *Tellus B*, 2012, 64:15598.
- [2] Fröhlich-Nowoisky 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.
- [3] Pöschl U, Martin S T, Sinha B, et al. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon [J]. *Science*, 2010, 329:1513–1516.
- [4] Elbert W, Taylor P E, Andreae M O, et al. Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007,7:4569–4588.
- [5] Estillore A D, Trueblood J V, Grassian V H. Atmospheric chemistry of bioaerosols: heterogeneous and multiphase reactions with atmospheric oxidants and other trace gases [J]. *Chemical Science*, 2016,7:6604–6616.
- [6] Franc G D, Demott P J. Cloud activation characteristics of airborne *Erwinia carotovora* cells [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 37:1293–1300.
- [7] Bauer H, Giebl H, Hittenberger R, et al. Airborne bacteria as cloud condensation nuclei [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003,108: 4658.
- [8] Möhler O, DeMott P J, Vali G, et al. Microbiology and atmospheric processes: the role of biological particles in cloud physics [J]. *Biogeosciences*, 2007,4:1059–1071.
- [9] Pope F D. Pollen grains are efficient cloud condensation nuclei [J]. *Environmental Research Letters*, 2010,5:044015.
- [10] Wex H, Fuentes E, Tsagkogeorgas G, et al. The influence of algal exudate on the hygroscopicity of sea spray particles [J]. *Advances in Meteorology*, 2010,2010:1–11.
- [11] Fuentes E, Coe H, Green D, et al. On the impacts of phytoplankton-derived organic matter on the properties of the primary marine aerosol – Part 2: Composition, hygroscopicity and cloud condensation activity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011,11:2585–2602.
- [12] Griffiths P T, Borlace J S, Gallimore P J, et al. Hygroscopic growth and cloud activation of pollen: a laboratory and modelling study [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2012,13:289–295.
- [13] Pummer B G, Bauer H, Bernardi J, et al. Chemistry and morphology of dried-up pollen suspension residues [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2013,44:1654–1658.
- [14] Morris C E, Conen F, Alex Huffman J, et al. Bioprecipitation: a feedback cycle linking earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere [J]. *Global Change Biology*, 2014,20:341–51.
- [15] Steiner A L, Brooks S D, Deng C, et al. Pollen as atmospheric cloud condensation nuclei [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015,42:3596–3602.
- [16] Delort A M, Vaitilingom M, Amato P, et al. A short overview of the microbial population in clouds: Potential roles in atmospheric chemistry and nucleation processes [J]. *Atmospheric Research*, 2010,98:249–260.
- [17] 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 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,51:4119–4141.
- [18] Brown J K M, Hovmöller M S. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease [J]. *Science*, 2002,297:537–541.
- [19] Langer V, Hartmann G, Niessner R, et al. Rapid quantification of bioaerosols containing *L. pneumophila* by Coriolis® μ air sampler and chemiluminescence antibody microarrays [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2012,48:46–55.
- [20] 袁文燕,王 鹏,伯 鑫,等.含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(7):3173–3178.
- [20] Yuan W Y, Wang P, Bo X, et al. The potential impact of bioaerosol emissions on human health threats. [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(7):3173–3178.
- [21] Hofmann W. Modelling inhaled particle deposition in the human lung—A review [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2011,42:693–724.
- [22] Shiraiwa M, Ueda K, Pozzer A, et al. Aerosol health effects from molecular to global scales [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,51:13545–13567.
- [23] Womack A M, Bohannon B J, Green J L. Biodiversity and biogeography of the atmosphere [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2010,365:3645–53.
- [24] Ko G, First M W, Burge H A. Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG aerosols [J]. *Tubercle and Lung Disease*, 2000,80:217–28.
- [25] Titos G, Cazorla A, Zieger P, et al. Effect of hygroscopic growth on the aerosol light-scattering coefficient: A review of measurements, techniques and error sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 141:494–507.
- [26] Haarig M, Ansmann A, Gasteiger J, et al. Dry versus wet marine particle optical properties: RH dependence of depolarization ratio, backscatter, and extinction from multiwavelength lidar measurements during SALTRACE [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17:14199–14217.
- [27] Petters M D, Kreidenweis S M. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007,7:1961–1971.
- [28] Delort A-M, Deguillaume L, Renard P, et al. Impacts on cloud

- chemistry. In "Microbiology of aerosols" [J]. John Wiley & Sons, 2017:221–248.
- [29] Harrington J B, Metzger K. Ragweed pollen density [J]. American Journal of Botany, 2000,50:532–539.
- [30] Bunderson L D, Levetin E. Hygroscopic weight gain of pollen grains from Juniperus species [J]. International Journal of Biometeorology, 2015,59:533–40.
- [31] Hirose Y, Osada K. Terminal settling velocity and physical properties of pollen grains in still air [J]. Aerobiologia, 2015,32:385–394.
- [32] Douwes J, Thorne P, Pearce N, et al. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects [J]. Annals of Occupational Hygiene, 2003,47:187–200.
- [33] Walser S M, Gerstner D G, Brenner B, et al. Evaluation of exposure-response relationships for health effects of microbial bioaerosols – A systematic review [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2015,218:577–89.
- [34] Reponen T, Willeke K, Ulevicius V, et al. Effect of relative humidity on the aerodynamic diameter and respiratory deposition of fungal spores [J]. Atmospheric Environment, 1996,30:3967–3974.
- [35] Broday D M, Georgopoulos P G. Growth and deposition of hygroscopic particulate matter in the human lungs [J]. Aerosol Science & Technology, 2001,34:144–159.
- [36] Tang M, Cziczo D J, Grassian V H. Interactions of water with mineral dust aerosol: Water adsorption, hygroscopicity, cloud condensation, and ice nucleation [J]. Chemical Reviews, 2016,116:4205–59.
- [37] Tang M, Gu W, Ma Q, et al. Water adsorption and hygroscopic growth of six anemophilous pollen species: the effect of temperature [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19:2247–2258.
- [38] Tang M, Chan C K, Li Y J, et al. A review of experimental techniques for aerosol hygroscopicity studies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19:12631–12686.
- [39] Chen L, Chen Y, Chen L, et al. Hygroscopic properties of 11 pollen species in China [J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2019,3:2678–2683.
- [40] Gu W, Li Y, Zhu J, et al. Investigation of water adsorption and hygroscopicity of atmospherically relevant particles using a commercial vapor sorption analyzer [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017,10:3821–3832.
- [41] Diehl K, Quick C, Matthias-Maser S, et al. The ice nucleating ability of pollen Part I: Laboratory studies in deposition and condensation freezing modes [J]. Atmospheric Research, 2001,58:75–87.
- [42] Prather K A, Hatch C D, Grassian V H. Analysis of atmospheric aerosols [J]. Annual Review of Analytical Chemistry, 2008,1:485–514.
- [43] Pósfai M, Buseck P R. Nature and climate effects of individual tropospheric aerosol particles [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010,38:17–43.
- [44] Ault A P, Axson J L. Atmospheric aerosol chemistry: Spectroscopic and microscopic advances [J]. Analytical Chemistry, 2017,89:430–452.
- [45] Smets W, Moretti S, Denys S, et al. Airborne bacteria in the atmosphere: Presence, purpose, and potential [J]. Atmospheric Environment, 2016,139:214–221.
- [46] Madelin T M, Johnson H E. Fungal and actinomycete spore aerosols measured at different humidities with an aerodynamic particle sizer [J]. Journal of Applied Bacteriology, 1992,72:400–409.
- [47] Johnson D L, Pearce T A, Esmen N A. The effect of phosphate buffer on aerosol size distribution of nebulized *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* bacteria [J]. Aerosol Science and Technology, 1999,30:202–210.
- [48] Lee B U, Kim S H, Kim S S. Hygroscopic growth of *E. coli* and *B. subtilis* bioaerosols [J]. Aerosol Science, 2002,33:1721–1723.
- [49] 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, 2018,63:878–894.
- Zheng Y H, Li J, Chen H X, et al. Bioaerosol research: Yesterday, today and tomorrow [J]. China Science Bulletin, 2018,63:878–894.
- [50] O'Dowd C D, de Leeuw G. Marine aerosol production: a review of the current knowledge [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2007,365:1753–1774.
- [51] 李彦鹏,刘鹏霞,谢铮胜,等.霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展 [J]. 科学通报, 2018,63:940–953.
- Li Y P, Liu P X, Xie Z S, et al. Recent research progress and perspective of characteristics of ambient bioaerosols during hazy pollution in China [J]. China Science Bulletin, 2018,63:940–953.
- [52] 马曼曼,毓 甄,米铁柱,等.青岛冬季霾天不同粒径生物气溶胶中细菌群落特征研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37:2855–2865.
- Ma M M, Zhen Y, Mi T Z, et al. Bacterial community characteristics in different particle sizes of bioaerosols in winter haze days in Qingdao. [J]. China Environmental Science, 2017,37:2855–2865.
- [53] Hu W, Wang Z, Huang S, et al. Biological Aerosol Particles in Polluted Regions [J]. Current Pollution Reports, 2020,6:65–89.

致谢: 本文引用了全国及欧美等国家地区颗粒物吸湿性的实验室研究结果,在此对作者致以由衷的谢意。

作者简介: 陈兰夏迪(1997–),女,浙江温州人,中国科学院广州地球化学研究所博士研究生,主要从事大气颗粒物的吸湿性及其环境气候和生物地球化学效应.发表论文 1 篇。