

室外空气细菌群落特征研究进展*

方治国¹ 欧阳志云^{1**} 胡利锋^{1,2} 王效科¹ 林学强¹

(¹中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室 北京 100085)

(²湖南农业大学植保学院 长沙 410128)

摘要 着重论述了空气细菌的来源、粒子特征、群落特征、浓度的时空变化及其群落结构的影响因素. 国内外研究结果表明:空气细菌主要来源于自然界的土壤、动植物、人类和水体,另外一些非自然的人类活动也是其重要来源;空气细菌的粒径主要在 0.3~15.0 μm 间变化,海岸边细菌气溶胶的粒径相对较小,而其他地方 84% 或更多的细菌粒子的粒径 $\geq 2.1 \mu\text{m}$;空气中革兰氏阳性细菌占绝大多数,无论在森林、海岸、城市还是乡村,芽孢杆菌(*Bacillus*)都是优势菌属;一年中空气细菌浓度夏季最高,冬季最低,一天中则可以明显的划分为 5 个阶段:(i) 午夜细菌浓度最低,(ii) 日出时细菌浓度达到高峰,(iii) 正午细菌浓度积累逐渐上升,(iv) 下午后期细菌浓度降低,(v) 晚上到午夜细菌浓度较低;人类活动频繁,动植物较多的地方空气细菌浓度较高. 此外,空气细菌不仅与各种环境因素有关,还受到各种污染因子的影响. 表 2 参 53

关键词 空气细菌; 群落结构; 粒子特征; 影响因素

CLC Q938.108

ADVANCE IN CHARACTERISTICS OF AIRBORNE BACTERIA COMMUNITIES IN OUTDOOR ENVIRONMENT*

FANG Zhiguo¹, OUYANG Zhiyun^{1**}, HU Lifeng^{1,2}, WANG Xiaoke¹ & LIN Xueqiang¹

(¹Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

(²College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract The review focuses on the progresses of airborne bacteria in outdoor environment, including their sources, particle and community characteristics, space-time fluctuation of concentration and influence factors of community structure. The research prospects of outdoor airborne bacteria were also discussed. It is suggested that soil, animal, vegetation, human being and water body are the main sources, and other unnatural human activities are also the important factors. The particle diameter ranges from 0.3 μm to 15 μm , and in coastal areas it is smaller than that of other areas, where more than 84% bacteria particles are larger than 2.1 μm . Generally speaking, gram-positive bacteria are much more than gram-negative bacteria in the air. In forests, coastal areas, cities and villages, *Bacillus* is the main genus of bacteria. The concentration reaches lowest in winter, while highest in summer in a year. The diurnal distribution of bacteria in the atmosphere can be divided into five periods: (i) the night-time minimum concentration (23:00 to 06:00), (ii) the sunrise peak concentration (06:00 to 08:00), (iii) the midday accumulating concentration (08:00 to 15:15), (iv) the later afternoon lower concentration (15:15 to 17:00), and (v) the evening decrease to the night-time minimum concentration (17:00 to 23:00). In the areas with more human activities, animals and vegetations, the concentration of the airborne bacteria is high, and the bacteria are affected not only by environmental factors, but also by pollution factors. Tab 3, Ref 53

Keywords airborne bacteria; community structure; particle characteristics; influence factors

CLC Q938.108

空气微生物的研究可追溯到 19 世纪初期 Schwann 发现细菌材料在空气中被微生物发酵和腐化^[1],之后 Pasteur 在实验室培养基上研究空气细菌群落的空间分布特征^[2],20 世纪初期 Lindbergh 从飞机窗口在大西洋上空用平皿沉降法发现了空

气细菌^[3],70 年代在地球表面 60~70 km 的高空也发现了细菌^[4].到目前为止,空气微生物的研究已经历了约一个半世纪,以往空气微生物学研究的主要内容是微生物空气污染和空气疾病的传播,主要包括动物和植物疾病的微生物流行病学调查^[5].近年来,空气细菌学的研究重点已经转向农业活动,例如微生物杀虫剂^[6]、堆制肥料、发酵工程、耕作措施等^[7]都能够加大细菌向空气中的释放.此外,由于交通和人类活动的影响,城市空气微生物污染以及不同监测系统的研究差异也是空气微生物学的研究热点之一^[8].

空气中大部分细菌对动物包括人类没有危害,但是也存在

收稿日期:2003-12-11 接收日期:2004-03-01

* 中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX3-SW-424)资助 Supported by the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences

** 通讯作者 Corresponding author (E-mail: zyouyang@mail.rcees.ac.cn; zhgfang77@sohu.com)

一些病原菌,可以在空气 中进行繁殖并且能够向周围的环境中扩散,导致人类过敏反应,对免疫力低下的人们造成严重的健康危害^[9]. 因此空气细菌的研究越来越受到人们的重视,掌握室外空气细菌的群落特征和动态变化规律及其影响因素,对维持人们的健康状况,控制微生物疾病的发生以及减少环境污染和改善环境质量具有重要的理论和现实意义. 本文对国内外空气细菌的研究进展作了简要的概述.

1 空气细菌的来源

空气细菌是以气溶胶的形式存在于空气中的,所有细菌气溶胶都是通过自然界进入空气中的. 从某种程度上说,空气细菌的存在和分布是以人类为中心的^[5],因此空气细菌主要来源于自然界的土壤、动植物和人类,所有的水体界面包括湖泊、海洋、河流等也是空气细菌的来源之一,另外,一些非自然的活 动如污水处理、动物饲养、发酵过程和农业活动等也是其重要来源^[10,11].

空气细菌主要来源于土壤主要有以下 3 个原因:(1)相对于陆源空气中的细菌,海洋上空的细菌较少;(2)空气细菌的浓度与大风暴和人类活动如扰乱土壤的农业收获密切相关,后者能够明显增加空气中细菌的浓度,如在秋天收获的季节,农事操作能够提高乡村空气微生物的浓度. 在风干棚,至少 41.9% 的空气细菌直接来源于收获活动,其中的 73% 是可培养的;(3)空气细菌的种类与土壤中细菌种类相似. 但是空气细菌浓度在植物活动较多的夏季和秋季较高,不是春季耕作时候较高,这也可以说明植物也是空气细菌的重要来源,并且研究表明,不同植物表面微生物的种类和数量不相同,如麦子附生植物细菌比玉米中高^[5,7,12~14]. 另外人类活动也能够持续地

造成室外微生物空气污染,例如城市活动能够形成城市“细菌岛屿效应”,导致城市中的空气细菌浓度高于乡村和郊区^[15].

2 空气细菌的粒子特征

空气细菌的粒径主要在 0.3 ~ 15.0 μm 间变化. 由于空气流通较多,海岸边细菌气溶胶的粒径相对较小,而其它地方 84% 或更多的细菌粒子的粒径 $\geq 2.1 \mu\text{m}$,并且其中值直径接近于 3.6 μm ^[15,16]. Bovallius 研究表明,瑞典乡村、海岸、城市停车场、城市街道约 50% 空气细菌的粒径大于 8.0 μm ^[12]. 胡庆轩等用国产安德森(Anderson)采样器测定京津地区空气细菌的粒度分布,指出北京西单大于 2.0 μm 的空气细菌粒子占 83.0%,大于 8.2 μm 的粒子占 29.8%. 沈阳小于 8.2 μm 的细菌粒子占 61.4%,并且空气细菌粒度呈偏正态分布^[17]. 张朝隆等在北京 307 医院外环境测定空气细菌粒度分布得出,大于 4.7 μm 和 3.3 ~ 0.65 μm 两个范围捕获的粒数分别占 69.9% 和 30.4%^[18].

空气中细菌粒子的直径大于细菌本身大小($\approx 1.0 \mu\text{m}$)的主要原因 是细菌粘附在其来源物质粒子如无定形植物,真菌和土壤残骸及细菌泥渣(bacterial-slurry residue)上,这里的细菌泥渣包括液体培养液,海浪花,叶片组织水等^[19].

3 空气细菌的群落特征

3.1 空气细菌的群落结构和物种组成

空气中的自然微生物主要是非病原性腐生菌. 据 Wright 报道,各种球菌占 66%,芽孢菌占 25%,还有霉菌、放线菌、病毒、蕈类孢子、花粉、微球藻类、原虫及少量厌氧芽孢菌等^[20].

表 1 不同生态系统空气微生物群落结构和物种组成(w/%)^[5,15,19]
Table1 Community structure and species composition(w/%) of airborne bacteria in different ecosystems

物 种 Bacteria	生态系统 Ecosystems			
	森林 Forest	海岸 Coastal	城市 Urban	乡村 Rural
革兰氏阳性菌 Gram-positive				
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	41.7	12.3	45.2	31.8
节杆菌属 <i>Arthrobacter</i>	1.4	7.7	0.0	1.6
金杆菌属 <i>Aureobacterium</i>	0.0	1.5	2.7	0.0
纤维单胞菌属 <i>Cellulomonas</i>	0.0	0.0	2.7	3.9
棍状杆菌属 <i>Clavibacter</i>	12.5	3.1	2.7	5.4
棒杆菌属 <i>Corynebacterium</i>	0.0	1.5	0.0	2.3
短小杆菌属 <i>Curtobacterium</i>	15.3	9.2	19.2	14.7
微杆菌属 <i>Microbacterium</i>	0.0	0.0	2.7	1.6
脂肪杆菌属 <i>Pimelobacter</i>	1.4	3.1	0.0	0.0
红球菌属 <i>Rhodococcus</i>	5.5	6.2	0.0	6.2
微球菌属 <i>Micrococcus</i>	0.0	6.2	2.7	0.8
未知 Unknowns	6.9	21.5	6.9	11.6
总革兰氏阳性菌 Total Gram-positive	84.7	72.3	84.8	79.7
革兰氏阴性菌 Gram-negative				
不动杆菌属 <i>Acinetobacter</i>	1.4	0.0	0.0	0.0
产碱杆菌属 <i>Alcaligenes</i>	0.0	0.0	0.0	0.8
苍白杆菌属 <i>Ochrobacterium</i>	0.0	0.0	1.5	0.0
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	5.5	10.8	5.5	9.3
黄单胞菌属 <i>Xanthomonas</i>	4.2	7.7	4.1	3.8
肠杆菌属 <i>Enterobacter</i>	0.0	0.0	0.0	1.6
克雷伯氏菌属 <i>Klebsiella</i>	0.0	0.0	0.0	0.8
沙雷氏菌属 <i>Serratia</i>	0.0	1.5	0.0	0.0
未知 Unknowns	4.2	7.7	4.1	3.8
总革兰氏阴性菌 Total Gram-negative	15.3	27.7	15.2	20.1

3.1.1 不同生态系统空气细菌的群落结构和物种组成

Shaffer & Lighthart 等研究表明,在森林、海岸、城市和乡村 4 个生态系统中,共出现 19 属细菌,其中革兰氏阳性菌 11 属,阴性菌 8 属(表 1)。森林中出现 9 属细菌,革兰氏阳性菌 6 属,阴性菌 3 属,其中芽孢杆菌占 41.7%,短小杆菌占 15.3%;海岸出现 12 属细菌,革兰氏阳性菌 9 属,阴性菌 3 属,其中芽孢杆菌占 12.3%,假单胞菌占 10.8%,短小杆菌占 9.2%;城市中出现 10 属细菌,革兰氏阳性菌 7 属,阴性菌 3 属,其中芽孢杆菌占 45.2%,短小杆菌占 19.2%;乡村出现 14 属细菌,革兰氏阳性菌 9 属,阴性菌 5 属,其中芽孢杆菌占 31.8%,短小杆菌占 14.7%。革兰氏阳性菌明显多于革兰氏阴性菌,其中革兰氏阳

性优势菌属为芽孢杆菌和短小杆菌,阴性优势菌属为假单胞菌和黄单胞菌^[5,15,19]。

3.1.2 不同城市空气细菌的群落结构和物种组成

综合文献结果(表 2),不同城市空气中出现的细菌共有 31 属,革兰氏阳性菌较多,革兰氏阴性菌较少,其中优势菌属为芽孢杆菌属、葡萄球菌属和微球菌属。发达国家瑞典城市中空气细菌的种类较多。而在中国经济发达,流动人口较多的城市北京、上海空气细菌的种类较多,而流动人口较少的合肥和乌鲁木齐细菌出现的种类最少。因此在发达国家和城市,由于人口流动较多,空气污染严重,空气微生物的种类较多,容易传播和发生各种疾病^[10,21~27]。

表 2 不同城市空气细菌的群落结构和物种组成^[21~27]

Table 2 Community structure and species composition of airborne bacteria in different cities

物 种 Group	瑞典 Sweden	北京 Beijing	抚顺 Fushun	沈阳 Shenyang	合肥 Hefei	上海 Shanghai	兰州 Lanzhou	乌鲁木齐 Wulumuqi
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
芽孢乳杆菌属 <i>Sporolactobacillus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
微杆菌属 <i>Microbacterium</i>	-	+	+	+	-	-	+	-
短杆菌属 <i>Brevibacterium</i>	-	+	+	+	-	-	-	-
棒杆菌属 <i>Corynebacterium</i>	-	+	-	-	-	+	+	-
产碱杆菌属 <i>Alcaligenes</i>	-	+	+	+	-	+	-	-
节杆菌属 <i>Arthrobacter</i>	-	+	-	+	-	-	+	-
拟杆菌属 <i>Bacteroides</i>	-	-	-	+	-	-	-	-
不动杆菌属 <i>Acinetobacter</i>	+	-	-	-	-	+	-	-
乳酸杆菌属 <i>Lactobacillus</i>	+	-	-	-	-	-	+	-
李斯特氏杆菌属 <i>Listerium</i>	-	-	-	-	-	-	+	-
葡萄球菌属 <i>Staphylococcus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
微球菌属 <i>Micrococcus</i>	+	+	+	+	+	+	+	-
双球菌属 <i>Diplococcus</i>	-	-	+	-	-	-	-	-
气球菌属 <i>Aerococcus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
链球菌属 <i>Streptococcus</i>	+	+	+	-	-	+	-	-
片球菌属 <i>Pediococcus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
副球菌属 <i>Paracoccus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
足球菌属 <i>Pediococcus</i>	-	-	+	-	-	-	-	-
八叠球菌属 <i>Sarcina</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
奈瑟氏球菌属 <i>Neisseria</i>	+	-	+	+	-	+	-	-
消化球菌属 <i>Peptococcus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
消化链球菌 <i>Peptostreptococcus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	+	+	+	-	-	+	-	-
纤维单胞菌属 <i>Cellulomonas</i>	-	-	-	+	-	-	-	-
芽孢八叠球菌属 <i>Sporosarcina</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
动胶菌属 <i>Zoogloea</i>	-	-	+	-	-	-	-	-
明串珠菌属 <i>Leuconostoc</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
克雷伯氏菌属 <i>Klebsiella</i>	-	-	-	+	-	-	-	-
布鲁氏菌属 <i>Brucella</i>	-	-	-	+	-	-	-	-
沙雷氏菌属 <i>Serratia</i>	+	-	-	-	-	-	-	-

+ : 出现 Present; - : 没有出现 Not present

3.2 空气细菌群落结构的时间变化

空气细菌群落结构和物种组成在不同的时间不同。Light-hart 发现产孢革兰氏阳性菌晚上最低,占 17%,白天最高,占 35%;革兰氏阴性菌晚上最高,占 22%,白天最低,占 ≤ 12%^[5]。Shaffer 等研究表明,白天 06:00~08:59 革兰氏阳性菌占 69%,革兰氏阴性菌占 31%;09:00~11:59 革兰氏阳性菌占 78.65%,革兰氏阴性菌占 21.35%;12:00~14:59 革兰氏阳性菌占 86.83%,革兰氏阴性菌占 13.17%;15:00~17:59 革兰氏阳性菌占 85.15%,革兰氏阴性菌占 14.85%^[5,15]。

3.3 空气细菌群落结构的空间变化

虽然过去在不同的环境中对空气细菌进行了分类,但是不

同的培养基,不同的试验介质和不同的接种条件都能够导致分类鉴定的不确定性^[5]。Shaffer 等用相同的培养基和接种条件在森林、海岸、城市和乡村试验表明,森林革兰氏阳性菌占 84.7%,革兰氏阴性菌占 15.3%;海岸革兰氏阳性菌占 72.3%,革兰氏阴性菌占 27.7%;城市革兰氏阳性菌占 84.8%,革兰氏阴性菌占 15.2%;乡村革兰氏阳性菌占 79.7%,革兰氏阴性菌占 20.1%,其中 21%的革兰氏阳性菌没有鉴定结果。在所有的生态系统中,芽孢杆菌是室外空气中最多的细菌属,占 12.3%~45.2%。革兰氏阴性菌占空气细菌很少的一部分,优势菌属为假单胞菌和黄单胞杆菌,分别占整个群落的 5.5%~10.8%,0.0~7.7%。此外,乡村空气中具有

较多的假单胞菌,而海岸边则有较多的黄单胞杆菌^[5,15]。

4 空气细菌浓度的时空分布特征

4.1 空气细菌浓度的时间变化

空气中细菌的浓度一直是处于变化之中,在很短的时间内都会有很大的变化。在农田或者农地中,样本间 15 min 的自相关性为 $>70\% \pm 5.6\%$,而样本间的差异 2 min 内最大能够达到 4 100%^[5],所以必须通过增加样本量获得足够的数据和资料来反映空气细菌的时间分布特征。

Shaffer 等研究表明,在乡村地区空气细菌浓度在日出时增加,正午时开始降低,之后持续增加到日落,在 21:00 和 5:00 空气细菌浓度最低^[15]。在两个山脉间的河谷中,Lightart 首次测定了空气表面层细菌浓度每隔 2 min 的日变化状况,观察结果与测定地点的具体位置和气象条件密切相关。在这个山谷中,可培养细菌在一天中可以明显的划分为 5 个阶段:(i) 午夜细菌浓度最低;(ii) 日出时细菌浓度达到高峰;(iii) 正午细菌浓度积累逐渐上升;(iv) 下午后期海风使之细菌浓度降低;(v) 晚上到午夜细菌浓度较低^[28]。

在沙特阿拉伯 El-Taif 市附近的 Shoubra, El-Faisalyia, El-Mashi 和 El-Shuhda, 夏季由于温度较高,空气细菌的浓度明显高于其它季节,虽然冬季多湿多雨,其细菌的浓度高于春季和秋季^[29];墨西哥空气细菌浓度在夏季较高,而在冬季和春季较低,这可能由于墨西哥夏季干旱,灰尘较多,而冬季多雪,春季多雨^[30];加拿大蒙特利尔空气细菌浓度的季节变化状况与墨西哥一样,同样与夏季干旱,灰尘较多,而冬季多雪,春季多雨有关^[31];华盛顿空气细菌的调查结果也是冬季浓度最低,而晚夏空气细菌浓度最高^[32]。空气中细菌浓度较低可能是高太阳辐射,高温低湿或各因素综合作用的结果。

4.2 空气细菌浓度的空间变化

由于取样时间、取样方法、取样介质、取样高度和气象条件不同,不同地区空气细菌的浓度各不相同。巴黎空气细菌浓度为 $n(\text{CFU}) = 1\,000\text{ m}^{-3}$ ^[33],南非的约翰内斯堡为 $175 \sim 8\,000\text{ m}^{-3}$ ^[34],瑞典为 $2\,000 \sim 4\,000\text{ m}^{-3}$ ^[12],美国沙漠中为 $10 \sim 150\text{ m}^{-3}$ ^[35],墨西哥为 $50 \sim 5\,730\text{ m}^{-3}$ ^[30],极地中为 $0 \sim 18\text{ m}^{-3}$,大西洋的热空气中为 $1 \sim 32\text{ m}^{-3}$ ^[36]。沙特阿拉伯 El-Taif 市附近的 Shoubra, El-Faisalyia, El-Mashi 和 El-Shuhda 空气细菌的浓度明显高于其附近其它的地区^[29];马赛城区空气细菌浓度算术平均值为 $(791 \pm 598)\text{ m}^{-3}$,几何平均值为 $(536 \pm 103)\text{ m}^{-3}$,而自然条件较好的 Porquerolles Island 空气细菌算术平均值为 $(42 \pm 70)\text{ m}^{-3}$,几何平均值为 $(26 \pm 7)\text{ m}^{-3}$ ^[37]。

Shaffer 等的研究表明,森林中空气细菌浓度较高为 $522 (665 \sim 410)\text{ m}^{-3}$,海岸最低为 $103 (116 \sim 91)\text{ m}^{-3}$,这可能是由于森林中的植被能够不断地向空气中输入细菌和人类活动的结果。空气色素细菌占总细菌浓度的 $20.5\% \sim 61.8\%$,乡村色素细菌百分比最高占 $61.8 (64.9\% \sim 58.7\%)$,森林中色素细菌百分比最低占 $20.5 (23.2\% \sim 18.0\%)$ ^[15]。

空气细菌的空间分布特征与菌流和气象条件密切相关。不同的环境条件下,空气菌流不同。沙漠丛林中空气菌流为 $4.7\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$,裸地空气菌流为 $42 \sim 1\,554.7\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$,麦子和紫花苜蓿中空气菌流分别为 $57\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 和 $543\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ^[14,15,38]。

5 空气细菌群落变化的影响因素

空气中微生物的群落结构和物种组成及其浓度很不稳定,随着各种环境气象因素及污染因子的变化,空气细菌的种类和数量均有很大的变化。空气细菌不仅受到温度、湿度、风速风向、光照、雨雪、雾滴、沙尘暴等各种气象因素的影响,还受到一氧化氮、二氧化氮、一氧化碳、碳水化合物、二氧化硫等各种污染因子的影响。

5.1 空气温度和相对湿度

空气温度和相对湿度对空气微生物的存活力有肯定的影响,空气温度对空气细菌水平的影响取决于微生物的种类和取样环境,而相对湿度能够增加空气细菌的水平^[37,39]。马赛和 Porquerolles Island 空气细菌浓度随着温度的增加而增加 ($P < 0.010$)^[37];齐齐哈尔市空气微生物粒子浓度与温度成正相关^[40];随着温度的升高,沈阳市空气微生物数量也随着增多,空气温度由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升到 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$,人口较少的大屯空气微生物由 11 个/皿增加到 80 个/皿,而人口群聚的中街由 779 个/皿增加到 835 个/皿^[25]。

5.2 风速和风向

风速和风向也是影响空气细菌浓度的重要因素。西北风能够增加法国马赛空气细菌浓度,而东南风则减少其空气细菌浓度^[37]。风能够使城市生态系统中各种污染物悬浮于空气中,风速大使空气细菌粒子浓度明显增大,空气细菌浓度升高^[41];并且风能使空气细菌小粒子的比例减少,而大粒子的比例增大,随着空气细菌粒子径的增大,空气细菌粒子浓度越大^[42]。在大风天气,上海和马赛空气细菌菌落数明显增加^[37,43]。

5.3 光照

光照对细菌的纯培养有着直接损伤甚至致死作用,这与细菌的种类和生理状态、光照强度(光照持久性)和光的波长密切相关^[44]。Tong 等研究发现,光照对室外空气细菌有明显的致死作用,其致死程度与光照剂量线性相关^[46]。夏天正午由于光辐射很强,沙漠中空气细菌的浓度最低^[46],在有遮盖物取样的条件下,空气细菌比无遮盖物条件下生长更多的群落。此外,光照还能够减少植被和土壤中细菌进入空气,从而减少空气中细菌的浓度^[47]。Yingyi Tong 等研究了模拟光辐射对空气细菌群落的影响,结果表明,模拟光辐射对空气中细菌群落有致死作用,其作用大小与总光强、光谱特征、微生物物种组成和粒子大小有关,正午强光照射条件下空气细菌的活性与其粒子大小呈线性相关($r^2 = 0.92$)。在晚上,宇宙光谱比陆地光谱对空气细菌有更强的致死作用($P < 0.05$),而正午则没有差异性^[47]。白天的光照能够减少空气中一些敏感的细菌群落,晚间的空气细菌群落对光照最敏感,是晴朗天气的 202%;其次是多云的天气,是晴朗天气的 142%,太阳光照很强天气的空气细菌群落对光照敏感性最差^[45]。

太阳辐射对空气细菌群落结构的影响可能是由于色素细菌和非色素细菌,晚上细菌对太阳辐射比白天细菌更加敏感。非色素细胞对太阳辐射的敏感和色素细胞对太阳辐射的不敏感是正午室外色素细菌比例增加的重要原因之一。在没有光化反应的条件下,空气细菌的辐射损伤修复呈现黑暗修复机理^[45,46]。

5.4 雨、雪、雾滴等

降雨对空气细菌有冲刷作用和净化作用,能够明显减少空气中细菌的浓度,空气细菌粒径越大,减少作用越强。阴雨天气空气细菌粒子浓度也明显减少。降雪对空气细菌粒子浓度也有明显的减少作用,可使细菌粒子浓度降低 22.4 倍,空气细菌粒子越大,减少的作用越强;降雪能够使空气中大于 $8.2\ \mu\text{m}$ 的细菌粒子百分比明显减少,而使小于 $2.0\ \mu\text{m}$ 的细菌粒子百分比明显增大, $2.0\sim 8.0\ \mu\text{m}$ 的细菌粒子百分比无明显变化^[48]。

Fuzzi 研究表明,雾滴可以作为空气微生物粒子的天然培养基,空气细菌浓度在有雾的条件下比洁净空气更高。并且空气细菌的浓度受到雾滴温度、化学组成和酸碱度的影响,不产孢细菌的浓度与雾滴的温度($r=0.93$)和 pH($r=0.86$)呈正相关,因为低温能够抑制微生物的生长。此外,雾滴温度和化学组成构影响空气细菌细胞的活性^[50]。

5.5 污染因子

空气微生物种类和数量肯定与污染因子的类型和浓度有着密切联系,有些因子能够促进空气细菌的活性,另些因子则抑制细菌的生长^[10, 50],但是污染因子对各种微生物的影响小于气象因子,在春季和秋季影响较大,冬季和夏季影响较小^[51]。Lighthart 和工作组成员在实验室研究了一氧化碳和二氧化硫对不同空气微生物的影响,结果表明,它们能够减少空气细菌的浓度^[52]。Mancinelli 等研究发现,空气细菌数量与一氧化氮浓度呈负相关($r=-0.45$),与二氧化氮($r=0.43$)和悬浮颗粒物($r=0.56$)浓度呈正相关;微球菌,气球菌,葡萄球菌,芽孢菌和球菌的数量与一氧化氮浓度呈负相关,与二氧化氮浓度呈正相关;芽孢菌总量与二氧化氮浓度($r=0.54$)和空气湿度($r=0.43$)呈正相关,此外,还发现空气细菌与二氧化硫,碳水化合物化合物的浓度无明显相关关系^[53]。

6 小结

空气细菌是生态系统中重要的生物组成部分之一,有着重要的生态系统功能和作用,而且与人类健康密切相关。要了解空气细菌的功能,必须对其群落结构和分布特征进行深入的研究。空气中微生物浓度过高会导致环境污染,影响和威胁人体健康,是影响空气质量的重要因素之一。因此国内外对空气细菌的研究开展了大量的工作,基本掌握了空气中细菌的来源、群落结构、粒子特征、浓度的分布状况及影响因素。但是作者认为,以下一些内容还需要进一步深入研究:(1)由于空气中没有微生物生存的基质和营养条件,它们只有以菌落的形式反映在微生物培养基上,这只是空气中微生物群落的很少一部分,大部分空气细菌都无法在微生物培养基上生长。用荧光显微镜法研究表明,可以培养生长的空气细菌占总空气总细菌的 $0.02\sim 10.6\%$,其余的都是死亡的或者存活的但无法培养生长的(viable but not culturable)^[53],所以必须利用更先进的技术和手段对空气细菌进行深入的研究。(2)取样条件和取样基质对空气细菌有重要的影响,为了方便比较不同地点和环境条件下的空气细菌,必须对培养基和取样条件制定统一标准。(3)要全面了解空气细菌群落分布特征,必须对空气细菌的来源作进一步的调查,并且进行综合评价,主要包括自然界的土壤、动植物和水体以及以人类活动为中心的微生物杀虫剂制作、人口密

集区、堆肥制作、污水处理等。(4)深入研究细菌进入空气的机理,特别是附生植物细菌进入空气和解吸附的机理。(5)空气细菌要受环境因素和污染因子的影响,因此也有必要研究空气条件对室外细菌存活的影响。(6)空气细菌能够导致各种疾病的发生,是影响人类健康的重要指标之一,故必须对空气细菌作为人类健康状况和环境条件的指标进行综合评价^[5]。

References

- Schwann T. Vorläufige mittheilung betreffend versuche über die weinghrung und f ulniss Poggendorf's. *Ann Physik Chem*, 1837, **41**: 184 ~ 193
- Pasteur M. M moire sur les corpuscules organizes qui existent dans l'atmosph re, examen de la doctrine des generations spontanées. *Ann Chim Phys*, 1862, **64**: 5 ~ 110
- Meier F. Collection microorganisms in the arctic atmosphere: with field notes and material by Lindbergh CA. *Arctic Monthly*, 1935, **40**: 5 ~ 20
- Imshenetshy A, Lysenko S, Kazakov G. Upper boundary of the biosphere. *Appl Environ Microbiol*, 1978, **35**: 1 ~ 5
- Lighthart B. The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. *FEMS Microbiol Ecol*, 1997, **23**: 263 ~ 274
- Flexner J, LihgthartB, Croft B. The effects of microbial pesticides on non - target beneficial arthropods. *Agric Ecosystem Environ*, 1986, **16**: 203 ~ 254
- Lighthart B. Microbial aerosols: estimated contribution of combine harvesting to an airshed. *Appl & Environ Microbiol*, 1984, **47**: 430 ~ 432
- Tong Y, Chen F, Ku X, et al. Population study of atmospheric bacteria at the Fengtai district of Beijing on two representative days. *Aerobiology*, 1993, **9**: 69 ~ 74
- Chang C, Chung H, Huang C et al. Exposure of workers to airborne microorganisms in open - air swine houses. *Appl & Environ Microbiol*, 2001, **67** (1): 155 ~ 161
- Mancinelli R, Shulls W. Airborne bacteria in an urban environment. *Appl & Environ Microbiol*, 1978, **35** (6): 1095 ~ 1101
- Spirin V, Mikhailova N. Microbial contamination of air at the swine - heeding farms. *Oig Sanit*, 1991, **5**: 34 ~ 36
- Bovallius A, Bucht B, Roffey R, et al. Long - range air transmission of bacteria. *Appl & Environ Microbiol*, 1978, **35** (6): 1231 ~ 1232
- 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** (5): 847 ~ 852
- Lindemann J, Constantinidou H, Barchet W, et al. Plants as source of airborne bacteria, including ice nucleation - active bacteria. *Appl & Environ Microbiol*, 1982, **44** (5): 1059 ~ 1063
- Shaffer B, Lighthart B. Survey of culturable airborne bacteria at four diverse locations in Oregon: urban, rural, forest, and coastal. *Microbiol Ecol*, 1997, **34**: 167 ~ 177
- Lighthart B, Shaffer B. Viable bacterial aerosol particle size distribution in the midsummer atmosphere at an isolated location in the high caparral. *Aerobiology*, 1995, **11**: 19 ~ 25
- Hu QX(胡庆轩), Chen ZS(陈振生), Xu GQ(徐桂清), Xu XZ(徐秀芝), Meng LY(孟令英), Che FX(车凤翔). Study on particle chart of airborne microbe in Beijing area. *Environ Monitoring China* (中国环境监测), 1991, **7**(1): 9 ~ 11
- Zhang ZL(张朝隆), Zhang SL(张松乐), Cheng ZS(陈振生), Jiang L(姜黎). Particle distribution of airborne bacteria in indoor and out-

- door environmental. *Environ Sci & Technol* (环境科学与技术), 1993, **4**: 31 ~ 35
- 19 Lighthart B, Shaffer B, Marthi B, *et al.* Artificial wind – gust liberation of microbial bioaerosol previously deposited on plants. *Aerobiology*, 1993, **9**: 189 ~ 196
- 20 Wright J, Greene V, Paulus H. Viable microorganisms in an urban atmosphere. *J Air Pollution Control Associate*, 1969, **19**: 337 ~ 339
- 21 Chen ML(陈梅玲), Hu QX(胡庆轩), Xu XZ(徐秀芝), Zhai JH(翟俊辉), Sun ZH(孙振海), Lu JC(鹿建春), Sun RQ(孙润桥). Investigations of airborne microbe pollution in Nanjing. *China Public Health* (中国公共卫生), 2000, **16**(6): 504 ~ 505
- 22 Li CH(李承海), Shen YL(沈玉兰). Study on distribution of airborne microbe over Fushun and the Ribbon of forest around the city. *J Liaoning Univ(Nat Sci Ed)* (辽宁大学学报·自然科学版), 1995, **22**(3): 83 ~ 88
- 23 Li NS(李能树), Chen J(陈赟), Yang J(杨嘉). The ecological distribution of atmospheric microbes in Hefei during the spring. *J Anhui Univ(Nat Sci Ed)* (安徽大学学报·自然科学版), 1997, **21**(3): 110 ~ 112
- 24 Sun RG(孙荣高). Pollution distribution and system composition of airborne bacteria in Lanzhou. *Chin Bull Microbe* (微生物学通报), 1994, **21**(2): 85 ~ 88
- 25 Zhou DS(周大石), Ma XP(马沙平), Liu YJ(刘玉晶), Wang XG(王晓光), Zhang HB(张海波). Study on system distribution of airborne microbe in Shenyang. *Environ Prot Sci* (环境保护科学), 1994, **20**(1): 10 ~ 14
- 26 Che FX(车凤翔), Xu GQ(徐桂清), Shi CY(史传英), Xu XZ(徐秀芝), Meng LY(孟令英). Ecological distribution of atmosphere bacteria over Beijing – Tianjin area. *Environ Sci China* (中国环境科学), 1990, **10**(3): 192 ~ 196
- 27 Song LH(宋凌浩), Song WM(宋伟民), Shi W(施玮). Study on airborne bacteria pollution in Shanghai. *Shanghai Environ Sci* (上海环境科学), 1999, **18**(6): 258 ~ 260
- 28 Mahdy H, EL – Sehwari M. Airborne bacteria in the atmosphere of El – Taif region, Saudi Arabia. *Water, Air, & Soil Poll*, 1997, **98**: 317 ~ 324
- 29 Lighthart B, Shaffer B. Airborne bacteria in the atmospheric surface layer: temporal distribution above a grass seed field. *Appl & Environ Microbiol*, 1995, **61**: 1492 ~ 1496
- 30 Vlodavets V, Mats L. The influence of meteorological factors on the microflora of the atmospheric air in Moscow. *J Microbiol*, 1958, **59**: 539 ~ 544
- 31 Kelly C, Pady S. Microbiological studies of air masses over Montreal during 1950 and 1951. *Can J Bot*, 1954, **32**: 591 ~ 600
- 32 Jones B, Cookson J. Natural atmospheric microbiological condition in a typical suburban area. *Appl Environ Microbiol*, 1983, **45**: 919 ~ 934
- 33 Gregory P. Microbiology of the atmosphere. *J Aerosol Sci*, 1973, **4**(4): 339
- 34 Yousefi V, Rama D. Monitoring of air for microbial and metal contamination at selected sites in the vicinity of Johannesburg, South Africa. *Sc Total Environ*, 1992, **116**: 159 ~ 167
- 35 Lighthart B, Shaffer B. Bacterial flux from chaparral into the atmosphere in midsummer at a high desert location. *Atmospheric Environ*, 1994, **7**: 1267 ~ 1274
- 36 Pady S, Kelly C. Numbers of fungi and bacteria in transatlantic air. *Science*, 1953, **117**: 607 ~ 609
- 37 Giorgio C, Krempff A, Guiraud H, *et al.* Atmospheric pollution by airborne microorganisms in the city of Marseilles. *Atmospheric Environ*, 1996, **30**(1): 155 ~ 160
- 38 Lindermann J, Upper C. Aerial dispersal of epiphytic bacteria over bean of the biosphere. *Appl Environ Microbiol*, 1985, **50**: 1229 ~ 1232
- 39 Marchisio V, Airaudi D, Barchi C. One year monitoring of the airborne fungal community in a suburb of Turin and assessment of its functional relations with the environment. *Mycol Res*, 1997, **101**: 821 ~ 828
- 40 Zhou YM(周晏敏), Chen ZY(陈振宇), Zhao ZG(赵志刚), Guo L(郭立). Pollution lever of airborne microbe in Qiqihaer. *Arid Environ Monitoring* (干旱环境监测), 1994, **8**(2): 97 ~ 99
- 41 Lighthart B, Kin J. Simulation of airborne microbial droplet transport. *Appl & Environ Microbiol*, 1989, **55**: 2349 ~ 2355
- 42 Hu QX(胡庆轩), Che FX(车凤翔), Chen ZS(陈振生), Xu GQ(徐桂清). Impact on airborne microbe particle concentration and chart distribution of large wind. *Environ Monitoring China* (中国环境监测), 1991, **7**(6): 5 ~ 8
- 43 Song LH(宋凌浩), Song WM(宋伟民), Shi W(施玮), Jiang RF(蒋蓉芳). Health effects of atmosphere microbiological pollution on respiratory system among children in Shanghai. *J Environment & Health* (环境与健康杂志), 2000, **17**(3): 135 ~ 138
- 44 Moss S, Smith K. Membrane damage can be a significant factor in the inactivation of *Escherichia coli* by near – ultraviolet radiation. *Photochem Photobiol*, 1981, **33**: 203 ~ 210
- 45 Tong Y, Lighthart B. A study of the relationship between pigmented outdoor atmospheric bacteria and solar radiation. *Photochem Photobiol*, 1997, **65**: 103 ~ 106
- 46 Tong Y, Lighthart B. Effect of simulated solar radiation on mixed outdoor atmospheric bacterial populations. *FEMS Microbiol Ecol*, 1998, **26**: 311 ~ 316
- 47 Fedorak P, Westlake D. Effect of sunlight on bacterial survival in transparent air samplers. *Can J Microbiol*, 1978, **24**: 618 ~ 619
- 48 Hu QX(胡庆轩), Lu JC(鹿建春), Che FX(车凤翔). Impact on airborne bacteria particles of snowfall. *Environ Prot Sci* (环境保护科学), 1992, **18**(4): 59 ~ 62
- 49 Fuzzi S, Mandrioli P, Peretto A. Fog droplets—an atmospheric source of secondary biological aerosol particles. *Atmospheric Environ*, 1997, **31**(2): 287 ~ 290
- 50 Lee R, Harris J, Akland G. Relationship between viable bacteria and air pollutants in an urban atmosphere. *J Am Ind Hyg Assoc*, 1973, **34**: 164 ~ 170
- 51 Lu AH(吕爱华), Su J(苏君), Yang YH(杨永红), Han WH(韩文慧). Gray relevance analysis between airborne and weather condition, air contamination. *Arid Environ Monitoring* (干旱环境监测), 1995, **9**(3): 143 ~ 146
- 52 Lighthart B. Survival of airborne bacteria in high urban concentration of carbon monoxide. *Appl Microbiol*, 1973, **25**: 86 ~ 91
- 53 Dimmick R, Wolochow H, Chatigny MA. Evidence for more than one division of bacteria within airborne particles. *Appl Environ Microbiol*, 1979, **38**: 642 ~ 643