

# 大气生物气溶胶的研究进展

杜睿

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 作者简述了国内外有关大气生物气溶胶的研究进展。主要围绕生物气溶胶的基本特性, 生物气溶胶采检技术的发展状况, 当前生物气溶胶的健康效应的研究进展及未来其环境效应和气候效应的研究动向等4个方面进行了阐述。

**关键词** 生物气溶胶 基本特性 健康效应 环境效应 气候效应

**文章编号** 1006-9585 (2006) 04-0546-07 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

## The Progress of Atmospheric Bioaerosol Research

DU Rui

*Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** The research progresses of atmospheric bioaerosol both domestic and abroad are summarized from four aspects. Mainly about the basic characteristic of atmospheric bioaerosol, the development and evaluation of sampling and monitoring technique, the current progress of research on its affect on human health and the trend of its environmental and climatic effect in the near future.

**Key words** bioaerosol, basic characteristic, health effect, environmental effect, climatic effect

### 1 引言

当前, 在整个国际大气科学领域的研究中, 气溶胶科学的研究方兴未艾, 是当今大气化学的最前沿领域之一<sup>[1]</sup>。现代科学技术的飞速发展, 为气溶胶科学的兴盛奠定了理论基础, 也创造了实验探测和数值模拟的条件。气溶胶科学已经愈来愈显示出强大的生命力, 具有显著的边缘学科性质, 正不断地向基础学科渗透, 研究内容覆盖面十分广阔, 涉及工农牧林、环境、气候、医学等的各个学科领域, 受到世界各国的科学家们的关注<sup>[2]</sup>。目前国际气溶胶科学的主要研究趋势已经

从人为源向天然源、生物地球化学循环源逐渐发展; 由总体颗粒物的研究发展到单个颗粒物的研究, 由一次微米级的颗粒物向亚微米级甚至纳米级的二次颗粒物发展; 对气溶胶组分的成分研究从一般的无机物元素成分分析向元素碳、有机碳、离子、有机物分子的分析发展, 这些研究大多侧重于其基本特性、气候效应及大气污染。尽管有些研究已涉及到生物质(细菌、病菌、霉菌等), 大气生物气溶胶作为一门新兴的交叉学科, 涉及多种学科, 与各个领域都有密切关系, 其对于空气污染、环境质量的评估以及人类健康的影响都已成为今后大气气溶胶科学研究的重要科学问题之一。

**收稿日期** 2005-01-25 收到, 2006-04-06 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金项目 40005009 和中国科学院野外台站网络基金项目

**作者简介** 杜睿, 女, 1970 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事全球气候与环境变化及地球生物化学循环过程及机理研究。

E-mail: ruidu2000@yahoo.com

## 2 生物气溶胶的概述

具有生命的气溶胶粒子（包括细菌、真菌、病毒等微生物粒子）和活性粒子（花粉、孢子等）以及由有生命活性的机体所释放到空气中的各种质粒被统称为生物气溶胶<sup>[3]</sup>。由于空气微生物是大气生物气溶胶的主要组成部分，所以生物气溶胶有时又被称为微生物气溶胶，依其种类可划分为细菌气溶胶、真菌气溶胶、病毒气溶胶等。具有较大意义的生物气溶胶的粒径范围是 0.1~20.0 μm。生物气溶胶种类繁多，分布广泛，涉及很多领域，与人类社会关系密切，而其浓度及粒径的变异范围也较大（表 1）。由于空气中缺少微生物直接可利用的养料，不能繁殖生长，因此空气中无固有的微生物群系，其均由暂时悬浮于空气中的尘埃携带着的微生物所构成，所以大气生物气溶胶主要来源于土壤、灰尘、江河湖海、动物、植物及人类本身。同时它也借助大气的各种运动进行输送，有些花粉、孢子、真菌、细菌芽孢和某些立克支氏体、病毒都可由大气输送很远的距离，大气微生物的含量是其输入和衰减动态平衡的结果。国际惯用的有关大气中微生物的含量公式是：

空气微生物的含量 = 微生物输入量 - 微生物输出量 - 微生物衰亡量

由于大气中微生物的输入量和总衰减受多种因素的影响，迄今为止，尚未有较好的数值模式能计算出大气微生物的准确浓度。仅仅对影响微生物气溶胶衰减的因素进行了一些研究。

## 3 生物气溶胶的采检鉴技术的发展

自 1676 年荷兰人列文·虎克发明了显微镜，

揭开了微生物学的新天地，近 2 个世纪后，法国科学家巴斯德第一次从空气中采到并培养出了微生物，从此开辟了空气微生物采样的新领域。早期的空气微生物检验也非常简单。到 20 世纪 40 年代后，由于生物化学的创立，核酸、蛋白质结构的研究成果以及划时代意义的电子显微镜的成功发明，使得空气微生物的检验，也从形态、生理生化，进入了亚分子结构和分子生物学的高级检验鉴定阶段。到了 70 年代，社会进入了信息时代，科技迅速发展，空气微生物的采检也飞速发展，成功地研制出了快速、自动的高、精、尖大型检测仪器，将空气微生物的采检水平推向了高峰。

### 3.1 大气生物气溶胶的采样器

最早的空气微生物采样只是用液体培养基，方法原始：即将一定体积的液体放走，采集相同体积的空气标本，对其微生物进行培养并通过简单的显微镜进行观察，但无法进行分离鉴定。自 1881 年柯赫发明了固体培养基后，采样技术就由液体法过渡到固体法，即自然沉降法。早期的固体法仅用平皿暴露法，尔后，由俄国的奥梅梁斯基通过大量的实验，建立了一个由大气微生物气溶胶沉降量计算大气微生物气溶胶含量的关系式。后人在此基础上，用实验的方法建立了不同环境条件下，大气微生物气溶胶含量与沉降量之间的关系或校正值。因此，自然沉降法作为测定大气微生物气溶胶沉降量的一种经典而又非常经济、简便的方法，100 多年来，一直被广泛的应用着。

由于欧洲产业革命的发展，推动了机器制造业，尤其是第二次世界大战后，各种固体采样器层出不穷。按照不同的采样原理，到目前为止，常用的生物气溶胶采样器划分为 6 类：1) 撞击式采样器，其中包括固体式、液体式和气液混合式；

表 1 大气中各种生物气溶胶粒子的大小和作用

Table 1 The size and function of different atmospheric bioaerosol particles

种类 Kind	粒径 Particle radius/μm	作用 Function
病毒 Virus	0.015~0.45	传染病 Infection
细菌 Bacterium	0.3~15	传染病 Infection
真菌孢子 Fungi spore	1~100	过敏性疾病 Irritability disease
苔藓孢子 Moss spore	6~30	植物病 Plant disease
蕨类孢子 Fern spore	20~60	植物病 Plant disease
花粉 Pollen	10~100	过敏性疾病 Irritability disease
植物和昆虫碎片 Plant and insect fragment	5~100, >100	过敏性疾病 Irritability disease

2) 沉降式采样器, 其中包括自然沉降式和热力沉降式; 3) 过滤式采样器, 其中包括可溶性滤膜采样和不可溶性滤膜采样; 4) 静电吸附采样器, 其中包括 LVB/水采样式和 M-3 型; 5) 气旋式采样器, 其中包括流量为  $75 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  小型的 Errington 式和流量为  $350 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  大型的 Powell 式; 6) 离心撞击式采样器, 其中包括 Reuter 离心式 RCS 和 LWC 型。

生物气溶胶采样器最基本的要求是保证采到的微生物的活性, 并能尽快地使之生长, 免受外界不利因素的损伤。自然沉降法及气旋式和离心式采样器多适合大粒子的采样, RCS 离心式采集的粒谱更广。滤膜采样器, 虽收集效率高, 但阻力太大。静电沉降采样器可把  $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$  粒子都采下来, 但因有电会释放臭氧, 易使微生物受损。大流量固体撞击式采样器容易使固体吹干, 导致粒子失活, 但其可采集到小流量采样器所采不到的大气中含量稀少的微生物。因此, 不同类型的采样器各有利弊, 采样时应根据不同的特点和目的, 考虑采样器的灵敏性、效率、可重复性、使用的方便性, 即是否有利于微生物的存活和便于分析, 是否便于区分粒子大小等各个方面的因素, 选择合适的采样器。

### 3.2 生物气溶胶的检验及鉴定技术

近 10 年来, 随着各项新技术和分子生物学的应用, 极大地促进了微生物分类鉴定工作的飞速发展, 已从表型特征上升到遗传特征的鉴定、细胞化学组分的分析和数值分类研究等新的更高的层次。这些发展也极大地带动了空气中微生物气溶胶的鉴定工作, 使其已从经典的常规分类提升到分子、亚分子的水平上。目前, 在生物气溶胶的分类鉴定中主要的方法有: 1) 电子显微镜法。2) 微生物遗传型的鉴定法, 其中包括 6 种以微生物的遗传物质 DNA 为主要研究对象测定其若干重要数据的实验方法。3) 细胞化学成分鉴定法。4) 气相色谱法。5) 数值分类法。当前, 快速自动化已成为大气生物气溶胶采样、分类、鉴定的理想途径, 其中以美国航空航天局 (NASA) 研制的 Wolf 自动微生物检测器和红外生物气溶胶检测仪为代表, 已经被不断地推出并应用到实际观测研究中, 但是由于这些仪器设备昂贵, 尚未被广泛应用。

## 4 生物气溶胶的研究现状

自 20 世纪 80 年代以来, 国外已经开始重视空气微生物的污染问题<sup>[4,5]</sup>, 主要集中于: 1) 空气细菌、病毒、真菌、花粉和噬菌体的检测及来源的调查和治理。大量的研究资料表明, 微生物空气污染可使肝炎、痢疾、流感和一些过敏性疾病发生率增加。2) 空气污染导致传染病的发生。3) 工程菌的污染与气溶胶试验, 目前很难估计有多少工程菌污染了环境, 更难预料的是这些污染的工程菌对人类及其环境起到什么作用。4) 花粉空气污染仍然受到重视, 由于花粉是人体呼吸道过敏性疾病的主要致敏源, 其检测和预报工作在外国一直没有间断过<sup>[6,7]</sup>。80 年代末科学家们正式提出生物气溶胶 (bioaerosol) 的定义, 在 1989 年美国工业卫生年会上, 首次将生物气溶胶定义为: 由具有生命活性的有机体所释放到空气中, 大小范围在  $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$  之间的大分子和易变异的混合物。自 90 年代开始了有关生物气溶胶的研究<sup>[8]</sup>, 首先是生物气溶胶的有效采集问题<sup>[9]</sup>, 到目前为止, 研究人员能够捕获的具有活性可培养鉴别的生物气溶胶种类, 仅是大气中所存在的一小部分, 因此国外很多有关生物气溶胶的研究都致力于快速、有效的空气微生物捕获仪器的开发和仪器间有效性比对研究, 以及微生物测试分析方法的探索和生物气溶胶发生仪器的研制<sup>[10~12]</sup>。其中某些特定致病菌的生物气溶胶的采集与培养<sup>[13,14]</sup>也成为研究热点, 目前正尝试利用 ATFMS (Aerosol particle time-of-flight mass spectrometer) 进行生物气溶胶的在线分析。正是由于近年在生物气溶胶工程技术方面所取得的巨大进步, 使得科学家在 2003 年 SARS 病毒肆虐全球期间, 采用先进的生物气溶胶采样分析仪器, 针对空气中 SARS 病毒的捕获及其性状迅速开展研究工作, 从而控制了疫情蔓延。尽管对于 SARS 病毒的许多问题有待解决, 但研究发现, 利用 RT-PCR 技术可检测环境大气中的 SARS 病毒, 此结果对于今后由于意外事件或恐怖主义等所引起的生物环境空气中有害微生物的快速有效的检测具有积极的意义<sup>[15]</sup>。生物气溶胶的健康效应其毒理和致病性的研究, 则一直是流行病学、

传染病学及整个医学界的研究焦点之一。以上的研究内容直接关系到人类身体健康和生活环境质量, 所研究的环境主要局限于医院、电子、制药、食品、化妆、发酵等相对特殊的工厂和公共场所, 以有利于控制这些特殊环境的潜在有害微生物的空气传播和感染; 而对环境大气中生物气溶胶的环境和气候效应的研究, 尽管国外科学家们已经开始关注<sup>[16,17]</sup>, 发现生物气溶胶与其他污染物的浓度和类型具有较强的相关性<sup>[18]</sup>, 但太阳辐射对微生物气溶胶具有较强的灭杀、降解作用, 明显的降低其在大气环境中的浓度<sup>[19]</sup>。但还有待于做进一步的深入研究。

中国有关大气生物气溶胶的起步研究始于 20 世纪 80 年代, 车凤翔<sup>[20]</sup>首次提出空气微生物的污染对人体健康的影响问题, 并在北京和天津两地进行了大气微生物的初次检测<sup>[21]</sup>, 进入 90 年代后在我国不少大城市都开展了大气微生物的调查研究工作<sup>[22~35]</sup>, 研究结果表明: 在我国不同城市中, 不同的功能区域, 由于各种环境的影响, 大气中微生物的种类和浓度也各不相同。细菌的粒径多大于  $2.0 \mu\text{m}$ , 而且粒度多成偏正态分布<sup>[22,28]</sup>。真菌孢子的大小与人类的身体健康具有密切的关系, 不同粒径的真菌孢子影响人体健康的作用原理也各不相同。真菌孢子的粒径中值大于  $3.4 \mu\text{m}$ <sup>[36]</sup>, 细菌粒子与真菌粒子在城市大气中成正相关关系<sup>[37]</sup>。在经济发达、人口流动较大的城市(如北京、上海、广州等), 空气微生物的种类较多, 容易传播和发生各种疾病, 2003 年 SARS 疫情的传播也正是由这些大城市向四周呈辐射状扩散和蔓延。此间, 也进行了一些环境因素对于空气微生物影响方面的研究<sup>[38~40]</sup>, 研究结果显示: 风速和风向都会影响空气微生物的浓度, 而降雨和降雪则对空气微生物具有冲刷和净化作用, 能够明显降低空气中细菌粒子浓度。以上的研究大多以空气微生物与人体健康的关系为出发点, 而鲜有明确的针对大气生物气溶胶的环境和生态效应以及气候效应进行研究<sup>[41,42]</sup>。2002 年于玺华<sup>[43]</sup>主编的《现代空气微生物学》的出版, 成为我国空气微生物学有关健康效应的第一本专著, 标志着我国该领域的理论研究工作趋于系统化。但在实际研究过程中大部分的研究工作是单一的研究空气微生物的种类、数量及浓度的时间和空

间变化及其影响因子, 由于采样设备相对落后, 鉴定方法简单(仅是表型鉴定), 使得多数研究仅能鉴定到属, 目前已测知的空气微生物仅是大气中实际存在的少部分。

## 5 展望

生物气溶胶作为一门新兴的交叉学科, 涉及多种学科, 与各个领域都有密切关系。为进一步了解空气微生物的种群组成和群落结构, 研究人员首先应该开发高效、快速的采检技术, 将现代分子生物学技术与传统的微生物学技术相结合进行深入的研究。当前, 国际上整个生物气溶胶的研究更多的侧重于其毒理性、致病性对人类健康的影响, 即生物气溶胶的健康效应, 而相对缺乏从空气污染和环境评价及生态环境角度来研究大气生物气溶胶的健康效应, 大气生物气溶胶的气候效应更是鲜有问津。

我们对于生物气溶胶的物理和化学特性, 尤其是其在大气中各个演变阶段的化学变化过程以及反馈机制都是十分有限的。存在着许多的科学问题, 诸如:

(1) 大气及其周围界面上, 生物气溶胶对于大气无机/有机污染物转化的贡献有多大? 对于空气质量的贡献如何?

(2) 生物气溶胶的化学异质性对于其形成云凝结核(CCN)或冰核(IN)的能力的影响是什么? 对于气候的影响有多大?

(3) 作为气溶胶, 微生物的降解过程是暂时的还是必定发生的?

(4) 哪些环境因素(如温度、pH 值、湿度、辐射等)是与发生微生物降解的化学驱动直接相关的?

(5) 大气化学过程中, 空气—雪—雨水的相互界面上发生的微生物活动属于哪种类型的化学反应机制?

(6) 利用模式研究定量估算生物气溶胶对于大气物理和化学过程的贡献的大小以及对于空气质量的影响程度。

当前, 生物气溶胶的研究已进入到一个全新的阶段。从室内环境向室外环境、区域环境、全球环境发展; 由原来的健康效应向环境效应、气

候效应扩展；将其在大气中的衰减过程与大气化学和物理学过程密切结合，使研究内容更为综合和广泛。研究方法和手段不断地改善和提高，随着科学技术的发达，生物气溶胶的在线分析技术的日臻完善，生物气溶胶的研究将会进入更高的层面，其应用价值将不再局限于人类的健康保障上，为今后的该领域的科学研究提供了更多的挑战和机遇。

### 参考文献 (References)

- [1] Crutzen P J. Atmospheric aerosols: To the forefront of research in atmospheric chemistry. *IGBP, Global Change News Letter*, 1998, **33**: 9pp
- [2] Andreae M O, Crutzen P J. Atmospheric aerosol: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, 1997, **276**: 1052pp
- [3] Burge H A. *Bioaerosols*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 7pp
- [4] Harrison R M. Sources and processes affecting concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particulate matter in Birmingham (UK). *Atmos. Environ.*, 1997, **31** (24): 4103~4110
- [5] Flannigan B. Air sampling for Fungi in indoor environments. *J. Aerosol Sci.*, 1997, **28** (3): 381~387
- [6] Luczyosks C M. Sampling and assay of indoor allergens. *J. Aerosol Sci.*, 1997, **28** (3): 397~399
- [7] Baxter L J, John T C. Natural atmospheric microbial conditions in a typical suburban area. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1983, **45**: 919~934
- [8] Macher J M. Biological aerosol. 12th annual meeting of American association for aerosol research, tutorial session 10, Oak Brook, Illinois, USA. 1993, 64~75
- [9] Nevalainen A, Pastuszka J, Liebhaber F, et al. Performance of bioaerol samplers: Collection characteristics and sampler design considerations. *Atmos. Environ.*, 1992, **26A** (4): 531~540
- [10] Kenny L C, Stancliffe J D, Crook B, et al. Development and evaluation of a personal bioaerosol sampler. *J. Aerosol Sci.*, 1998, **29**: 497~498
- [11] Agranovski I E, Agranovski V, Reponen T, et al. Development and evaluation of a new personal sampler for culturable airborne microorganisms. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**: 889~898
- [12] Bell E C, Hale T L, Shaw M J, et al. Evaluation of a novel bioaerosol generation device for the use in studies requiring airborne microorganism agglomerates. *J. Aerosol Sci.*, 2000, **31**: S80~S81
- [13] Holwill L, Clark J M, Swanton J E, et al. Characterisation of bioaerosols: The effect of environmental condition and pollutants. *J. Aerosol Sci.*, 1998, **29**: S607~S608
- [14] Agranovski V, Ristovski Z, Hargreaves M, et al. Real-time measurement of bacterial aerosols with the UVAPS: Performance evaluation. *J. Aerosol Sci.*, 2003, **34**: 301~317
- [15] Agranovski I E, Safatov A S, Pyankov O V, et al. Monitoring of viable airborne SARS virus in ambient air. *Atmos. Environ.*, 2004, **38**: 3879~3884
- [16] Kenny C M, Jennings S G. Background bioaerosol measurements at mace head. *J. Aerosol Sci.*, 1998, **29**: 779~780
- [17] Peccia J L, Werth H M, Hernandez M T. Effects of relative humidity on the UV-induced inactivation of bacterial bioaerosol. *J. Aerosol Sci.*, 2000, **31**: 959~960
- [18] Lee R, Harris K, Akland G. Simulation between viable bacterial and air pollutants in an urban. *American Industry Hygiene Association Journal*, 1987, **56**: 165~170
- [19] Munakata N. Biological effective dose of solar ultraviolet radiation estimated by spore dosimetry in Tokyo. *Photochemical Photobiology*, 1993, **58** (3): 386~392
- [20] 车凤翔. 大气微生物群及其空气污染. 国外军事资料分册, 1983, **4**: 133~141  
Che Fengxiang. Atmosphere microbial communities and their air pollution. *Fascicule of Oversea Military Information* (in Chinese), 1983, **4**: 133~141
- [21] 车凤翔, 胡庆轩, 张松乐, 等. 京津地区大气微生物时空分布. 中国公共卫生学报, 1988, **8** (3): 151pp  
Che Fengxiang, Hu Qingxuan, Zhang Songle, et al. Time-Space distribution of airborne microbe in Beijing and Tianjin area. *Journal of China Public Health* (in Chinese), 1988, **8** (3): 151pp
- [22] 胡庆轩, 陈振生, 徐桂清, 等. 北京地区大气微生物粒子谱研究. 中国环境检测, 1991, **7** (1): 9~11  
Hu Qingxuan, Che Fengxiang, Xu Guiqing, et al. Study on particle chart of airborne microbe in Beijing area. *Environmental Monitoring in China* (in Chinese), 1991, **7** (1): 9~11
- [23] 车凤翔, 徐桂清, 史传英, 等. 京津地区大气细菌生态分布. 中国环境科学, 1990, **10** (3): 192~196  
Che Fengxiang, Xu Guiqing, Shi Chuanying, et al. Ecological distribution of airborne bacteria over Beijing-Tianjin area. *China Environmental Science* (in Chinese), 1990, **10** (3): 192~196
- [24] 宋凌浩, 宋伟民, 施玮. 上海市大气细菌污染研究. 上海环境科学, 1999, **18** (6): 258~260  
Song Linghao, Song Weimin, Shi Wei. Study on airborne bacteria pollution in Shanghai. *Shanghai Environmental*

- Science (in Chinese), 1999, **18** (6): 258~260
- [25] 胡庆轩, 徐秀芝, 陈梅玲, 等. 沈阳市大气微生物的研究 III. 大气真菌粒子浓度及其分布. 微生物学通报, 1994, **20** (1): 10~14  
Hu Qingxuan, Xu Xiuzhi, Chen Meiling, et al. Study on atmospheric microbes in shengyany III. The concentration and distribution of airborne fungi particles. *Microbiology* (in Chinese), 1994, **20** (1): 10~14
- [26] 侯红, 陈炫, 张彩云. 太原市大气细菌动态变化规律. 太原科技, 1998, **3**: 8~11  
Hou Hong, Chen Xuan, Zhang Caiyun. Dynamic change regular of airborne bacteria in Taiyuan. *Taiyuan Science Technology* (in Chinese), 1998, **3**: 8~11
- [27] 孙荣高. 兰州大气微生物的监测与评价. 干旱环境监测, 1996, **10** (1): 42~44  
Sun Ronggao. Monitoring and assessment of airborne microbes in Lanzhou. *Arid Environmental Monitoring* (in Chinese), 1996, **10** (1): 42~44
- [28] 李能树. 合肥市大气微生物的粒度分布. 生物学杂志, 1997, **14** (5): 35~37  
Li Nengshu. Granularity distribution of airborne microbes in Hefei. *Journal of Biology* (in Chinese), 1997, **14** (5): 35~37
- [29] 王文义. 重庆大气微生物污染状况调查与评价. 四川环境, 1997, **16** (2): 38~42  
Wang Wenyi. Investigation and assessment on the condition of airborne microbe pollution in Chongqing. *Sichuan Environment* (in Chinese), 1997, **16** (2): 38~42
- [30] 吕爱华, 王庆艳, 苏君, 等. 乌鲁木齐市大气微生物浓度变化规律. 中国环境监测, 1996, **12** (3): 50~53  
Lu Aihua, Wang Qingyan, Su Jun, et al. The variation of airborne microbes concentration in Wulumuqi. *Environmental Monitoring in China* (in Chinese), 1996, **12** (3): 50~53
- [31] 陈梅玲, 胡庆轩, 徐秀芝, 等. 南京市大气微生物污染调查. 中国公共卫生, 2000, **16** (6): 504~505  
Chen Meiling, Hu Qingxuan, Xu Xiuzhi, et al. Investigations of airborne microbe pollution in Nanjing. *China Public Health* (in Chinese), 2000, **16** (6): 504~505
- [32] 符春兰, 何文华, 贾建华, 等. 我国四城市真菌特别调查. 微生物学通报, 2000, **27** (4): 264~269  
Fu Chunlan, He Wenhua, Jia Jianhua, et al. Special investigation of fungi from four cities of China. *Microbiology* (in Chinese), 2000, **27** (4): 264~269
- [33] 李素芝, 何代平, 王洪斌, 等. 拉萨市空气细菌学调查. 环境与健康杂志, 2001, **18** (4): 197pp  
Li Suzhi, He Daiping, Wang Hongbin, et al. Investigations of airborne bacteria in Lasa. *Journal of Environment and Health* (in Chinese), 2001, **18** (4): 197pp
- [34] 李劲松, 孙润桥, 鹿建春, 等. 北京市大气花粉时空分布的研究. 中国公共卫生, 2000, **16** (12): 1089~1091  
Li Jinsong, Sun Runqiao, Lu Jianchun, et al. Study on time-space distribution of atmosphere pollen in Beijing. *China Public Health* (in Chinese), 2000, **16** (12): 1089~1091
- [35] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气微生物粒度分布特征. 环境科学, 2004, **25** (6): 1~5  
Fang Zhiguo, OuYang zhiyun, Hu Lifeng, et al. Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing. *Environmental Science* (in Chinese), 2004, **25** (6): 1~5
- [36] 胡庆轩, 徐秀芝, 董咏仪, 等. 沈阳市大气微生物的研究 IV 大气真菌粒数中值直径及粒度分布. 微生物学通报, 1994, **21** (6): 353~356  
Hu Qingxuan, Xu Xiuzhi, Dong Yongyi, et al. Study on atmospheric microbes in Shenyang IV. size distribution and count median diameter (CMD) of airborne fungous particles. *Microbiology* (in Chinese), 1994, **21** (6): 353~356
- [37] 胡庆轩, 蔡增林, 鲁志新, 等. 沈阳市大气细菌与真菌粒子的关系. 上海环境科学, 1995, **14** (5): 29~32  
Hu Qingxuan, Cai Zenglin, Lu Zhixin, et al. Relation on airborne bacteria and fungi in Shenyang. *Shanghai Environmental Science* (in Chinese), 1995, **14** (5): 29~32
- [38] 胡庆轩, 鹿建春, 车凤翔. 降雪对大气细菌粒子的影响. 环境保护科学, 1992, **18** (4): 59~62  
Hu Qingxuan, Lu Jianchun, Che Fengxiang. Impact on airborne bacteria particles of snowfall. *Environmental Protection Sciences* (in Chinese), 1992, **18** (4): 59~62
- [39] 吕爱华, 苏君, 杨永红, 等. 大气微生物与气象条件及大气污染物的灰色关联分析. 干旱环境监测, 1995, **9** (3): 143~146  
Lu Aihua, Su Jun, Yang Yonghong, et al. Gray relevance analysis between airborne and weather condition, air contamination. *Arid Environmental Monitoring* (in Chinese), 1995, **9** (3): 143~146
- [40] 胡庆轩, 车凤翔, 陈振生, 等. 大风对大气细菌粒子浓度和粒度分布的影响. 中国环境监测, 1991, **7** (6): 5~8  
Hu Qingxuan, Che Fengxiang, Chen Zhensheng, et al. Impact on airborne microbe particle concentration and chart distribution of large wind. *Environmental Monitoring in China* (in Chinese), 1991, **7** (6): 5~8
- [41] 陈铭夏, 金龙山, 孙振海, 等. 南京市生物气溶胶浓度垂直分布和日变化规律. 中国环境科学, 2001, **21** (2): 97~100  
Chen Mingxia, Jin Longshan, Sun Zhenhai, et al. The vertical distribution and diurnal variation law of the bioaerosol concentration in Nanjing City. *China Environmental Science* (in Chinese), 2001, **21** (2): 97~100
- [42] 陈铭夏, 金龙山, 孙振海, 等. 生物气溶胶浓度、通量及环境因素的影响. 自然科学进展, 2001, **11** (9): 939~

944

Chen Mingxia, Jin Longshan, Sun Zhenhai, et al. The concentration, flux of bioaerosol and the effect of environmental factors. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2001, **11** (9): 939~944

[43] 于玺华. 现代空气微生物学. 北京: 人民军医出版社, 2002

Yu Xihua. *Airborne Microbiology of Modern Time* (in Chinese). Beijing: People's Military Medical Publisher, 2002