

北京市夏季空气微生物群落结构和生态分布

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. 湖南农业大学生物安全与科技学院, 长沙 410128)

摘要:着重研究北京市夏季空气微生物的群落结构和生态分布特征。结果表明:北京市夏季空气中革兰氏阳性菌明显多于革兰氏阴性菌, 约占 70%~85%, 其中阳性球菌占总数的占 35%~45%。3 个功能区(文教区、交通干线和公园绿地)共发现 30 属空气细菌, 其中革兰氏阳性菌 20 属, 革兰氏阴性菌 10 属。优势细菌属为微球菌属(*Micrococcus*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)。3 个功能区共出现 10 属空气真菌, 优势菌属枝孢属(*Cladosporium*)、链格孢属(*Alternaria*)、无孢菌(*nonsporing*)、青霉属(*Penicillium*)和曲霉属(*Aspergillus*), 其中枝孢属是绝对优势菌属, 占总数的 48.2%。空气细菌浓度交通干线和文教区明显高于公园绿地, 而空气真菌浓度公园绿地和文教区明显高于交通干线。空气细菌浓度一日中 13:00 时较低, 09:00 时和 17:00 较高。

关键词:空气细菌; 空气真菌; 微球菌属; 芽孢杆菌属; 枝孢属

Community structure and ecological distribution of airborne microbes in summer in Beijing

FANG Zhi-Guo¹, OUYANG Zhi-Yun¹, HU Li-Feng^{1, 2}, WANG Xiao-Ke¹, LIN Xue-Qiang¹ (1. Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Bio-Safety Science and Technology, Hu'nan Agriculture University, Changsha 410128, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 83~88.

Abstract: Airborne microbes are living bodies which include airborne bacteria, fungi, actinomycetes, etc. They are fundamental biological components in an urban ecosystem and have a direct relationship with ecological balance and the function of many other life forms in nature. Initial research on airborne microbes can be traced back to the mid-19th Century, when Schwann found that the axenic materials were the cause of fermentation and contagion by airborne microbes. Now, due to the effects of human activities, the main focus has gradually changed from the investigation on animal and plant-life diseases to urban microbe contamination and the discrepancy of different microbe monitoring system. Admittedly, airborne microbes propagate and diffuse all around the environment, which does lead to human allergies and affect human health. Elevated levels of airborne microbe concentration have been proven to be associated with decreased lung function, increased adverse respiratory symptoms such as cough, shortness of breath, wheezing and asthma attacks, as well as chronic obstructive pulmonary disease, cardiovascular diseases, and lung cancer. Moreover, green space and fancy vegetation in urban locals could succumb to disease because of the pathogens in the atmosphere. In addition, metal materials of urban structures and precise instruments of scientific research could also be eroded by airborne microbes, which could lead to significant economic loss.

This study on the community structure and ecological distribution characteristic of airborne microbes was carried out in detail in Beijing. Results showed that Gram positive bacteria contributing 70%~85% were much more than Gram negative bacteria, the Gram positive cocci accounting for 35%~45% were the dominant bacteria. Amongst 30 genera of bacteria, including 20 Gram positive bacteria and 10 Gram negative bacteria, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Staphylococcus* and *Pseudomonas* were most predominant. In different functional regions, the most frequently isolated fungal genus were *Cladosporium*,

基金项目:中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KZCX3-SW-424)

收稿日期:2004-03-26; **修订日期:**2004-10-12

作者简介:方治国(1977~), 男, 安徽黄山人, 博士生, 从事生物多样性和微生物生态研究。

* 联系作者 Author for correspondence. E-mail: zyouyang@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: The Project of Knowledge Innovation of CAS (No. KZCX3-SW-424)

Received date: 2004-03-26; **Accepted date:** 2004-10-12

Biography: FANG Zhi-Guo, Ph. D. candidate, mainly engaged in biodiversity and microbial ecology.

Alternaria, non-sporulating mycelia, *Penicillium* and *Aspergillus* respectively. *Cladosporium*, which account for 48.22% of the total fungi concentration, was the most dominant genus. The concentration of airborne bacteria was significantly lower in Garden Greenbelt (GGB) than in Culture and Education Region (CER), and Main Traffic Line (MTL). Whereas the concentration of airborne fungi in GGB was higher than in CER and MTL. In different time in a day, the lower number of airborne bacteria was exhibited at 13 o'clock.

Key words: airborne bacteria; airborne fungi; *Micrococcus*; *Micrococcus luteus*; *Cladosporium*

文章编号:1000-0933(2005)01-0083-06 中图分类号:Q142,Q145,Q938.14 文献标识码:A

空气微生物是指空气细菌、真菌和放线菌等有生命的活体,是城市生态系统重要的生物组成部分。它与自然生态平衡及许多生命现象直接相关,在自然界的物质循环中起着非常重要的作用^[1~4]。空气微生物的研究可追溯到 19 世纪初期 Schwann 发现无菌材料在空气中被微生物发酵和腐化^[5],之后 Pasteur 和 Lindbergh 分别在不同的环境条件下对空气微生物进行了研究^[6,7],19 世纪 70 年代在地球表面 60 km 到 70 km 的高空也发现了细菌^[8]。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^[9]。近年来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^[10]。

空气中没有微生物生活必须的介质,不是微生物生存的理想环境,但是空气微生物能够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^[11]。空气中微生物浓度过高,能够增加人们的呼吸道感染,哮喘气喘、皮肤过敏、慢性肺部疾病和心血管疾病等的发病几率^[12]。同时空气中大量存在的植物病原真菌能导致城市绿化植物和观赏植物产生病害,而且空气微生物还能够腐蚀用于基础建设的金属材料及用于科研生产的精密仪器,造成重大的经济损失^[13]。北京是我国政治、文化交流中心,也是重要的旅游城市,虽然 20 世纪 90 年代初期胡庆轩、车凤翔等对北京的空气微生物进行了简单的调查^[14~16],但是没有对空气中微生物的群落特征进行全面详尽的研究,因此了解北京市空气微生物的群落结构和生态分布十分迫切,这对北京城市生态系统结构和功能的维持,城市污染和流行性疾病的控制,环境质量的改善具有重要的理论和现实意义。

1 研究材料和方法

1.1 研究时间和地点

在北京选取 3 个不同的功能区——文教区(Culture and Education Region,CER)、交通干线(Main Traffic Line,MTL)和公园绿地(Garden Greenbelt,GGB),于 2003-06~2003-08 取样,3 个地点分别选取在中国科学院生态环境研究中心、西直门立交桥和植物园。中国科学院生态环境研究中心是研究机构,院内有实验楼、办公楼与道路,绿地面积约占 50%,人员走动较多,车辆来往较少;西直门立交桥是北京市交通枢纽,车辆来往很多,各条道路平均每分钟共通过的车辆约 150 余辆,高峰期平均每分钟行人约 15 余次。绿地面积很少,地面灰尘较多,容易飘在近地面的空气中造成空气污染;植物园内有大量的树木和花草,绿地面积约占 95%以上,平时几乎没有车辆和行人通过,是环境非常洁净的地方。在这 3 个地点同时进行取样,每月连续取样 3d,每天分别在 9:00,13:00 和 17:00 取样 3 次,每次 3 个重复。采样高度为人呼吸带,距离地面 1.5m 处。

1.2 空气微生物取样器

采用国产的 Andersen 生物粒子取样器(FA-I)进行测定。它是模拟人呼吸道的解剖结构和空气动力学生理特征,采用惯性撞击原理设计制造的。该取样器分为 6 级,每级 400 个孔,从 I~VI 级孔的直径逐渐缩小,空气流量为 28.3L/min,每一级的空气流速逐次增大,从而把空气中的带菌粒子按大小不同分别捕获在各级的培养皿上,空气细菌和真菌的采样时间为 3min,空气放线菌的采样时间为 5min。采样器各级的特性由表 1 给出。

1.3 采样方法和培养方法

采样平皿用 9cm 的玻璃平皿,灭菌后在无菌的条件下加入 20ml 的培养基,采样器各层的孔眼至采样面的距离(即撞击距离)为 2 mm。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,采集的样品在 37℃培养箱内培养 48h;真菌采样用沙氏培养基,采集的样品在 25℃培养箱内培养 72h;放线菌采用高氏一号培养基,每 300ml 培养基中外加 1ml 3%的重铬酸钾溶液,采集的样品在

表 1 FA-I 取样器各级特征

Table 1 Characteristics of FA-I sampler				
级数 Series	孔径(mm) Aperture	空气流速(m/s) Velocity of air flow	捕集范围(μm) Range of trapping	ECD*
F1	1.18	1.08	>8.2	8.2
F2	0.91	1.79	5.0~10.4	6.0
F3	0.71	2.97	3.0~6.0	3.0
F4	0.53	5.28	2.0~3.5	2.0
F5	0.34	12.77	1.0~2.0	1.0
F6	0.25	23.29	<1.0	0.65

* ECD 表示有效截留粒子径 ECD represents Effective Cut Diameter

25℃培养 120h,分别在各级采样皿上进行菌落记数。根据各级空气微生物的粒子数量,利用公式进行校正,然后计算空气微生物的浓度。具体校正公式(1)和计算公式(2)如下:

$$Pr = N \left(\frac{1}{N} + \frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \cdots + \frac{1}{N-r+1} \right)$$

(1)

$$C(CFU(m^3)) = \frac{T \times 1000}{t(min) \times F(L(min))}$$

(2)

式中, Pr 为校正后的菌落数; N 为采样器各级采样孔数; r 为实际的菌落数; C 为空气真菌浓度; T 为 6 级总菌落数; t 为采样时间; F 为空气流量。

1.4 微生物鉴定方法

细菌挑取单菌落,分离和纯化后,进行革兰氏染色,先用显微镜鉴定细菌的类型,再用 BIOLOG 微生物鉴定系统进行细菌鉴定。真菌的鉴定用传统的鉴定方法,用显微镜观察真菌的孢子形态,根据孢子的形态结构把空气真菌鉴定到属。

1.5 统计分析

本研究数据分析和图表绘制用 SPSS Version 10.0 和 Microsoft Excel 2000 进行。

2 结果与讨论

2.1 空气微生物群落变化特征

2.1.1 空气细菌的群落结构和物种组成 不同功能区空气细菌群落结构和物种组成不同(表 1)。空气中革兰氏阳性菌明显多于革兰氏阴性菌,约占 70%~85%,其中阳性球菌约占总数的 35%~45%;革兰氏阴性菌约占 15%~30%。

在 3 个功能区空气中共发现 30 属细菌,其中革兰氏阳性菌 20 属,革兰氏阴性菌 10 属。其中优势细菌属为微球菌属(*Micrococcus*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)。文教区共出现 25 属细菌,阳性菌 19 属,阴性菌 6 属,其中微球菌属占 15.7%,芽孢杆菌属占 12.4%,葡萄球菌属占 11.2%。交通干线共出现 22 属细菌,阳性菌 17 属,阴性菌 5 属,其中微球菌属占 18.1%,芽孢杆菌属占 9.6%,葡萄球菌属占 12.0%,假单胞菌属占 6.0%。公园绿地共出现 23 属细菌,阳性菌 15 属,阴性菌 8 属,其中微球菌属占 17.1%,芽孢杆菌属占 13.2%,葡萄球菌属占 14.5%,假单胞菌属占 6.6%。

方治国等综述表明,在国内调查的城市中,共出现 20 属空气细菌,其中优势菌属为芽孢杆菌属、葡萄球菌属、微球菌属和微杆菌属^[17]。Shaffer 等在调查城市、乡村、森林和海岸四个生态系统空气细菌时发现,革兰氏阳性菌以芽孢杆菌属最多,除海岸外,约占总数的 40%,革兰氏阴性菌优势菌属为假单胞菌属和黄单胞菌属^[18]。瑞典城市中共出现 18 属空气细菌,其中芽孢杆菌较多^[19]。在波兰西里西亚室内环境中微球菌属出现的频率为 100%,占总细菌的 36%;葡萄球菌属出现的频率为 76%,占 14%^[20]。在西班牙北部的猪场,革兰氏阳性菌中葡萄球菌属和芽孢杆菌属是优势细菌属,革兰氏阴性菌中以产碱杆菌属和不动杆菌属较多^[21]。在阿拉伯联合酋长国室内优势细菌属依次为芽孢杆菌属、葡萄球菌属、链霉菌属和微球菌属^[22]。从以上研究结果可以看出,不同地点空气细菌的优势菌属基本相同,芽孢杆菌属、微球菌属、葡萄球菌属和假单胞菌属为空气细菌优势属。

表 2 不同功能区空气细菌物种组成
Table 2 Species composition of airborne bacteria in different regions

物种 Group	功能区 Functional regions		
	CER(%)	MTL(%)	GGB(%)
革兰氏阳性菌 Gram-positive bacteria	82.2	79.6	71.2
微球菌属 <i>Micrococcus</i>	15.7	18.1	17.1
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	12.4	9.6	13.2
葡萄球菌属 <i>Staphylococcus</i>	11.2	12.0	14.5
放线菌属 <i>Actinomyces</i>	3.4	0.0	0.0
气球菌属 <i>Aerococcus</i>	1.1	2.4	1.3
节杆菌属 <i>Arthrobacter</i>	2.3	1.2	1.3
短杆菌属 <i>Brevibacterium</i>	3.4	2.4	1.3
肉杆菌属 <i>Carnobacterium</i>	1.1	0.0	0.0
纤维单胞菌属 <i>Cellulomonas</i>	1.1	1.2	1.3
棒杆菌属 <i>Corynebacterium</i>	3.4	2.4	1.3
短小杆菌属 <i>Curtobacterium</i>	2.3	3.6	2.6
异常球菌属 <i>Deinococcus</i>	3.4	2.4	1.3
孪生球菌属 <i>Gemella</i>	1.1	1.2	1.3
戈登氏菌属 <i>Gordonia</i>	1.1	3.6	0.0
大单胞菌属 <i>Macrococcus</i>	3.4	1.2	1.3
微杆菌属 <i>Microbacterium</i>	2.3	4.8	2.6
拉氏杆菌属 <i>Rathaybacter</i>	1.1	0.0	0.0
链球菌属 <i>Streptococcus</i>	2.3	2.4	1.3
漫游球菌属 <i>Vagococcus</i>	3.4	1.2	1.3
红球菌属 <i>Rhodococcus</i>	0.0	2.4	0.0
未鉴定 No-identification	6.7	7.2	7.9
革兰氏阴性菌 Gram-negative bacteria	17.8	20.4	28.8
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	0.0	6.0	6.6
气单胞菌属 <i>Aeromonas</i>	3.4	2.4	0.0
伯克霍尔德氏菌属 <i>Burkholderia</i>	2.3	1.2	2.6
泛菌属 <i>Pantoea</i>	1.1	2.4	2.6
巴斯德氏菌属 <i>Pasteurella</i>	2.3	0.0	3.9
弧菌属 <i>Vibro</i>	1.1	2.4	1.3
短波单胞菌属 <i>Brevundimonas</i>	1.1	0.0	0.0
不动杆菌属 <i>Acinetobacter</i>	0.0	0.0	3.9
拉恩氏菌属 <i>Rahnella</i>	0.0	0.0	1.3
叶杆菌属 <i>Phyllobacterium</i>	0.0	0.0	1.3
未鉴定 No-identification	6.7	6.0	5.3

2.1.2 空气真菌的群落结构和物种组成 除无孢菌外,3 个功能区共出现 10 属空气真菌,其中优势菌属依次为枝孢属(*Cladosporium*)、链格孢属(*Alternaria*)、无孢菌(*Nonsporing*)、青霉属(*Penicillium*)和曲霉属(*Aspergillus*)(表 2)。在所有的优势菌属中,枝孢属占有绝对的优势,占总数的 47.2%。文教区枝孢属、青霉属、链格孢属和无孢菌出现的频率均为 100%,其浓度百分比分别为 53.5%,6.4%,16.2%和 14.2%;交通干线枝孢属、链格孢属和无孢菌出现的频率均为 100%,浓度百分比分别为 36.7%,24.3%和 16.9%;公园绿地枝孢属、青霉属、链格孢属和无孢菌出现的频率均为 100%,其浓度百分比分别为 53.1%,3.8%,8.8%和 31.7%。

公园绿地无孢菌占 31.7%,明显多于文教区和交通干线($P<0.01$)。枝孢属交通干线最少占 36.7%,青霉属和链格孢属交通干线最多分别占 7.2%和 24.3%。文教区没有出现木霉属(*Trichoderma*),交通干线没有出现根霉属(*Rhizopus*),公园绿地两者都没有出现。这与国外一些学者不同环境条件下空气真菌的研究结果一致^[23, 24],空气中出现的空气真菌有 10~20 属,不同地点绝对优势菌属都为枝孢属,占总数的 40%~80%,此后依次为青霉属、链格孢属和曲霉属。而国内一些研究结果表明,城市中空气真菌的优势属为链格孢属、青霉属、曲霉属和木霉属,枝孢属真菌很少^[17],这可能与采样地点以及采样环境不同有关。

表 3 不同功能区空气真菌群落结构

Table 3 Community structure of airborne fungi in different functional regions

种类 Community	CER(n=19)		MTL(n=18)		GGB(n=12)	
	出现频率(%) Frequency	浓度(%) Concentration	出现频率(%) Frequency	浓度(%) Concentration	出现频率(%) Frequency	浓度(%) Concentration
枝孢属 <i>Cladosporium</i>	100	53.5	100	36.7	100	53.1
青霉属 <i>Penicillium</i>	100	6.4	88.9	7.2	100	3.8
链格孢属 <i>Alternaria</i>	100	16.2	100	24.3	100	8.8
曲霉属 <i>Aspergillus</i>	63.2	2.8	66.7	6.1	83.3	1.5
拟青霉属 <i>Paecilomyces</i>	23.5	0.3	44.4	1.7	8.3	0.03
根霉属 <i>Rhizopus</i>	11.8	0.06	0	0	0	0
毛霉属 <i>Mucor</i>	29.4	0.4	38.9	1.0	33.3	0.3
木霉属 <i>Trichoderma</i>	0	0	16.7	0.2	0	0
脉孢菌属 <i>Neurospora</i>	17.7	0.2	22.2	0.4	75.0	0.4
酵母 <i>Yeasts</i>	11.8	0.08	5.6	0.3	66.7	0.3
无孢菌 <i>Nonsporing</i>	100	14.2	100	16.9	100	31.7
未鉴定 <i>No-identification</i>	94.1	6.5	66.8	5.1	33.3	0.2

2.2 空气微生物的浓度变化特征

2.2.1 不同功能区空气微生物浓度分布 由于受到环境条件、气象因素、工农业生产、人类活动等外界因素的影响,北京市 3 个功能区空气微生物浓度不相同(图 1)。空气微生物总浓度文教区明显高于公园绿地和交通干线($P<0.05$),空气细菌浓度公园绿地明显低于文教区和交通干线($P<0.05$),空气真菌浓度交通干线明显低于文教区和公园绿地($P<0.05$)。在空气微生物总浓度中,空气细菌、真菌所占的比例较大($P<0.01$),而空气放线菌只占很少的一部分,不会影响功能区的总浓度分布特征。文教区和公园绿地空气细菌和真菌占的比例相当,交通干线空气细菌占的比例较大。

空气细菌浓度文教区和交通干线明显高于公园绿地。这可能是由于植物园植被覆盖较多,绿地面积占 95%以上,而夏季正是植被茂盛生长的季节,植物挥发性分泌物对空气细菌有灭杀作用,不同种类植物因种间差异其杀菌效果达极显著水平,而且不同植物的杀菌效果在 7、8 月份达到最大值^[25],所以能够减少空气中细菌的浓度;西直门立交桥由于绿地面积很少,而且汽车和人员流量很大,可以随时带起地面的灰尘,增加空气中细菌的含量;中国科学院生态环境研究中心由于上下班人员走动比植物园多,而绿地面积占 50%左右,所以其空气中细菌浓度也高于植物园。空气真菌浓度文教区和公园绿地明显高于交通干线。这可能由于植物园有很多不同类型的植物,而动植物是空气真菌的主要来源,并且在夏季植物园内的植被能够降低空气温度和保持空气湿度,整个环境适合真菌孢子的萌芽、生长和繁殖,因此增加了植被覆盖较多地方空气真菌的含量;西直门立交桥是北京市的交通枢纽,空气污染比较严重,一些不利于空气真菌

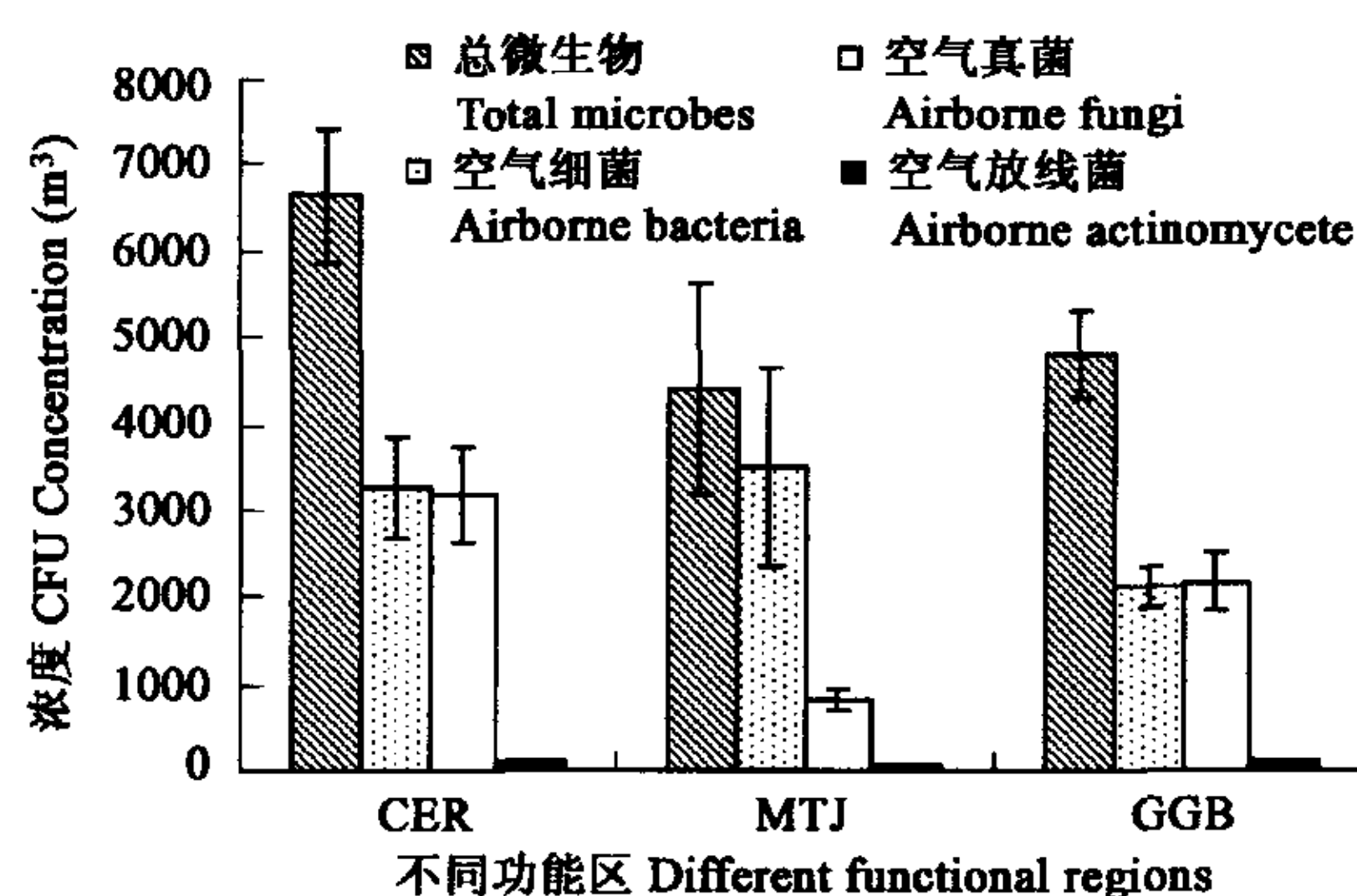


图 1 不同功能区空气微生物浓度分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of airborne microbe concentration in different function regions

生长的污染因子(NO 、 SO_2 等)含量较高,而且夏季近地面空气温度较高,湿度较低,不利于空气真菌的生长和繁殖^[3],所以其空气真菌浓度较低。文教区空气微生物浓度较高的原因可能是其空气细菌和真菌的浓度都较高,而交通干线只是空气细菌浓度较高,公园绿地只是空气真菌浓度较高。

2.2.2 不同时间空气微生物浓度分布 不同功能区不同时间空气微生物浓度不相同(图 2)。文教区,交通干线和公园绿地空气细菌浓度一日中在 09:00 和 17:00 较高,在 13:00 较低($P<0.05$)。这是由于在 09:00 和 17:00 是上下班的时间,人们走动较多,增加空气中细菌的数量。并且夏季的 13:00 光照较强,而紫外线对空气细菌有灭杀的作用。空气真菌浓度文教区在 13:00 和 17:00 较高,交通干线和公园绿地没有显著差异,这可能是文教区 17:00 人们活动增加可以导致空气中真菌浓度增加的原因,而正午的紫外线能够促进空气中真菌孢子的萌发。空气微生物总浓度的变化趋势与空气细菌相同,在正午浓度较低,而早晨和傍晚浓度较高。空气放线菌也没有明显的变化规律。

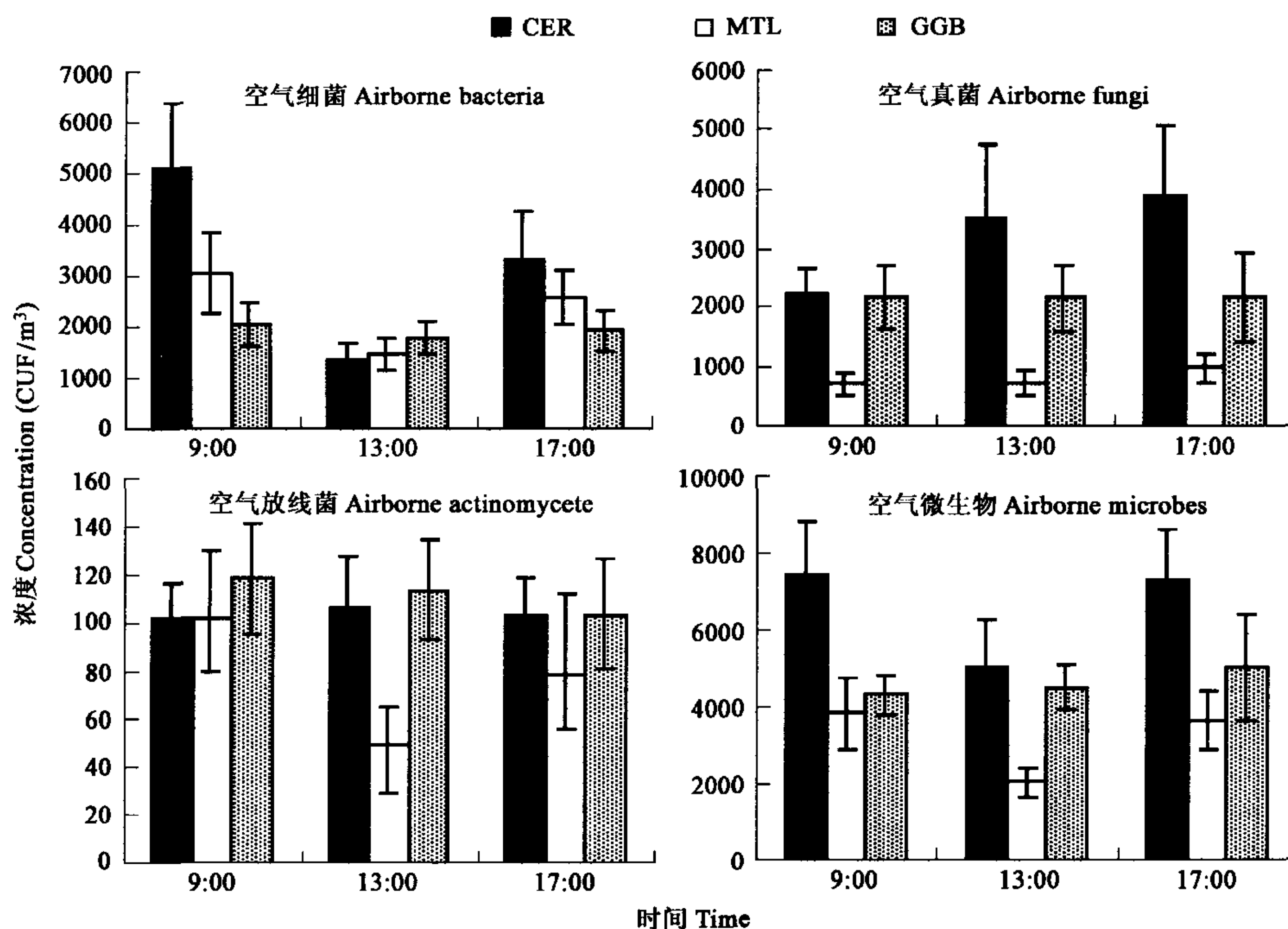


图 2 不同时间空气微生物浓度分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of airborne microbe concentration in different function periods

3 结论

(1) 3 个功能区共出现 30 属空气细菌,其中革兰氏阳性菌 20 属,革兰氏阴性菌 10 属,革兰氏阳性菌占 70%~85%,明显多于革兰氏阴性菌。优势菌属为微球菌属、芽孢杆菌属、葡萄球菌属和假单胞菌属。

(2) 除无孢属外,3 个功能区共出现 10 属空气真菌,枝孢属占 47.2%,是绝对的优势真菌,此后依次为链格孢属、无孢属、青霉属和曲霉属。

(3) 空气细菌浓度文教区和交通干线明显高于公园绿地,空气真菌浓度文教区和公园绿地明显高于交通干线。一日中,空气细菌浓度 13:00 较低,09:00 和 17:00 较高。

References:

- [1] Bovallius A, Bucht B, Roffey R, et al. Three year investigation of the natural airborne bacterial flora at four localities in Sweden. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **35**(5):847~852.
- [2] Lindmanm J, Constantinidou H, Barchet W, et al. Plants as sources of airborne bacteria, including ice nucleation-action bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, **44**(5): 1059.
- [3] Mancinelli R, Shulls W. Airborne bacteria in an urban environment. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **35**(6): 1095.
- [4] Martinez K, Sheehy J, Jones J, et al. Microbial containment in conventional fermentation processes. *Appl. Ind. Hyg.*, 1988, **3**: 177~181.

- [5] Schwann T. Vorläufige mittheilung betreffend versuche über die weingährung und fäulniss. Poggendorf's. *Ann. Physik. Chem.*, 1837, **41**: 184~193.
- [6] Pasteur M. Mémoire sur les corpuscules organizes qui existent dans l'atmosphère, examen de la doctrine des generations spontanés. *Ann. Chim. Phys.* 3 Ser., 1862, **64**: 5~110.
- [7] Meier F. Collection microorganisms in the arctic atmosphere; with field notes and material by C A Lindbergh. *Arctic. Monthly.*, 1935, **40**: 5~20
- [8] Imshenetshy A, Lysenko S, Kazakov G. Upper boundary of the biosphere. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1978, **35**: 1~5.
- [9] Lighthart B, The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. *FEMS Microbiology Ecology*, 1997, **23**: 263~274.
- [10] 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.
- [11] Chang C, Chung H, Huang C, *et al.* Exposure of workers to airborne microorganisms in open-air swine houses. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(1): 155~161.
- [12] Hargreaves M, Parappukkaran S, Morawska L, *et al.* A pilot investigation into association between indoor airborne fungal and non-biological particle concentrations in residential houses in Brisbane, Australia. *The Science of the Total Environment*, 2003, **312**: 89~101.
- [13] Xing L J, Li M C. *General mycology*. Beijing: High Education Press, 1999.
- [14] Hu Q X, Li J B, Ye B Y, *et al.* Size distribution of airborne fungi and effects of rainfall in Beijing. *Sichuan Environment*, 1994, **13**(3): 52~55.
- [15] Hu Q X, Che F X, Zhang S L, *et al.* The concentration of airborne microbes in Beijing-Tianjin area. *Environmental Science*, 1989, **10**(5), 30~35.
- [16] Che F X, Xu G Q, Shi C Y, *et al.* Ecological distribution of atmosphere bacteria over Beijing-Tianjin area, *Environmental Science in China*, 1990, **10**(3): 192~196.
- [17] Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Progresses of airborne microbial communities in urban ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **4**(2):315~322.
- [18] Shaffer B, Lighthart B. Survey of culturable airborne bacteria at four diverse locations in Oregon: urban, rural, forest, and coastal. *Microbiol. Ecology*, 1997, **34**: 167~177.
- [19] Bovallus A, Bucht B, Roffey R, *et al.* Three-year investigation of the natural airborne bacterial flora at four localities in Sweden. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **35**(5): 847~852.
- [20] Pastuszka J, Paw U, Lis D, *et al.* Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 3833~3842.
- [21] Lázaro J, Ferrer T, Caro J, *et al.* An aerobiological study in the rural areas of Aragon with a high population of pigs. *Grana*, 2000, **39**: 259~265.
- [22] Jaffal A. Residential indoor airborne microbial populations in the United Arab Emirates. *Environment International*, 1997, **23**(4): 529~533.
- [23] Rosas I, Calderón C, Martínez L, *et al.* Indoor and outdoor airborne fungal propagule concentrations in Mexico City. *Aerobiologia*, 1997, **13**: 23~30.
- [24] Shelton B, Kirkland K H, Flanders W D, *et al.* Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(4): 1743~1753.
- [25] Xie H L, Li S R, Yuan X Y, *et al.* Study on the disinfection of plant volatile secretion to the microorganism content in the air. *Acta Agriculture Universitatis Henanensis*, 1999, **33**(2): 127~133.

参考文献:

- [13] 邢来君,李明春. 普通真菌学. 北京:高等教育出版社,1999.
- [14] 胡庆轩,李军保,叶斌严,等. 北京市区大气真菌粒度分布及降雨的影响. 四川环境,1994,**13**(3):52~55.
- [15] 胡庆轩,车凤翔,张松乐,等. 京津地区大气微生物的浓度. 环境科学,1989,**10**(5),30~35.
- [16] 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.
- [17] 方治国,欧阳志云,胡利锋,等. 城市生态系统空气微生物群落研究进展. 生态学报,2004,**24**(2):315~322.
- [25] 谢慧玲,李树人,袁秀云,等. 植物挥发性分泌物对空气微生物杀灭作用的研究. 河南农业大学学报,1999,**33**(2):127~133.