

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.001



空调病房室内浮游细菌浓度与粒径分布特征

张华玲, 张娴, 方子梁

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:为定量评估病房室内空气质量,保障设计及运行管理效果,采用 IWL-6 型六级撞击式空气微生物采集器对重庆市某综合医院 3 个内科空调病房进行现场采样,通过培养计数与镜检分析,获得了病房空气细菌气溶胶浓度及粒径分布,发现各科室均有一定的浮游细菌污染,病房空气细菌气溶胶浓度与温度、人员密度呈正相关,与相对湿度呈负相关,与科室类型无显著相关;夏季病房浮游细菌浓度高于冬季,儿科病房最高,浓度为 $2\ 865\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$ 。细菌气溶胶粒径分布与季节相关,冬季主要分布在 I 级~III 级,夏季主要在 III 级~V 级。冬、夏季病房空气细菌气溶胶中值直径大于夏季,但均小于 $4.7\ \mu\text{m}$ 。

关键词:病房;浮游细菌;细菌浓度;分布特征

中图分类号:TU993.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0001-06

Airborne bacterial aerosol concentration and distribution characteristics in air-conditioned wards

Zhang Hualing, Zhang Xian, Fang Ziliang

(School of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To evaluate the design of environment safeguard and management effect of ward, the samples of three wards in Chongqing hospital were taken and the concentration of air bacterial aerosol and distribution characteristics in wards were known by bacterial culture, finding that all wards have bacterial contamination to some extent. Air bacterial aerosol concentration is positively correlated with people density and temperature, negatively correlated with humidity, little to do with the unit type. Ward air bacteria aerosol concentration in summer is higher than in winter, especially in paediatric ward, which may reach $2865\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$. The size distribution of bacterial aerosol has close relation with season, the high percentage of airborne bacteria concentration is centered on stage I to stage III in winter and stage III to stage V in summer. The median diameter of airborne bacterial in winter is bigger than summer and both of them is smaller than $4.7\ \mu\text{m}$.

Keywords: wards; bacterial aerosol; bacterial concentration; distribution characteristics

收稿日期:2017-06-15

基金项目:国家自然科学基金(51278506)

作者简介:张华玲(1967-),女,教授,博士生导师,主要从事室内空气环境研究,E-mail:hlzhang@cqu.edu.cn。

Received:2017-06-15

Foundation item:Natural Science Foundation of China(No. 51278506)

Author brief:Zhang Huangling(1967-), professor, doctoral supervisor, main research interest: indoor air environment, E-mail:hlzhang@cqu.edu.cn.

近年来,空气生物污染问题受到广泛关注,生物气溶胶主要包含悬浮在空气中的细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉、孢子和动植物的残骸等^[1]。动力学直径不同的生物气溶胶会进入到呼吸系统的不同位置,对人体造成不同程度的危害。如 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 的粒子可进入鼻腔和上呼吸道,可能造成上呼吸道感染; $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 的粒子能沉着在小支气管内,可能导致支气管炎等; $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的粒子可进入肺深处^[2],严重的可导致过敏性肺炎。气溶胶粒径越小,进入人体呼吸道的位置就越深,对人体造成的危害就越大。空气中细菌通常附着在气溶胶颗粒物上,以浮游细菌的形式存在,其大小主要取决于黏着的尘埃颗粒大小。浮游细菌可以通过黏膜、皮肤损伤、消化道及呼吸道进入人体,但主要是通过呼吸道感染机体^[3]。细菌存活能力强,繁殖能力高,尤其在空调建筑内有适宜细菌生存的温度和湿度。近年来,细菌感染率明显上升,应引起重视。

科研人员越来越关注室内空气生物污染问题。Ki等^[4]通过研究,得到了韩国不同公共场合的平均空气细菌浓度以及随季节变化的情况;Ki等^[5]测量了Konkuk大学学生大厅的可培养细菌浓度,分析了其与人数之间的关系;刘婷等^[6]研究了梅雨期大学宿舍内浮游细菌浓度和粒径分布特征。这些研究主要关注的是普通民用建筑内的浮游细菌浓度,还没有文献针对医院空调房间的浮游细菌粒径特征进行现场测试研究。与普通公共建筑不同,医院布局复杂,特殊功能科室多,易感人群高度集中,空气中的病原微生物相对集中,相对于易感人群而言,不同粒径的浮游细菌到达人体呼吸道的位置不同,长时间暴露在空气细菌超标的环境中会导致健康风险。本文选取重庆市某综合医院3个不同科室的病房进行现场实测,分别在冬、夏季对室内空气细菌进行采样培养,分析病房内空气细菌浓度、粒径分布特征和优势菌属,以期对病房的空调系统设计及日常消毒杀菌提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 采样地点和时间

选择重庆市某综合医院内科大楼3个病房进行现场采样,大楼共13层,每层病房为同一科室,病房空调系统均为风机盘管加新风系统,各病房空调均为全天连续运行,窗户关闭,病房门开启与走道相通。3个病房在各层的位置、大小和室内布置完全相同,病房内没有肉眼可见的霉菌,没有明显霉味,每个病房内的病人数相同,采样病房为不同科室。

故选择二楼儿科、五楼心内科与八楼呼吸科3个病房进行现场采样,分析细菌的浓度和粒径分布与疾病类型是否有关,病房面积为 $15\ \text{m}^2$,每个病房选取2个采样点,均匀布置在病房对角线上。冬季选择内科大楼一楼入口处作为室外参考点,由于此处人流量大,人员扰动大,夏季调整为六楼室外新风口处为室外参考点,并增加了无人且空调关闭的会议室作为室内参考点。采样时间为2013年1月19日、21日、25日、29日(冬季)和6月19日、7月5日、15日(夏季),上、下午各1次。采样仪器为IWL-6型六级撞击式空气微生物采集器(北京),采样器I~VI级的捕获范围如表1所示。

表 1 六级微生物采样器技术参数

级数	捕获范围/ μm	有效截留粒径/ μm
I级	>7.0	8.2
II级	$4.7\sim 7.0$	6.0
III级	$3.3\sim 4.7$	3.0
IV级	$2.1\sim 3.3$	2.0
V级	$1.1\sim 2.1$	1.0
VI级	$0.65\sim 1.1$	0.65

1.2 采样和培养方法

采样高度为人的呼吸带,距离地面约 $1.3\ \text{m}$,样品采集时间为 $2\ \text{min}$,空气流量为 $28.3\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。每次采样之前都要用75%的酒精对采样仪和采样皿等工具进行消毒,保持周围环境安静,避免引起空气扰动。采用LB琼脂培养基(酵母膏 $5\ \text{g}$ 、氯化钠 $10\ \text{g}$ 、琼脂粉 $15\sim 20\ \text{g}$ 、蒸馏水 $1\ 000\ \text{mL}$ 、蛋白胨 $10\ \text{g}$)。采样完毕后,取出培养皿扣上盖,依次按顺序和编号,再将培养皿包裹严实,将细菌样品带回实验室,放入温度为 $37\ ^\circ\text{C}$ 的恒温箱中培养 $2\ \text{d}$ 。

1.3 浮游细菌浓度计算

冬夏季得到采样器各级细菌培养皿有效数据共600个,利用采样时间和气体流量,根据式(1)得到浮游细菌总浓度。

$$\text{空气中浮游细菌数}(\text{CFU}\cdot\text{m}^{-1}) = \frac{\text{培养皿中菌落数} \times 1\ 000}{\text{采样时间}(\text{min}) \times 28.3(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})} \quad (1)$$

1.4 浮游细菌中值直径计算

根据采样器各级的浮游细菌菌落数占总浮游细菌菌落数的百分比,按照从VI级到I级的顺序计算出各级的累计百分比,再根据生物采样器各级的有效截留粒径,得到累计百分比与有效截留粒径的对数回归方程,当累计百分比为50%时得到的有效截

留粒径,即为浮游细菌的中值直径。

1.5 统计分析

统计分析方法采用 SPSS 软件,当 $p < 0.05$ 时,表明在 95% 的置信区间内具有统计学意义上的显著差异。图表绘制用 Microsoft Excel 2007 进行。

2 结果与分析

2.1 浮游细菌浓度

在冬季,心内科的浮游细菌浓度最大,为 $1\ 589\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$,其次为室外点及儿科,细菌浓度分别为 $1\ 449$ 、 $1\ 292\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$,呼吸科的浮游细菌浓度远小于其他采样点,为 $786\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在夏季,儿科的浮游细菌浓度最大,为 $2\ 865\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$,其次为呼吸科和心内科,浮游细菌浓度分别为 $2\ 272$ 、 $1\ 749\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$,室外采样点和无人会议室的浮游细菌浓度分别为 565 、 $314\ \text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$ 。除室外点,冬季各采样点的浮游细菌浓度均低于夏季,冬季室外采样点为内科大楼入口处,过往人员多,夏季室外采样点为内科大楼五楼新风入口处,排除了过往人员的影响,这可能是导致夏季室外采样点空气细菌浓度低于冬季的原因。采用文献[7]给出的标准对病房空气细菌真菌污染进行评价,各采样病房的空气细菌真菌污染情况如表 2 所示。

表 2 各采样病房细菌浓度分级评价
Table 2 Grading evaluation of airborne bacterial in all sampling points

科室	冬季	夏季
心内科	轻污染	轻污染
儿科	轻污染	污染
呼吸科	较清洁	污染
无人会议室		较清洁
室外采样点	较清洁	清洁

由表 2 可以看出,除冬季的呼吸科,病房均存在一定的细菌污染状况,病房人员的长期暴露将存在一定的健康风险。

使用单因素方差分析方法进行差异性分析,发现冬、夏季数据存在显著性差异(置信区间为 95% CI, $p < 0.05$),说明季节是影响细菌浓度的因素,同时发现温湿度也是影响病房空气细菌浓度的显著性因素。同一季节不同科室病房采样点之间的细菌浓度数据之间没有显著性差异(置信区间为 95% CI, $p > 0.05$),说明科室不是影响病房空气细菌浓度的主要因素。此外,采用独立样本 t 检验法对现场采样时刻的病房人数进行分析,发现病房人员密度是

影响浮游细菌浓度的显著因素(置信区间为 95% CI, $p < 0.05$)。

2.2 细菌粒径分布特征

图 1 和图 2 为冬夏季不同粒径细菌样本所占的比例。在冬季,Ⅱ级所占比例最大,Ⅱ级~Ⅵ级逐渐减小,Ⅰ级~Ⅲ级所占比例总体最大。其中,儿科病房浮游细菌浓度Ⅰ级~Ⅲ级占 72.7%;心内科浮游细菌浓度Ⅰ级~Ⅲ级占 64.9%;呼吸科浮游细菌浓度Ⅰ级~Ⅲ级占 68.9%;室外测点Ⅰ级~Ⅲ级占 77.3%。

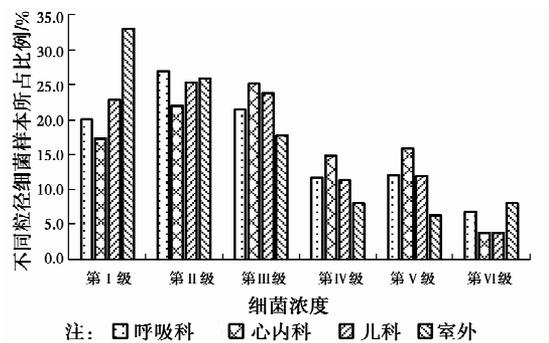


图 1 冬季浮游细菌粒径分布

Fig. 1 Airborne bacterial distribution characteristics in winter

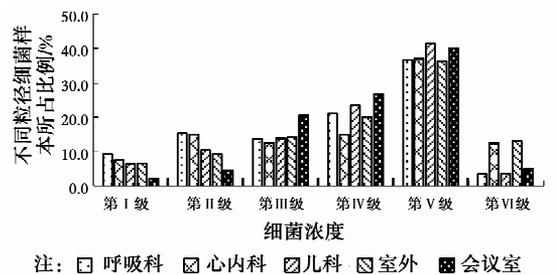


图 2 夏季浮游细菌粒径分布

Fig. 2 Airborne bacterial distribution characteristics in summer

在夏季,Ⅰ级~Ⅴ级所占比例逐渐增加,在Ⅴ级达到最大值,Ⅲ级~Ⅴ级所占比例总体最大。其中,儿科病房浮游细菌浓度Ⅲ级~Ⅴ级占 79%;心内科浮游细菌浓度Ⅲ级~Ⅴ级占 64.7%;呼吸科浮游细菌浓度Ⅲ级~Ⅴ级占 71.6%;室外测点Ⅲ级~Ⅴ级占 70.6%。会议室内浮游细菌浓度Ⅲ级~Ⅴ级占 87.7%。可见,冬夏季各病房空气细菌的粒径分布特征存在一定差异。

根据浮游细菌气溶胶粒径的分布百分比,计算出冬夏季不同科室病房内浮游细菌的中值直径,冬季各采样点的中值直径分别为 4.73(儿科)、4.04(心内科)、4.40(呼吸科)、5.17 μm (室外)。夏季浮游细菌中值直径相对较小,分别为 2.48(儿科)、2.57(心内科)、2.34(呼吸科)、3.28(室外)、2.09 μm (会议室)。结果如图 3 所示。

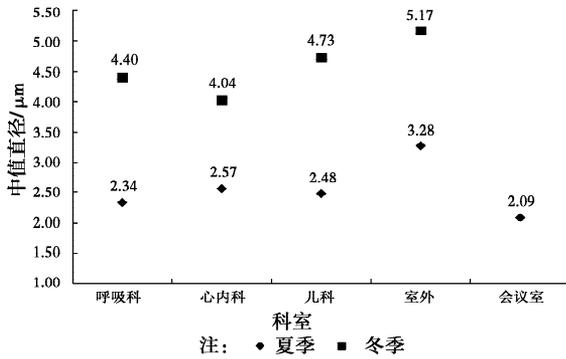


图 3 各科室冬夏季浮游细菌中值直径

Fig. 3 Median diameters of bacterial aerosols in winter and summer of different wards

要针对此类病菌进行消毒与杀菌。

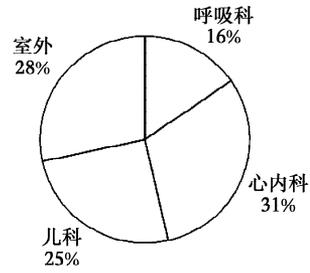


图 4 夏季不同采样点浮游细菌比例

Fig. 4 The percentage of bacterial in different sites in summer

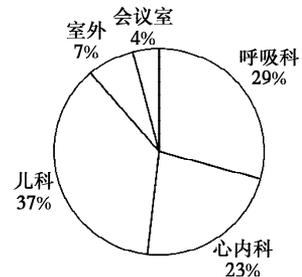


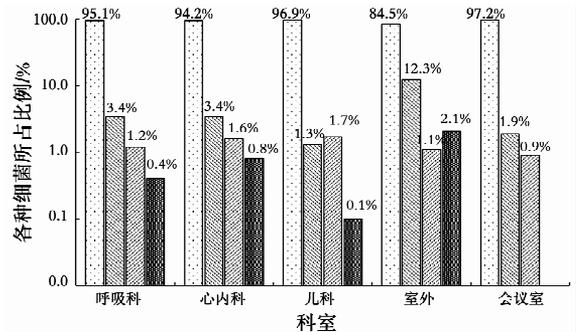
图 5 冬季不同采样点浮游细菌比例

Fig. 5 The percentage of bacterial in different sites in winter

由图 3 可见,在同一季节,浮游细菌室内采样点的浮游细菌中值直径均小于室外点,其原因可能是由于通过空调系统进入病房内的空气被空调系统过滤器过滤,较大粒子被阻截。不同科室病房的浮游细菌的中值直径几乎相同,说明人员密度和患病类型对浮游细菌的中值直径影响较小;不同季节的浮游细菌中值直径差别较大,且同一病房浮游细菌中值直径也不同,说明季节影响浮游细菌的粒径分布浮游细菌。冬、夏季室内浮游细菌粒径中值直径都小于 5 μm,粒径小于 4.7 μm 的气溶胶为可吸入气溶胶,可进入下呼吸道,对人体的健康影响风险更大。张华玲等^[8]也给出不同科室空气真菌气溶胶粒径中值直径小于 3.19 μm,因此,在进行空调系统设计时,需要加大对粒径小于 4.7 μm(Ⅲ级以下)的浮游细菌的过滤效率,同时,也有利于室内真菌孢子的控制。

2.3 浮游细菌菌落特征

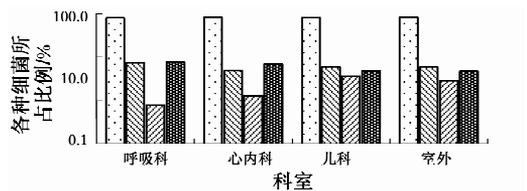
夏季实验在各级培养皿中总共培养出细菌 4 689 株,冬季实验在各级培养皿中总共培养出细菌 3 497 株。各科室细菌所占比例如图 4、图 5 所示。将冬夏季各采样点的浮游细菌按照革兰氏染色与形态进行分析,分为阳性球菌、阳性杆菌、阴性球菌、阴性杆菌。各采样点的分析结果如图 6、图 7 所示。可以看出,冬夏季各观测点空气中革兰氏阳性菌(91.3%~99.1%)明显多于革兰氏阴性菌(0.9%~8.8%),球菌(84.3%~98.6%)远多于杆菌(1.4%~15.9%),其中,革兰氏阳性球菌最多。大多数革兰氏阳性菌能产生外毒素,具有致病性,革兰氏阳性球菌又分为葡萄球菌、链球菌、肺炎双球菌、粪肠球菌等,病房内的感染性革兰氏阳性球菌主要以金黄色葡萄球菌为主^[9],金黄色葡萄球菌可引起局部化脓感染,也可引起肺炎、伪膜性肠炎、心包炎等,甚至败血症、脓毒症等全身感染,是医院交叉感染的重要来源。因此,在病房日常卫生防护时有必



注: □ 阳性球菌 □ 阳性杆菌 □ 阴性球菌 ■ 阴性杆菌

图 6 夏季各科室浮游细菌优势菌种

Fig. 6 Dominant bacterial genera in summer



注: □ 阳性球菌 □ 阳性杆菌 □ 阴性球菌 ■ 阴性杆菌

图 7 冬季各科室浮游细菌优势菌种

Fig. 7 Dominant bacterial genera in winter

3 讨论

Ki 等^[4]给出人员密度及活动量是导致幼儿园浮游细菌浓度最高、老年福利院浮游细菌浓度最低的主要原因;Jaffal 等^[10]发现医院的儿科和妇科病房浮游细菌浓度高于其他科室,认为是这两个科室

中医护人员、探病人员及病人陪护数量多而引起; Awosika 等^[11] 采样发现男科和普外科病房人数超过其他科室病房,其浮游细菌浓度高于其他科室。本文通过对测试数据的分析,也发现浮游细菌浓度与人员密度有关,且室内浮游细菌浓度与室内温度呈正相关,与湿度呈负相关,与刘婷等^[6] 的研究结论一致。

冬、夏季空调病房中的细菌气溶胶浓度不同,夏季高于冬季。文献^[12] 通过对长安大学校内医院细菌污染情况的测试,得到医院内夏季细菌浓度明显高于冬季; Lee 等^[13] 对韩国某公寓进行测试,得到浮游细菌浓度有季节性差异,夏季浮游细菌浓度高于冬季,文献^[14] 通过大量文献分析指出:细菌的生长温度在 5~55 ℃ 之间,其中,30~46 ℃ 范围内生长最为活跃,而其生长所需的相对湿度在 55%~99% 之间,说明夏季环境比冬季更适于细菌滋生。与本文研究结果一致。

此外,本文研究发现冬、夏季浮游细菌粒径分布不同,夏季病房内浮游细菌颗粒物主要分布在 V 级,冬季主要分布在 II 级,冬季浮游细菌的中值直径大于夏季。张燕茹等^[12] 对长安大学校内医院长达一年的采样观察,得到春夏秋冬 4 个季节浮游细菌主要分布在 III~V 级; 郝翠梅等^[15] 对杭州市居家环境下生物污染进行调查,得到夏季和冬季细菌粒径主要分布在 V 级。分析其原因,可能是由于重庆特殊的气候条件所造成,重庆的冬天多雨而湿润,相比其他地区,室外空气相对湿度大,经过空调处理送入病房的空气含湿量相对较高,造成病房内的含湿量较其他地区高,空气中的细颗粒物会随着环境湿度的升高而发生聚集作用^[16],导致室内空气颗粒物大粒径浓度所占比例相对较大,且不同粒径浮游细菌浓度与空气颗粒物浓度正相关^[17],也导致本文测试发现的冬季浮游细菌的中值直径较大。

韩国某医院优势空气细菌属为葡萄球菌属(50%)、微球菌属(15%~20%)、棒杆菌属(5%~25%)、芽孢杆菌属(5%~15%)^[18]; 伊朗某医院优势空气细菌为革兰氏阳性芽孢杆菌(50.6%)、表皮葡萄球菌(20.29%)、金黄色葡萄球菌 Saprophyticus(2.6%)、金黄色葡萄球菌(7.03%)、其他葡萄球菌(5.9%)和微球菌(13.43%)^[19]; 梁冰等^[20] 通过对大型补给船舱室内空气内浮游细菌菌落鉴定,得到革兰氏阳性菌占 85.1%,其中,革兰氏阳性球菌最多,革兰氏阴性菌占 14.9%; 方志国等^[21] 对北京市 31 户家庭进行空气细菌采样,发现在居家环境空气中,球菌(60.6%)的数量明显多于杆菌(39.4),室内革兰氏阳性菌(90.7%)明显多于革兰氏阴性菌

(9.3%),冬季(12.5%)空气中革兰氏阴性菌小于夏季(30.7%)。可见,医院与普通民用建筑室内空气中阳性菌和阴性菌、球菌和杆菌所占比例虽然不同,但其阳性菌明显多于阴性菌,且球菌明显多于杆菌。

4 结论

1) 夏季各科室病房空气细菌浓度高于冬季,其中,儿科病房细菌浓度最高,为 2 865 cfu·m⁻³。除冬季的呼吸科以外,测试空调病房冬夏季均存在一定的细菌污染,病房人员的长期暴露存在一定的健康风险。空气细菌浓度与季节变换、室内环境的温湿度和室内人员密度有关,但室内病人患病类型对空气细菌浓度没有影响。

2) 各科室病房空气细菌粒径分布特征因季节不同而不同,冬季各采样病房的浮游细菌粒径主要分布 I 级~III 级,在 II 级达到最大值,其粒径范围主要分布 3 μm 以上; 夏季的各采样病房的浮游细菌主要分布在 II 级~V 级,在 V 级达到最大值,粒径范围在 1~6 μm 之间。病房空调系统设计与日常维护时,应加强对粒径小于 4.7 μm 浮游细菌的过滤。

3) 冬、夏季的浮游细菌中值直径都小于 5 μm,但季节对浮游细菌的中值直径有影响,夏季浮游细菌中值直径小于冬季,在同一季节,浮游细菌室内空气细菌气溶胶中值直径小于室外。

4) 冬、夏季不同科室的浮游细菌中占最大比例的均为革兰氏阳性球菌,其中,革兰氏阳性菌菌落数明显多于革兰氏阴性菌,球菌明显高于杆菌。在病房的日常清洁和运行管理中,应选择适宜的、有针对性的消毒杀菌方法。

参考文献:

- [1] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(4): 546-552.
DU R. Advances in atmospheric aerosol research [J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(4): 546-552. (in Chinese)
- [2] FENG C T, JANET M M. Biodiversity and concentrations of airborne fungi in large US office from the BASE study [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 5181-5191.
- [3] 刘金凤, 苑同业, 姜美娟, 等. 不同状态下全封闭舱室微生物气溶胶粒径及菌属分布变化[J]. 卫生研究, 2016, 45(5): 849-851.
LIU J F, YUAN T Y, JIANG M J, et al. Microbial aerosol particle size distribution and the change of species distribution in Fully enclosed cabin Under different condition [J]. Journal of Hygiene Research, 2016, 45(5): 849-851. (in Chinese)

- [4] KI Y K, CHI N K. Airborne microbiological characteristics in public buildings of Korea [J]. *Building and Environment*, 2007, 42:2188-2196.
- [5] KI J H, CHEOL E L, HANNAH B K, et al. Effects of human activities on concentrations of culturable bioaerosols in indoor air environments [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2017, 104:58-65.
- [6] 刘婷, 李露, 张家泉, 等. 梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 [J]. *环境科学*, 2016, 37(4):1256-1263.
LIU T, LI L, ZHANG J Q, et al. Airborne bioaerosol concentration and distribution characteristics in dormitory of Meiyu period [J]. *Environment Science*, 2016, 37(4):1256-1263. (in Chinese)
- [7] 张华玲, 姚大军, 张雨, 等. 空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 [J]. *环境科学*, 2016, 37(3):795-800.
ZHANG H L, YAO D J, ZHANG Y, et al. Establishment of assessment method for air bacteria and fungi contamination [J]. *Environment Science*, 2016, 37(3):795-800. (in Chinese)
- [8] 张华玲, 冯鹤华, 方子梁, 等. 空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36(4):1234-1240.
ZHANG H L, FENG H H, FANG Z L, et al. Airborne fungal concentration and distribution characteristics in air-conditioned wards [J]. *Environment Science*, 2015, 36(4):1234-1240. (in Chinese)
- [9] 辛娜, 井发红, 李敬梅, 等. 医院感染革兰氏阳性球菌的分布与耐药性分析 [J]. *国际检验医学杂志*, 2011, 32(18):2144-2146.
XIN N, JING F H, LI J M, et al. The distribution and analysis of drug resistance of gram positive coccus in hospital [J]. *International Journal of Laboratory Medicine*, 2011, 32(18):2144-2146. (in Chinese)
- [10] JAFFAL A A, NSANZE H. Hospital airborne microbial pollution in a desert country [J]. *Environment International*, 1997, 23(2):167-172.
- [11] AWOSIKA S A, OLAJUBU F A, AMUSA N A. Microbiological assessment of indoor air of a teaching hospital in Nigeria [J]. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2012, 2(6):465-468.
- [12] 张燕茹. 校园环境微生物气溶胶的分布特征研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHANG Y R. Study on distribution characteristics of microorganism in university campus environment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [13] LEE J H, JO W K. Characteristics of indoor and outdoor bioaerosols at Korean high-rise apartment buildings [J]. *Environmental Research*, 2006, 101(1):11-17.
- [14] 严汉彬. 控制空调系统微生物污染的温湿度条件分析 [J]. *制冷与空调*, 2011, 11(2):14-17.
YAN H B. Analysis of condition of temperature and humidity to control microbial contaminant in air-conditioning system [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2011, 11(2):14-17. (in Chinese)
- [15] 郝翠梅. 杭州市居家空气可培养微生物特征研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015.
HAO C M. Characteristics of culturable airborne microbes in indoor environments in Hangzhou [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2015. (in Chinese)
- [16] 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 [J]. *环境科学*, 2014, 35(12):4415-4421.
GAO M, QIU T L, JIA R Z, et al. Concentration and size distribution of bioaerosols at non-haze and haze in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12):4415-4421. (in Chinese)
- [17] HAAS D, GALLER H, LUXNER J, et al. The concentrations of culturable microorganisms in relation to particulate matter in urban air [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65:215-222.
- [18] KIM K Y, KIM Y S, KIM D. Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the general hospitals of Korea [J]. *Industrial Health*, 2010, 48:236-243.
- [19] DARVISHZADEH N. Evaluation of bioaerosol in a hospital in tehran [J]. *Ranian Journal of Health & Environment*, 2013, 6(1):165.
- [20] 梁冰, 苑同业, 刘金凤, 等. 大型补给船舱室细菌气溶胶浓度及细菌菌谱特征调查 [J]. *卫生研究*, 2015, 44(4):688-691.
LIANG B, YUE T Y, LIU J F, et al. Bacterial aerosol particle size distribution and the change of species distribution in large supplies storehouse [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2015, 44(4):688-691. (in Chinese)
- [21] 方志国, 欧阳志云, 刘芃, 等. 城市居家环境空气细菌群落特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(10):2669-2675.
FANG Z G, OUYANG Z Y, LIU F, et al. Airborne bacterial community composition in family homes [J]. *China Environment Science*, 2014, 34(10):2669-2675. (in Chinese)