

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.020

开放科学(资源服务)标识码 OSID:



间歇与连续供冷模式对可培养细菌浓度的影响

申兵阳, 刘欢, 甘梓枫, 张健, 刘猛, 刘鲁萌

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 空气中的细菌, 尤其是病原菌和益生菌, 对人体呼吸系统、皮肤系统等均造成有利/不利影响, 其分布特征随温度和相对湿度变化。设置房间空调器间歇运行和连续运行两类供冷模式, 探究不同供冷模式下可培养总细菌、病原菌(金黄色葡萄球菌)、益生菌(乳酸杆菌)的时空分布差异和环境因素的关联。结果表明: 时间尺度上, 总细菌平均浓度在间歇运行下($(1195 \pm 511) \text{CFU}/\text{m}^3$)是连续供冷模式下($(483 \pm 199) \text{CFU}/\text{m}^3$)的 2.5 倍; 金黄色葡萄球菌平均浓度在间歇供冷模式下($(544 \pm 299) \text{CFU}/\text{m}^3$)是连续供冷模式下($(136 \pm 7) \text{CFU}/\text{m}^3$)的 4 倍; 益生菌在连续和间歇供冷模式下差异较小, 分别为 $(77 \pm 40) \text{CFU}/\text{m}^3$ 和 $(73 \pm 24) \text{CFU}/\text{m}^3$ 。总细菌和金黄色葡萄球菌浓度在间歇供冷模式下浓度波动较大; 连续供冷模式下波动较小。空间尺度上, 总细菌与金黄色葡萄球菌浓度随着距空调横向和垂向距离的增大而增大; 随着距空调纵向距离的增大而减小。间歇供冷模式下, 儿童呼吸区($z=0.5 \text{ m}$)细菌暴露风险高于成人呼吸区($z=1.5 \text{ m}$)。总细菌和金黄色葡萄球菌浓度均与温度呈显著正相关($p < 0.001$), 而与相对湿度关联较小。相比于连续供冷, 间歇供冷模式下室内总细菌及病原菌浓度均较高, 夏季时适当延长空调开启时间, 可显著降低室内可培养细菌浓度, 减少细菌感染风险。

关键词: 空调器; 间歇供冷; 连续供冷; 可培养法; 细菌

中图分类号: TU831 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)02-0219-10

The influence of intermittent and continuous cooling modes on the concentration of cultivable bacteria

SHEN Bingyang, LIU Huan, GAN Zifeng, ZHANG Jian, LIU Meng, LIU Lumeng

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Airborne bacteria especially pathogens and probiotics, have harmful/beneficial effects on the human respiratory system and skin system. The distribution of these bacteria varied with different temperature and relative humidity. In this study, two working conditions: intermittent cooling and continuous cooling of air

收稿日期: 2021-12-05

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M683245); 中央高校基本科研业务费专项资金(2020CDJQY-A066); 国家重点研发计划(2018YFD1100704)

作者简介: 申兵阳(1998-), 男, 主要从事室内微生物污染研究, E-mail: byshen@cqu.edu.cn。

刘欢(通信作者), 女, 博士, E-mail: huanliu@cqu.edu.cn。

Received: 2021-12-05

Foundation items: China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M683245); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2020CDJQY-A066); The National Key R & D Program of China (No. 2018YFD1100704)

Author brief: SHEN Bingyang (1998-), main research interest: indoor microbial contamination, E-mail: byshen@cqu.edu.cn.

LIU Huan (corresponding author), PhD, E-mail: huanliu@cqu.edu.cn.

conditioners was set up to explore the differences in the temporal and spatial distribution of culturable total bacteria, pathogen (*Staphylococcus aureus*) and probiotics (*Lactococcus aureus*). The results showed that the average concentration of total bacteria in intermittent cooling ($(1\ 195 \pm 511)$ CFU/m³) is 2.5 times that in continuous cooling ((483 ± 199) CFU/m³); the average concentration of *Staphylococcus aureus* was in intermittent cooling ((544 ± 299) CFU/m³) is 4 times that in continuous cooling ((136 ± 7) CFU/m³); the average concentration of *Lactococcus aureus* was not different in the continuous ((77 ± 40) CFU/m³) and intermittent ((73 ± 24) CFU/m³) cooling. The concentration of total bacteria and *Staphylococcus aureus* fluctuated greatly in intermittent cooling. In intermittent cooling, the bacterial concentration changed significantly in different sites of the room. However, in continuous cooling, the bacterial concentration varied not obviously. On the spatial scale, the concentration of total bacteria and *Staphylococcus aureus* increased with the increase of the horizontal and vertical distance from the air conditioner, and decreased with the increase of the longitudinal distance from the air conditioner. In intermittent cooling mode, the risk of bacterial exposure in children's respiratory area ($z=0.5$ m) is higher than that of adult's respiratory area ($z=1.5$ m). The concentrations of total bacteria and *Staphylococcus aureus* were significantly positively correlated with temperature ($p < 0.001$). However, there is no obvious correlation with relative humidity. In summer, using air conditioner can significantly reduce the concentration of cultivable bacteria in the room, which may benefit to our health.

Keywords: air conditioner; intermittent cooling; continuous cooling; cultivable method; bacteria

近年来,室内空气污染问题已成为学界研究热点之一。室内空气污染包含物理污染、化学污染、生物污染和放射性污染^[1]。其中,生物污染主要由生物气溶胶引起,即悬浮在空气中的细菌、真菌、病毒、动物或植物碎屑^[2]。

现代人80%以上的时间处于室内,长时间的室内生物气溶胶暴露会对人体健康产生影响。Mentese等^[3]指出,室内总细菌浓度(Total bacteria concentration, TBC)与病态建筑综合征有关。生物气溶胶暴露所引发的健康问题可总结为“传染病”“呼吸系统疾病”“癌症”3大类^[2]。Björnsson等^[4]发现,哮喘的发生与室内空气细菌浓度有一定相关性。肺结核、军团病、部分胃肠道疾病均被证实与空气病原菌或病毒有关^[5-7]。但微生物暴露并非完全有害,Douwes等^[8]研究认为,生命早期暴露于微生物可防止哮喘发生。此外,在空气微生物群落中也发现了少量益生菌的存在,这些益生菌能够在空气中生长繁殖^[9]。

现代建筑中,供暖通风及空调系统(Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC)是重要的室内热湿环境调节系统,空调运行导致的热湿环境变化对室内空气微生物群落组成有着十分重要的影响。温度、湿度等参数的变化会在一定程度上会影响细菌的生长。温度较高或较低时,酶促反应的速率都会受到损害或抑制。夏季室内温度大致在

15~35℃之间^[10],而多数细菌的生长温度在11~45℃之间^[11],其最适生长温度与夏季室内空气温度范围有较大程度的重合。Mui等^[12]发现,办公室室内细菌含量与空气温度和相对湿度显著相关。张运^[13]研究空调滤膜上的微生物生长率发现,在15~29℃温度范围内,滤膜表面细菌生长率随着温度升高而升高。王宁等^[14]对空调温湿度范围内典型细菌的生存繁殖情况进行研究,证实了在18~28℃,随温度升高,总细菌活性增强。此外,相对湿度也会影响微生物生长繁殖,相对湿度较高时,物体表面会形成一层水膜,细菌会生存在这层水膜里,而空气较干燥时,细菌细胞甚至会失水皱缩^[14]。Zhu等^[15]发现,办公室室内外空气细菌含量与相对湿度息息相关。诸葛阳^[16]发现,在住宅和医院场所,夏季相对湿度与细菌含量呈现正相关。丁立行等^[17]研究表明,较低的湿度对空气中的细菌具有明显的灭活作用。当相对湿度低于65%时,空气中细菌繁殖率降低^[18]。

在室内,细菌一定程度受热湿环境影响,而夏季室内热湿环境与空调供冷模式紧密相关。在夏热冬冷气候区,空调供冷模式存在明显的间歇运行特征。蒋婷婷^[19]针对夏季重庆地区住户空调器使用情况进行调查,发现大多数人员工作日会选择在晚间20:00—21:00开启空调,并持续运行至次日6:00—8:00。谭晶月^[10]的另一项调研结果显示:卧

室空调单次运行时长主要分布在1~10 h之间,但也有40%群体夏季会长达11~24 h连续使用空调。空调间歇和连续供冷模式对室内热湿环境影响很大。Ding等^[20]针对中国夏热冬冷地区不同空调运行模式下室内空气温度进行研究,发现全天24 h空调运行时段室内温度几乎保持恒定(24~26℃),仅夜间时段(22:00至次日8:00)运行时有一定波动(24~29℃)。从空间维度看,室内温湿度场在横向、纵向垂向分布存在一定差异,利一峰^[21]在宿舍内对离空调不同距离及高度的位置进行温度监测发现,夜间空调运行时,不同测点温差在1℃左右,而相对湿度差在2%左右。

现有研究多针对热湿环境与总细菌浓度,但对与人体健康密切相关的病原菌及益生菌的研究较少。此外,已有研究多关注室内外自然热湿环境对室内生物气溶胶的影响,鲜有针对人为空调器调控环境下室内空气细菌的相关研究,更缺少不同空调供冷模式对室内细菌群落生长情况的报道。针对目前研究的不足,笔者在实验室条件下设置空调间歇运行和连续运行两种供冷模式,采集培养室内空气总细菌、病原菌、益生菌群落,旨在阐明不同空调供冷模式下细菌浓度的时空变化规律;探究影响细菌群落变化的主要环境因素。

1 材料与方 法

1.1 培养细菌的选取和培养基制备

根据美国工业卫生学家会议(ACGIH),空气微生物群落中细菌占比最高,接近50%^[22]。总细菌浓度可以表征室内细菌浓度整体水平^[23];葡萄球菌的传播与感染是重要的公共卫生问题,金黄色葡萄球菌是常见的病原菌之一^[24];乳酸菌广泛分布于自然界,是一类重要的益生菌^[25]。试验选取总细菌、金黄色葡萄球菌、乳酸菌属为实验对象,并采用相应的

特异性培养基进行培养。

总细菌培养基选用胰蛋白酶大豆琼脂(Tryptic Soy Agar, TSA)培养基^[26]:胰蛋白胨15.0 g/L、大豆胨5.0 g/L、氯化钠5.0 g/L、琼脂15.0 g/L;金黄色葡萄球菌培养基选用Baird-Parke琼脂(BP)培养基^[27]:胰蛋白胨10.0 g/L、牛肉浸粉5.0 g/L、丙酮酸钠10.0 g/L、甘氨酸12.0 g/L、氯化锂5.0 g/L、琼脂20.0 g/L;乳酸菌属培养基选用MRS琼脂(de Man, Rogosa, Sharp Agar)培养基^[28]:蛋白胨10.0 g/L、牛肉浸粉5.0 g/L、酵母浸粉4.0 g/L、葡萄糖20.0 g/L、磷酸二氢钾2.0 g/L、柠檬酸三铵2.0 g/L、醋酸钠5.0 g/L、硫酸镁0.2 g/L、硫酸锰0.05 g/L、琼脂15.0 g/L。将超纯水、培养基粉末按比例混匀,120℃灭菌30 min,冷却至50~60℃后在超净工作台配置。

1.2 试验布点

试验时间为2021-08-07—2021-08-30。试验房间尺寸为6 m×3.5 m×2.5 m,配有壁挂式分体式空调,额定制冷量为3500 W。距地高度2.2 m,出风口设置有挡板,开启防直吹模式。

试验于房间四角、中央布置测点A、B、C、D、E(图1(a))。垂直高度上于0.1、0.5、1.1、1.5、2.0 m高度布置温湿度监测仪(HOBO/UX100-011数字式温湿度计)。在儿童(0.5 m)和成人呼吸区高度(1.5 m)处设置托盘,以放置3种培养皿,设置情况见图1。采样点1、3、5、7、9设置高度为1.5 m;采样点2、4、6、8、10设置高度为0.5 m。

1.3 运行模式

试验开始前开启紫外线照射1 h,并用75%酒精消毒。消杀后在房间各测点地面处布置细菌发生源(灰尘)50 g,并在其余各处均匀洒落灰尘50 g,房间中共设置灰尘300 g。设置空调间歇运行与连续运行两种供冷模式,运行参数见表1。

表1 间歇与连续供冷模式设置

Table 1 Intermittent and continuous operating mode settings

供冷模式	开始时间	结束时间	空调运行时间	温度设置	风速设置
模式一(间歇运行)	2021-08-07T20:00	2021-08-14T20:00	20:00—次日08:00	26℃	低风速防直吹
模式二(连续运行)	2021-08-23T20:00	2021-08-30T20:00	20:00—次日20:00		

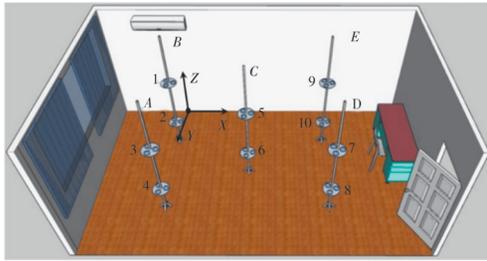
两种空调供冷模式各运行7 d,在第1、3、5、7天晚19:30—20:00放置TSA、BP、MRS琼脂培养皿各30 min,收集空气微生物。实验中进出房间时穿戴防护服、护目镜等防护装置,避免人体散发的微生物对试验产生干扰。

1.4 数据分析

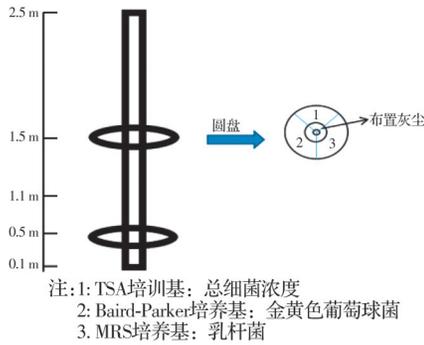
将收集微生物的培养基置于培养箱培养24 h后计数,培养条件见表2。假设单一菌落由单一微生物形成,根据奥氏公式^[29]式(1)计算出室内空气中的可培养细菌浓度(CFU/m³)。

$$C=50\,000\,N/(A\cdot t) \quad (1)$$

式中： C 为单位体积内总微生物浓度， CFU/m^3 ； N 为培养皿上的菌落数； A 为培养皿面积 cm^2 ； t 为暴露时间， min 。



(a) 实验测点分布图



(b) 实验杆垂直方向温湿度测点和培养基布置图

图 1 温湿度测点和培养基布置图

Fig. 1 Temperature and humidity measuring points and medium layout diagram

表 2 3种培养基及培养条件

Table 2 Three media and culture conditions

培养对象	培养基类型	培养条件
总细菌	TSA	温度 $30\text{ }^\circ\text{C}$ ，湿度 50% ； 培养 24 h 。 ^[26]
病原菌(金黄色葡萄球菌)	BP	温度 $30\text{ }^\circ\text{C}$ ，湿度 50% ； 培养 24 h 。 ^[27]
益生菌(乳酸杆菌)	MRS	温度 $37\text{ }^\circ\text{C}$ ，湿度 50% ； 培养 24 h 。 ^[28]

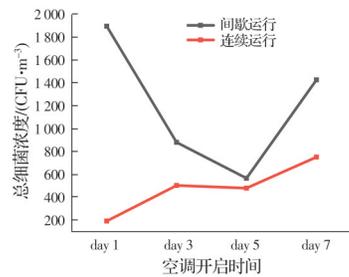
数据处理与绘图使用 Python(3.9)进行，主要使用的库包括 Numpy、Pandas、Scipy 及 Seaborn。

2 试验结果

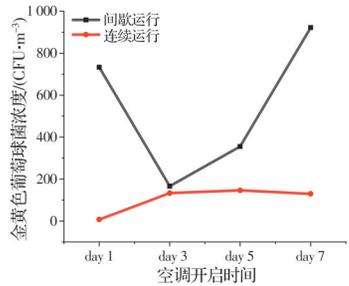
2.1 细菌浓度随时间变化情况

两种空调供冷模式下总细菌、金黄色葡萄球菌、乳酸杆菌浓度随时间的变化情况见图 2。间歇供冷时室内空气总细菌浓度均值为 $1\ 195\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，标准差为 $511\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，随着培养时间的增加，先减后增，波动较大；连续供冷时，均值为 $483\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，

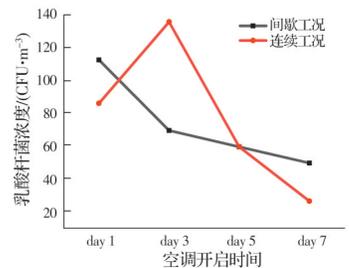
标准差为 $199\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，随着培养时间的增加，浓度变化相对稳定(图 2(a))。间歇供冷时金黄色葡萄球菌浓度均值为 $544\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，标准差为 $299\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，随着培养时间的增加，浓度波动较大；连续供冷时，平均浓度为 $136\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，标准差为 $7\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，随着培养时间的增加，浓度变化相对稳定(图 2(b))。间歇供冷时乳酸杆菌浓度均值为 $73\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，标准差为 $24\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，随着培养时间的增加，均呈下降趋势；连续供冷时浓度均值为 $77\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，标准差为 $40\ \text{CFU}/\text{m}^3$ ，在第 3 天浓度最高，达到 $136\ \text{CFU}/\text{m}^3$ (图 2(c))。



(a) 总细菌浓度随空调开启时间的变化



(b) 金黄色葡萄球菌浓度随空调开启时间的变化



(c) 乳酸杆菌浓度随空调开启时间的变化

图 2 两种空调供冷模式下各细菌浓度随开启时间的变化

Fig. 2 Changes of bacteria concentration in the two air-conditioning cooling modes with the opening time

2.2 细菌浓度随空间变化情况

以空调吹风区最右侧投影到地面的点为原点，建立如图 1(a)所示的坐标系，空调侧向区域为 X 向，空调对吹区为 Y 向，房间垂直方向为 Z 向。

2.2.1 细菌浓度在 X 向的变化 两种空调供冷模式下各细菌在 X 方向上的浓度变化如图 3(a)~(c)所示。间歇供冷时,总细菌浓度随 X 向距离增加不断上升,在 X=0 m 时,浓度为 1 063 CFU/m³;在 X=3.0 m 时,浓度最高,为 1 358 CFU/m³,单位距离(m)增量为 98 CFU/m³;金黄色葡萄球菌浓度也随 X 向距离增加而上升,单位距离增量为 69 CFU/m³;但随着 X 向距离的增加,乳酸杆菌浓度降低,单位距离减少量为 6 CFU/m³。连续供冷时,总细菌浓度在 X 向不同距离处差异性较小,平均值为 485 CFU/m³,标准差为 9 CFU/m³;金黄色葡萄球菌浓度随 X 向距离增加缓慢升高,单位距离增加量为 18 CFU/m³;在 X=0 m 处,乳酸杆菌浓度为 64 CFU/m³,在

X=1.5 m 处浓度为 87 CFU/m³,单位距离变化量约为 15 CFU/m³,但 1.5、3 m 处浓度接近。

2.2.2 细菌浓度在 Y 向的变化 两种空调供冷模式下细菌在 Y 向上的浓度变化如图 3(d)~(f)所示。间歇供冷下,总细菌及金黄色葡萄球菌浓度均随 Y 向距离增加不断降低,单位距离减少量分别为 113、68 CFU/m³,且在 0.6~1.5 m 上的差值高于 1.5~2.4 m 上的差值;乳酸杆菌浓度随距离增加而升高,单位距离增加量为 24 CFU/m³。连续供冷时,总细菌与金黄色葡萄球菌浓度在不同 Y 向距离处差异性较小,平均值分别为 485、135 CFU/m³,单位距离变化量分别约为 5、9 CFU/m³;随 Y 向距离的增加,

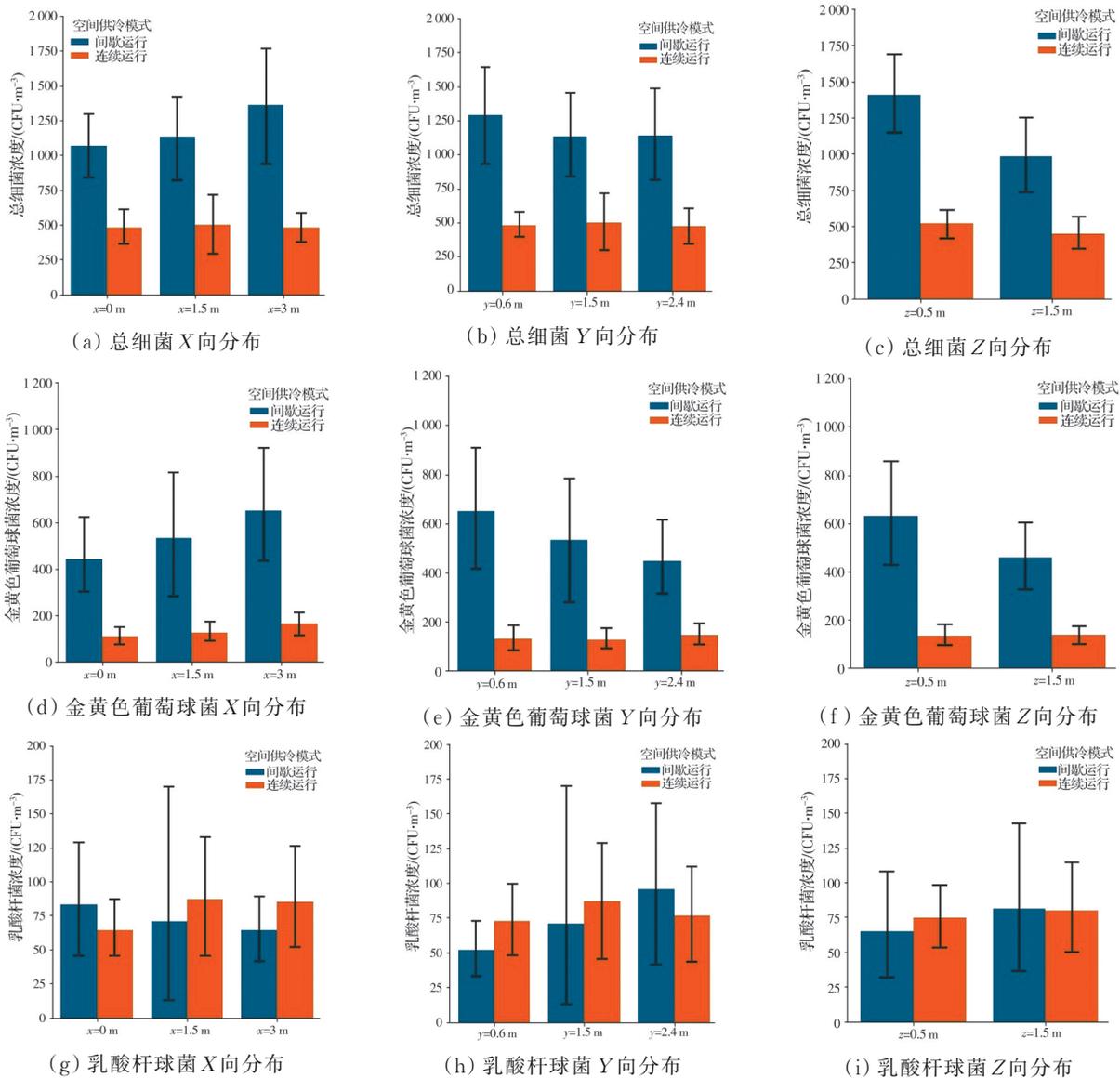


图 3 总细菌、金黄色葡萄球菌、乳酸杆菌浓度在各向上的变化

Fig. 3 Concentrations of total bacteria, *Staphylococcus aureus*, and *Lactobacillus* in all directions

乳酸杆菌浓度先增后减,在 $Y=1.5\text{ m}$ 处达到最大值 87 CFU/m^3 ,在 $Y=0.6\text{ m}$ 浓度最小,为 73 CFU/m^3 。

2.2.3 细菌浓度在Z向的变化 两种空调供冷模式下细菌在Z向上的浓度变化如图3(g)~(i)所示。间歇供冷下,总细菌、金黄色葡萄球菌在成人呼吸区高度($z=1.5\text{ m}$)处浓度,为 $984、459\text{ CFU/m}^3$,在儿童呼吸区高度($z=0.5\text{ m}$)处浓度分别为 $1\ 407、629\text{ CFU/m}^3$,浓度随Z向距离增加而降低,单位距离减少量分别为 $423、170\text{ CFU/m}^3$;乳酸杆菌浓度随Z向距离的增加而升高,成人呼吸区高度的浓度较儿童呼吸区高度增加了 16 CFU/m^3 。连续供冷时,总细菌浓度随Z向距离增加而减少,单位距离减少量 73 CFU/m^3 ,而随着Z向距离的增大,金黄色葡萄球菌、乳酸杆菌浓度略微上升,单位距离增加量为 $2、5\text{ CFU/m}^3$ 。

2.2.4 各采样位置的风速 空调开启后,在各采样位置测量风速。风速测试结果如表3所示。由于靠近空调出风口,位置1风速最高,达到了 0.197 m/s ;由于渗透风影响,位置8和9风速也较高。在房间 1.5 m 高度处平均风速为 0.104 m/s ;而在 0.5 m 高度处平均风速为 0.079 m/s 。

表3 开启空调时各采样位置处风速

Table 3 Wind speed at each sampling position when the air conditioner is turned on

位置	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	位置	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	0.197	6	0.043
2	0.057	7	0.072
3	0.069	8	0.137
4	0.094	9	0.100
5	0.082	10	0.068

2.3 室内温湿度与可培养细菌的关系

2.3.1 温度与细菌浓度的相关性 两种供冷模式下室内温度变化情况见表4。间歇供冷下室内日均温度为 $28\text{ }^\circ\text{C}$,空调未开启时段,室内温度随室外温

表4 两种空调供冷模式下室内温度

Table 4 Indoor temperature under two air-conditioning cooling modes

供冷模式	室内温度/ $^\circ\text{C}$						
	第1天	第2天	第3天	第4天	第5天	第6天	第7天
间歇运行	29.40	28.62	28.10	28.00	27.63	27.13	26.74
连续运行	26.69	26.11	26.16	26.30	25.85	25.27	25.26

度变化波动较大;此时各细菌浓度波动也较大;连续开启空调时室内温度较为稳定,全天维持在 $26\text{ }^\circ\text{C}$,此时各细菌浓度变化也较小(图2),说明温度变化可能影响室内细菌浓度分布。为进一步厘清温度如何影响室内细菌浓度,采用Spearman相关性系数分析总细菌、金黄色葡萄球菌及乳酸杆菌浓度与室内温度的关联(图4(a)~(c))。

总细菌浓度与室内温度显著正相关($R=0.397;p<0.001$)(图4(a))。室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,总细菌浓度为 $1\ 900\text{ CFU/m}^3$;室温 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 时,总细菌浓度为 715 CFU/m^3 ,相比室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时降低了 62% ;室内温度 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 时,总细菌浓度为 459 CFU/m^3 ,相比室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时降低了 76% 。金黄色葡萄球菌浓度与室内温度显著正相关($R=0.445;p<0.001$)(图4(b))。室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,金黄色葡萄球菌浓度为 663 CFU/m^3 ;室温 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 时,浓度为 254 CFU/m^3 ,相比室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时下降了约 62% ;室温为 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 时,浓度为 124 CFU/m^3 ,相比室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时降低了约 81% 。乳酸杆菌与温度的线性关系较弱,室温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,浓度为 86 CFU/m^3 ;室温在 $28、26\text{ }^\circ\text{C}$ 时,浓度分别为 $101、89\text{ CFU/m}^3$ (图4(c)),变化不大。

2.3.2 相对湿度与细菌浓度的相关性 两种供冷模式下室内相对湿度变化情况见表5。间歇运行时室内相对湿度为 65% ;连续运行时室内相对湿度为 69% ,两种模式下相对湿度变化规律一致。

表5 两种空调供冷模式下室内相对湿度

Table 5 Relative humidity under two air-conditioning cooling modes

供冷模式	相对湿度/ $\%$						
	第1天	第2天	第3天	第4天	第5天	第6天	第7天
间歇运行	57.23	61.46	64.16	66.21	65.72	68.11	69.81
连续运行	59.30	67.02	67.83	68.41	70.51	73.03	75.60

总细菌、金黄色葡萄球菌及乳酸杆菌浓度与室内相对湿度的关系如图4(d)~(f)所示。室内相对湿度为 $50\%\sim 80\%$ 时,总细菌与金黄色葡萄球菌与相对湿度均未呈现明显的相关性($p>0.05$),乳酸杆菌浓度与相对湿度呈负相关($p<0.05$)。在 $50\%\sim 80\%$ 的相对湿度范围内,总细菌浓度变化不明显,均值为 851 CFU/m^3 ;在 $60\%\sim 70\%$ 的相对湿度范围内,金黄色葡萄球菌浓度较高,达到 308

CFU/m³;在60%~70%的相对湿度范围内,乳酸杆菌浓度也较高,达到80 CFU/m³。

综上,在60%~70%的相对湿度范围内,总细菌、金黄色葡萄球菌和乳酸杆菌浓度较高,但相比于温度,室内相对湿度与细菌浓度的关系不明显。

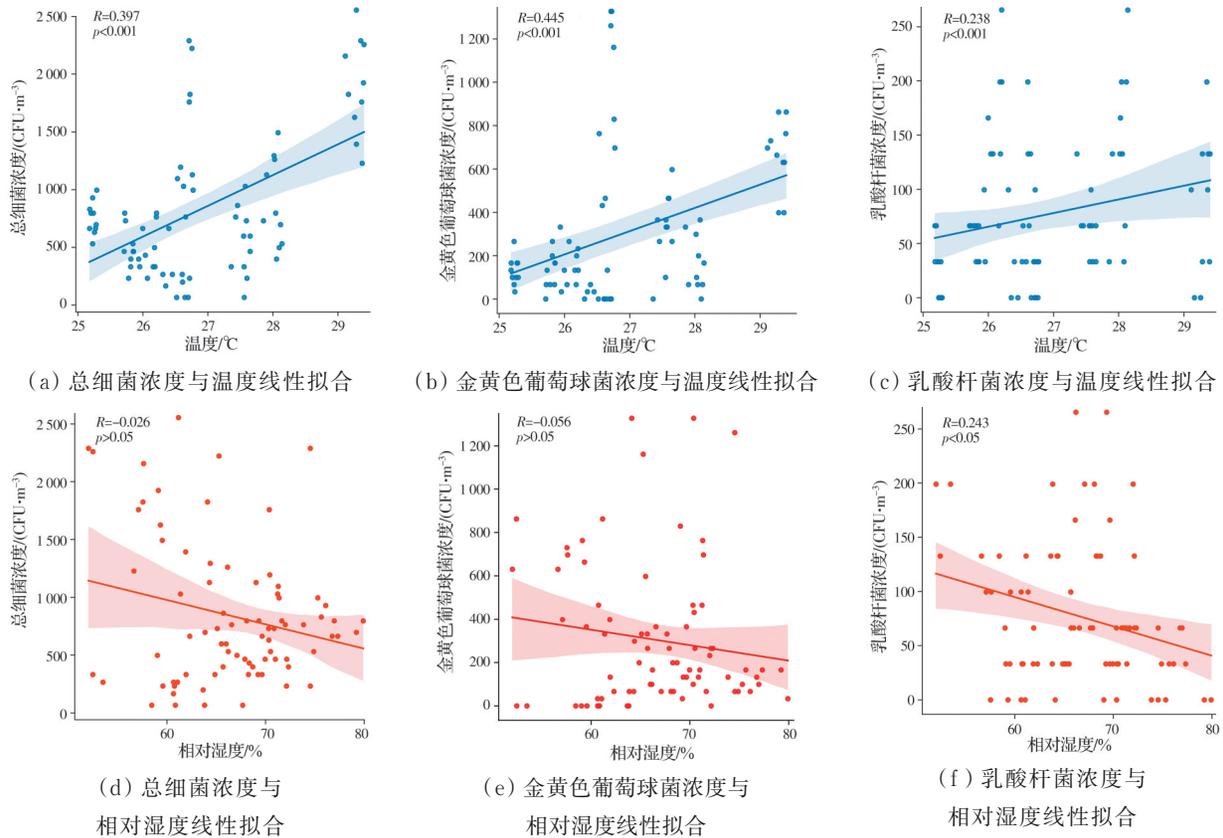


图4 总细菌、金黄色葡萄球菌、乳酸杆菌浓度与温湿度相关性

Fig. 4 The correlation between the concentration of total bacteria, *Staphylococcus aureus*, and *Lactobacillus* and temperature

3 讨论

3.1 两种空调供冷模式下细菌浓度的时间差异

从时间维度看,连续供冷模式与间歇供冷模式室内温湿度场存在差异,细菌浓度分布也存在明显差异。香港室内空气质量标准规定^[30]:空气质量十分良好时,空气中细菌浓度应小于500 CFU/m³;室内空气质量能保证大众健康时,空气中细菌浓度应小于1 000 CFU/m³。间歇运行模式下总细菌浓度及金黄色葡萄球菌浓度均值显著高于连续运行模式,且总细菌浓度超出1 000 CFU/m³的限值,可能引发细菌感染风险。间歇供冷时总细菌、金黄色葡萄球菌、乳酸杆菌浓度随时间变化波动较大;连续供冷时细菌群落整体波动较小。而乳酸杆菌浓度在两种供冷模式下较为相近。

连续和间歇供冷模式下室内细菌分布差异可

由室内温度解释^[31]。间歇供冷模式下,空调未开启时室内均温在30℃左右,开启空调时室内均温能降低至25~26℃^[10,20]。这表明在室温25~30℃的范围内,随着室内温度的升高,总细菌与金黄色葡萄球菌浓度明显上升。开启空调12 h可使室内总细菌浓度降低36%,金黄色葡萄球菌浓度降低26%。若延长空调运行时间,使室内温度总是低于相关细菌的适宜生长温度,可使室内细菌浓度进一步降低,连续运行24 h时,总细菌浓度降低75%,金黄色葡萄球菌浓度降低86%。间歇供冷时,在非供冷时段室内温度随室外环境变化,平均温度为30℃,供冷时段室内温度为26℃,该温度变化区间与总细菌及金黄色葡萄球菌的适宜生长温度(30℃)^[26-27]接近。空调供冷与非供冷时段的室内温度差异导致总细菌与金黄色葡萄球菌的浓度波动明显;而室内温度低于乳酸杆菌的适宜温度(37℃)^[28],导致乳酸杆菌

的浓度呈明显下降趋势。连续供冷时,室内温度基本维持在26℃,总细菌与金黄色葡萄球菌的浓度较为稳定,乳酸杆菌浓度也呈下降趋势。试验中夏季开启空调对室内相对湿度的调控作用有限,延长空调运行时间并不能对室内相对湿度进行有效的调控。试验中室内相对湿度在50%~80%之间,间歇与连续空调模式下相对湿度均值仅相差4%,尚不足以对室内细菌的生长情况产生明显影响^[32]。

因此,开启空调引起的温度变化对细菌生长有显著影响,且随着空调运行时间的增加,室内可培养细菌浓度能得到有效降低。而空调开启引起的相对湿度变化较小,尚不足以对室内可培养细菌的生长产生影响。基于此,建议在室内温度较高(30℃)时,开启空调并延长其开启时间,降低室内细菌浓度。但延长供冷时间势必引起能耗的增加,因此,可在间歇供冷时通过臭氧发生器、紫外照射等适宜的灭菌措施减弱室内细菌感染风险。

3.2 两种空调供冷模式下细菌浓度的空间差异

从空间维度看,间歇运行时,细菌浓度在房间各方向均有较明显的变化,在Z向上浓度变化最明显。连续运行时,细菌浓度在各方向上较为稳定,随位置变化不明显。

细菌主要附着在空气中的颗粒物上,随颗粒物转移而变化^[33-34]、由于颗粒物的沉降作用,室内细菌浓度在Z向上存在明显的差异。室内空气流速可以影响颗粒物的沉降,当空气流速较大时,本应沉降在低处的细菌会随气流悬浮在空气中^[35]。连续供冷模式时空调持续开启,室内流场发生改变,人员呼吸区高度处平均风速达0.104 m/s,较高的气流速度使颗粒物沉降作用减弱,不同高度处浓度差较小,随Z轴方向变化不明显。对于间歇运行模式,空调停机时间内,沉降作用占据主导地位,空气中的细菌随颗粒物沉降而积累在下部区域,致使儿童呼吸区高度($z=0.5$ m)总细菌和金黄色葡萄球菌浓度显著高于成人呼吸区高度($z=1.5$ m),感染风险更大。

对于间歇供冷模式,由于沉降作用,儿童呼吸区细菌暴露风险高于成人呼吸区,而在连续供冷模式下,不仅整体的细菌浓度较低,且由于空调开启改变了室内流场,使细菌分布在不同高度趋于一致。因此,建议在有儿童居住的室内,开启空调时,可以设置适合的空调风速改善室内气流组织,避免细菌沉降于儿童呼吸区,以防儿童吸入或接触,引发健康风险。

4 结论

试验研究了两种典型夏季空调供冷模式对室内可培养细菌浓度及分布的影响。

1)与连续运行相比,空调间歇运行时,室内平均温度更高,可培养的总细菌、病原菌浓度较高,且浓度随时间的波动较大。而益生菌在两种空调运行模式下浓度相近。

2)与连续运行相比,空调间歇运行时,细菌在室内空气中分布较不均匀,在纵向分布上存在显著差异,总细菌和病原菌在儿童呼吸区高度浓度高于成人呼吸区高度,健康风险更大。

3)夏季空调供冷时,在考虑空调能耗的基础上,适当延长开启时间,降低室内空气中可培养细菌浓度。建议在间歇供冷时采取灭菌措施以减少细菌感染风险,营造健康的室内环境。

参考文献

- [1] 室内空气质量标准: GB/T 18883—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Indoor air quality standard: GB/T 18883-2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003. (in Chinese)
- [2] DOUWES J, THORNE P, PEARCE N, et al. Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47(3): 187-200.
- [3] MENTESE S, TASDIBI D. Airborne bacteria levels in indoor urban environments: the influence of season and prevalence of sick building syndrome (SBS) [J]. *Indoor and Built Environment*, 2016, 25(3): 563-580.
- [4] BJÖRNSSON E, NORBÄCK D, JANSON C, et al. Asthmatic symptoms and indoor levels of microorganisms and house dust mites [J]. *Clinical and Experimental Allergy*, 1995, 25(5): 423-431.
- [5] SAAB S. Infectiousness of air from a tuberculosis ward: Ultraviolet irradiation of infected air: Comparative infectiousness of different patients: Riley RL, MillsCC, O'GradyF, SultanLU, WittstadtF, ShivpuriDN. *Am Rev Respir Dis* 1962;85: 511-25 [J]. *American Journal of Infection Control*, 1997, 25(1): 65-66.
- [6] FRASER D W. Legionellosis: evidence of airborne transmission [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1980, 353: 61-66.
- [7] SRIKANTH P, SUDHARSANAM S, STEINBERG R. Bio-aerosols in indoor environment: Composition, health effects and analysis [J]. *Indian Journal of Medical Microbiology*, 2008, 26(4): 302-312.

- [8] DOUWES J, PEARCE N, HEEDERIK D. Does environmental endotoxin exposure prevent asthma [J]. *Thorax*, 2002, 57(1): 86-90.
- [9] MAXWELL F J, DUNCAN S H, HOLD G, et al. Isolation, growth on prebiotics and probiotic potential of novel bifidobacteria from pigs [J]. *Anaerobe*, 2004, 10(1): 33-39.
- [10] 谭晶月. 基于大数据的重庆地区住宅建筑房间空调器使用特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
TAN J Y. Research on the use characteristics of room air conditioners in residential buildings in Chongqing based on big data [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [11] ZHENG H, WU H W. Gene-centric association analysis for the correlation between the guanine-cytosine content levels and temperature range conditions of prokaryotic species [J]. *BMC Bioinformatics*, 2010, 11(Sup11): S7.
- [12] MUI K W, WONG L T, HUI P S. Risks of unsatisfactory airborne bacteria level in air-conditioned offices of subtropical climates [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(4): 475-479.
- [13] 张运. 不同温湿度条件下滤料微生物繁殖的数值研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
ZHANG Y. Numerical study on microorganism growth on glass fiber filter media under different temperature and relative humidity conditions [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [14] 王宁, 魏传超, 吉曹源, 等. 健康空调来自对微生物的关注: 探析室内温湿度对微生物繁殖状态的影响规律及在家用空调设计中的应用[J]. *洁净与空调技术*, 2020(1): 107-111.
WANG N, WEI C C, JI C Y, et al. Healthy air conditioning comes from concerns about microorganisms: analysis of the influence of indoor temperature and humidity on microbial reproduction and its application in the design of household air conditioning [J]. *Contamination Control & Air-Conditioning Technology*, 2020(1): 107-111. (in Chinese)
- [15] ZHU H, PHELAN P, DUAN T H, et al. Characterizations and relationships between outdoor and indoor bioaerosols in an office building [J]. *China Particology*, 2003, 1(3): 119-123.
- [16] 诸葛阳. 典型建筑室内微生物污染现状及影响因素分析[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHUGE Y. Study on the airborne microbial pollution and influencing factors in residences and public buildings [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [17] 丁力行, 查潇, 邓开野, 等. 某空调系统室内空气微生物湿处理特性及失活动力学模型[J]. *制冷与空调*, 2015, 15(10): 90-94, 99.
DING L X, ZHA X, DENG K Y, et al. Wet-processing characteristics and inactivation dynamics model of indoor air microorganisms under air-conditioning system [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2015, 15(10): 90-94, 99. (in Chinese)
- [18] KARBOWSKA-BERENT J, GÓRNY R L, STRZELCZYK A B, et al. Airborne and dust borne microorganisms in selected polish libraries and archives [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(10): 1872-1879.
- [19] 蒋婷婷. 重庆地区夏季住户空调器使用行为模式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
JIANG T T. Study on the usage mode of air conditioners in residential building in summer in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [20] DING Y, XU L, LI B Z, et al. Experimental study on thermal performance of externally insulated walls of intermittent air-conditioned rooms in summer in hot summer and cold winter region, China [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 2014: 809595.
- [21] 利一锋. 广州某高校夏季夜间空调宿舍热舒适及空气质量研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
LI Y F. Study on nighttime thermal comfort and indoor air quality of university air-conditioned dormitories in Guangzhou in summer [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [22] HUSSIN N H M, SANN L M, SHAMSUDIN M N, et al. Characterization of bacteria and fungi bioaerosol in the indoor air of selected primary schools in Malaysia [J]. *Indoor and Built Environment*, 2011, 20(6): 607-617.
- [23] 医药工业洁净室(区)沉降菌的测试方法: GB/T 16294—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Test method for settling microbe in clean room(zone) of the pharmaceutical industry: GB/T 16294-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [24] 姚振江. 公共场所葡萄球菌环境污染状况研究进展[J]. *中国公共卫生*, 2016, 32(2): 129-132.
YAO Z J. Research progress in environmental contamination of *Staphylococci* in public places [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2016, 32(2): 129-132. (in Chinese)
- [25] ROSENSTIEL P, STANGE E F. Probiotics and intestinal diseases [J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2010, 57(1): 27-28.
- [26] HSU Y C, KUNG P Y, WU T N, et al. Characterization of indoor-air bioaerosols in southern Taiwan [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12

- (4): 651-661.
- [27] BAIRD-PARKER A C. An improved diagnostic and selective medium for isolating coagulase positive staphylococci [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1962, 25(1): 12-19.
- [28] 谭周进, 肖克宇, 肖启明, 等. 乳酸菌计数培养基和培养方法的筛选[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 27(5): 398-400.
- TAN Z J, XIAO K Y, XIAO Q M, et al. Screening of mediums and culture methods for enumerating lactic acid bacteria [J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2001, 27(5): 398-400. (in Chinese)
- [29] LIPSA F, ULEA E, CHIRIAC I P. Monitoring of fungal aerosols in some educational buildings from Iai, Romania [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, 15(4):801-807.
- [30] 香港特别行政区政府室内空气质素管理小组. 办公室及公众场所室内空气质素管理指引[M]. 香港: 环保署, 2019.
- [31] 严汉彬, 丁力行. 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, DING L X. Analysis of conditions of temperature and humidity to control microbial contaminant in air-conditioning system [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2011, 11(2): 14-17. (in Chinese)
- [32] MADUREIRA J, PACIÊNCIA I, RUFO J C, et al. Assessment and determinants of airborne bacterial and fungal concentrations in different indoor environments: Homes, child day-care centres, primary schools and elderly care centres [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109: 139-146.
- [33] XIAO Y, LV Y, ZHOU Y W, et al. Size-resolved surface deposition and coagulation of indoor particles [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2020, 30(3): 251-267.
- [34] THATCHER T L, LAI A C K, MORENO-JACKSON R, et al. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(11): 1811-1819.
- [35] NAZAROFF W W. Indoor bioaerosol dynamics [J]. *Indoor Air*, 2016, 26(1): 61-78.

(编辑 胡玲)