

博物馆恒温恒湿展厅空气细菌检测 及人员暴露量分析

李慧星, 禹 蒙, 许 昂

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 检测博物馆展厅内的细菌浓度, 确定影响细菌滋生的主要因素并预测参观人员的暴露量. 避免博物馆参观人员受空气中细菌污染. 方法 通过采集、培养和计数对两间恒温恒湿博物馆展厅内的空气进行细菌检测, 运用 Crystal Ball 软件对两个展厅中参观人员暴露于细菌中的暴露量进行蒙特卡罗模拟预测. 结果 展厅 A、展厅 B 空气中细菌的平均浓度分别为 558.52 cfu/m^3 和 567.7 cfu/m^3 ; 蒙特卡洛模拟得出在相同的参观时间内, 青、中年男性平均暴露量为 345.22 cfu , 青、中年女性平均暴露量为 260.44 cfu , 未成年人平均暴露量为 225.24 cfu , 呈现依次递减状态. 两间恒温恒湿博物馆展厅空气中细菌菌落数符合《室内空气质量标准》(GB/T18883—2002) 要求. 结论 适宜的温度和湿度有助于细菌的滋生繁殖, 湿度对细菌的浓度影响更大; 人员暴露量与呼吸速率强度之间呈现典型的正相关性, 通过计算人员暴露量可以有效评估博物馆室内空气品质.

关键词 博物馆; 细菌污染; 暴露量; 蒙特卡洛模拟

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Air Bacterial Detection and Personnel Exposure Analysis in the with Constant Temperature and Humidity Museum Exhibition Hall

LI Huixing, YU Meng, XU Ang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to prevent museum visitors from being polluted by bacteria in the air and identify the main factors affecting bacterial growth, the concentration of bacteria in the museum exhibition hall is tested and the exposure of visitors is predicted. The bacteria in the air in the two exhibition halls with constant temperature and humidity were collected, cultured and counted. Monte Carlo simulation was used to predict the exposure of the visitors to the bacteria in the two exhibition halls by crystal Ball software. The test results show that the average concentration of bacteria

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378318); 辽宁省自然科学基金项目(2016010639)

作者简介: 李慧星(1964—), 女, 教授, 主要从事建筑室内环境空气质量保障技术方面研究.

in the air in the two exhibition halls A and B is 558.52 cfu/m³ and 567.7 cfu/m³ respectively; Monte Carlo simulation shows that during the same visit time the average exposure of male is 345.22 cfu, female was 260.44 cfu, and the minors was 225.24 cfu, showing a decreasing state. The number of bacterial colonies in the air in the two exhibition halls with constant temperature and humidity meets the requirements of the Indoor Air Quality Standard (GB/T18883 - 2002). This indicates that the appropriate temperature and humidity contribute to the growth of bacteria, and the humidity has a greater impact on the concentration of bacteria. There are positive correlation between personnel exposure and respiratory rate intensity and the calculation of personnel exposure can effectively evaluate the indoor air quality of the museum.

Key words: museum; microbial pollute; exposure amount; Monte Carlo simulation

博物馆作为文化传承的圣殿,秉承着收藏、教育及科研等功能,每天都有大批量人群参观^[1]. 由于展厅内部环境相对密闭^[2],温湿度比较稳定,空气流动性较差,舒适的环境加重了微生物滋生并造成展厅内空气的污染. 展厅内空气中微生物大量滋生不仅对文物展品有潜在的腐蚀作用,更有可能造成参观人员诱发咳嗽、气虚、呼吸道感染甚至中毒等不良建筑综合征(Sick Building Syndrome, SBS)^[3]. 微生物主要包括细菌、真菌及病毒等^[4-5],吸附在细颗粒物上的微生物随气流流动^[6-8]. 而细菌作为自然界中分布最广且与人类关系最为密切的微生物,能在温暖、潮湿和富含有机物质处大量繁殖. 笔者针对博物馆内两间恒温恒湿展厅进行空气细菌检测,并根据检测结果进行参观人员暴露量及吸入量预测,评估博物馆展厅内的空气质量.

1 建筑系统信息

1.1 建筑物概况

某省新建博物馆,2014 年对外开放,占地面积约 83 200 m²,建筑总面积 100 013 m². 博物馆包括陈列展览区、观众服务区、综合业务区和一层的文物展示区 4 个基本功能区.

1.2 空调系统

笔者选取一层文物展示区的“毛泽东诗词”和侯北人捐赠书画等,两间对温湿度敏感的展品所在的展厅进行测试,将两间展厅

分别命名为展厅 A 与展厅 B. 因为文物保存对展厅温湿度有严格的要求,因此展厅恒温恒湿空调机组保持 24 h/d 运行. 空调机组为卧式空气处理机组,机组的构成包括新风段、送风段、回风段、中效过滤段、表冷段几个部分.

2 温湿度对文物保存的影响

2.1 温度的影响

在文物的保存和展览中,环境温度是影响文物保存的因素之一^[9],适宜的温度能够加快文物表面或内部的腐蚀、降解等化学反应的速度,对文物材料性能造成影响,损害文物. 由阿伦尼乌斯(Arrhenius)法则可知温度与化学反应速度的关系^[10]:

$$\lg \frac{R_1}{R_2} = 52E \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right). \tag{1}$$

式中: T_1 、 T_2 为反应温度, K; R_1 、 R_2 分别为 T_1 、 T_2 温度对应的反应速度常数; E 为反应活化能, kJ/mol.

2.2 湿度的影响

湿度对文物的物理破坏主要表现为“湿胀干缩”^[9,11-12]. 即当相对湿度较高时,吸湿性很强的有机材料所组成的文物就会吸收外界水分而发生体积膨胀,纸质文物就会发生卷边等一系列形变;当相对湿度较低时,它们就会脱水导致其纤维结构遭到破坏而发生收缩、爆裂和翘曲. D. Erhardt^[13] 等研究发现:当湿度在 35% 以上时,分解反应在纤维素的

化学破坏中占统治地位;反之则主要发生交联反应(cross-linking reaction).此外,潮湿空气能使纸张和彩画的颜色发生褪色或变色.

合适的温度还能促进微生物的繁殖,通常在 20~35℃,每升高 10℃,霉菌的生长速度加快 1~2 倍^[12].许多珍贵的文物因为受到虫蛀、霉变等生物腐蚀而失去价值.同时湿度也是细菌的必要生存条件之一,湿度的轻微波动会引起水活度的显著变化,从而明显影响微生物的生长.鉴于以上原因,需要对温湿度敏感的展品(书画)所在的展厅进行严格的温湿度控制,因此该类展厅选择恒温恒湿空调机组并且 24 h/d 运行.

3 展厅空气细菌污染检测

3.1 测试设备

测试采用 FA-1 型 6 级撞击式空气微生物采样器进行空气中的微生物采样^[14-15].此外相关实验设备还包括高压蒸汽灭菌锅、生化恒温培养箱、光化学显微镜等.

3.2 测点选取

测试选择博物馆一层的两间恒温恒湿展厅,展厅 A 与展厅 B.测点的布置原则一般可选择在对角线上或梅花式均匀分布.由于测试所选取的展厅形状均为规整化的矩形,所以测点布置采用对角线布置.在 A 展厅内对角线方向设置 5 个测点;采用同样的方法在展厅 B 中对角线方向设置 4 个测点,测点在展厅中的位置如图 1 所示.

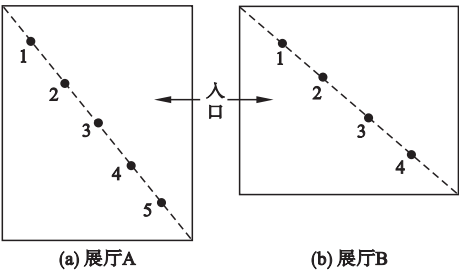


图 1 测点布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring points

3.3 细菌采样与培养

在微生物采样方法中,一般选用自然沉降法和撞击法.细菌采样测试选用撞击法来检测博物馆恒温恒湿展厅空气中细菌的菌落数.测试前在无菌的条件下加入约 25 mL 已灭菌的细菌培养基,在操作的时候为了减少实验带来的误差,应尽可能保持培养皿中培养基的厚度一致;细菌培养基采用牛肉膏蛋白胨培养基及 Φ90 培养皿^[16].采样空气流量为 28.3 L/min^[17],采样时间为 10 min,采样结束后放入 37℃ 恒温培养箱中培养 48 h,计数计算出细菌含量,每个展厅重复测试 3 次.

3.4 细菌浓度检测结果与分析

细菌的计数采用菌落数计算,一个细菌菌落是由无数细菌组成的具有一定形态特征的细菌集团.对采样样本计数得出两间展厅中细菌粒子的浓度,细菌浓度计算式为

细菌浓度 = $n \times 1\,000 \times (q \times t)^{-1}$. (2)

式中: n 为培养皿中的菌落数; t 为采样时间,取 10 min; q 为采样器空气流量,取 28.3 L/min.

对培养基中细菌培养计数可得展厅 A、展厅 B 采样空气中细菌菌落数(见图 2、图 3).

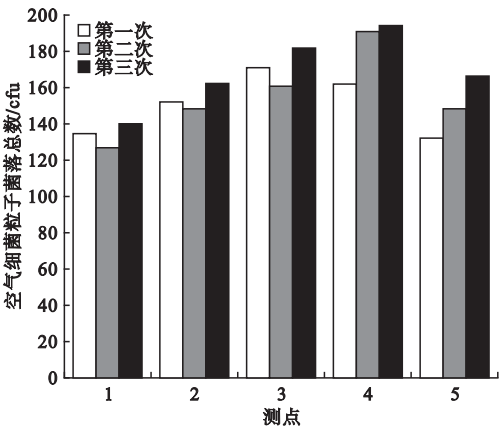


图 2 展厅 A 测点细菌菌落数

Fig. 2 Number of bacterial colonies in exhibition hall A

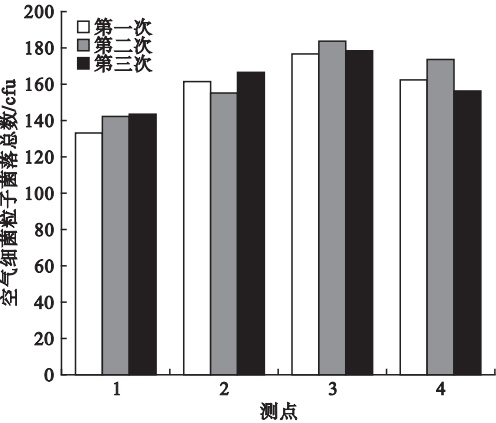


图3 展厅B测点细菌菌落数

Fig. 3 Number of bacterial colonies in exhibition B

根据细菌浓度计算式得展厅A与展厅B的细菌浓度(见表1).

表1 展厅内各测点细菌浓度

Table 1 The concentration of bacteria in each point

展厅	采样次序	各测点细菌浓度/(cfu·m ⁻³)				
		测点1	测点2	测点3	测点4	测点5
A	1	477.0	537.1	604.2	572.4	466.4
	2	448.8	522.9	568.9	674.9	522.9
	3	494.7	572.4	643.1	685.5	586.6
B	1	469.9	568.9	621.9	572.4	—
	2	501.8	547.7	646.6	611.3	—
	3	505.3	586.6	628.9	551.2	—

由表1的测试结果可以看出展厅A与展厅B中间测点的细菌浓度值相对偏高.原因是中间测点位置属于展品摆放区,展厅内部人员的无规律走动扰乱了气流流动,同时展厅A中第3次测试的结果相对于前两次细菌浓度检测结果数值较大,这是因为第3次检测时展厅内人流量较大,因此细菌浓度的检测结果偏大^[18].展厅A空气中细菌总平均浓度为558.52 cfu/m³ 低于展厅B空气中细菌总平均浓度567.7 cfu/m³.原因是对于细菌繁殖而言,湿度影响因素大于温度影响因素^[19].展厅B由于展品的保存对相对湿度的要求高于展厅A的相对湿度,更适宜细菌滋生.

通过FA-1型6级撞击式空气微生物

采样器进行空气中的微生物采样测得两个展厅内空气中的细菌分布(见图4).由撞击式采样器的采样结果可以看出两个展厅空气中细菌的分布情况,展厅A内细菌分布从第1级到第6级呈现依次递减状态;展厅B中细菌分布整体呈现递减趋势,其中第3级和第4级的细菌分布数量相当.

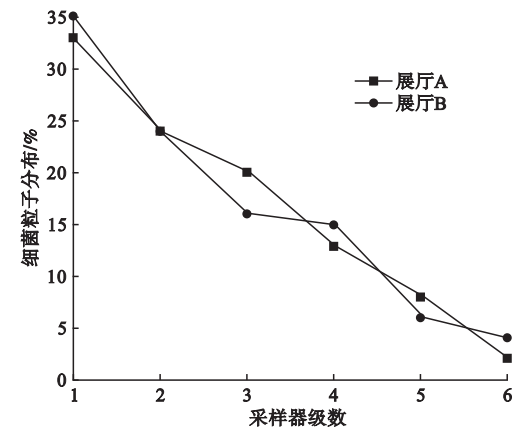


图4 展厅内空气细菌分布

Fig. 4 The distribution of airborne bacteria in the exhibition hall

4 人员暴露量分析

人员在空气污染物中的暴露量分为潜在暴露量、可应用暴露量以及内部暴露量3种.其中潜在的暴露量是人员在一定时间段内吸入的污染物含量,可以理解为可能被人员吸入的污染物剂量;可应用暴露量是指在人员体内,能被人员呼吸系统吸入的污染物含量;而通过物理及生物过程进入人员体内的污染物剂量称为内部暴露量.潜在暴露量的数值最大,可应用暴露量其次,内部暴露量数值最小.在实际的暴露量计算时,普遍采用的是潜在暴露量,潜在暴露量的计算式为^[20-21]

$$D_{\text{pot}} = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot R(t) \cdot dt.$$
 (3)

式中: D_{pot} 为潜在暴露量; $C(t)$ 为污染物质量浓度,kg/m³; $R(t)$ 为人员的呼吸速率,m³/s; dt 为时间增量.

单位时间内人员的呼吸速率与人体中能

量代谢的强度息息相关,应使用人体的能量代谢估算法进行计算. 人体能量代谢估算是根据不同类别的人群每天或者单位时间内能量及氧气的消耗来确定人员的呼吸速率,计算式为^[21]

$$R = E_p \times H \times V_Q.$$

(4)

表2 人体呼吸速率

Table 2 Human respiratory rate

人员属性	年龄/岁	人员呼吸速率/(m ³ ·h ⁻¹)			
		睡眠	轻度活动	中度活动	重度活动
青年男性	18~35	0.48	0.61	1.62	2.42
中年男性	36~60	0.47	0.59	1.58	2.37
青年女性	18~35	0.37	0.46	1.23	1.84
中年女性	36~60	0.38	0.47	1.26	1.88
未成年	1~17	0.30	0.40	1.20	1.90

博物馆人员流量大,年龄覆盖面广,平均参观时长约为2 h,参观属于轻度活动. 笔者研究采用 Crystal Ball 分别对18~35岁的青年男性和女性、36~60岁的中年男性和女性以及1~17岁的未成年人进行暴露量计算.

运用 Crystal Ball 软件对不同人群分别进行10 000次的模拟计算,得到展厅A、展厅B中不同参观人员的暴露量概率分布(见图5、图6).

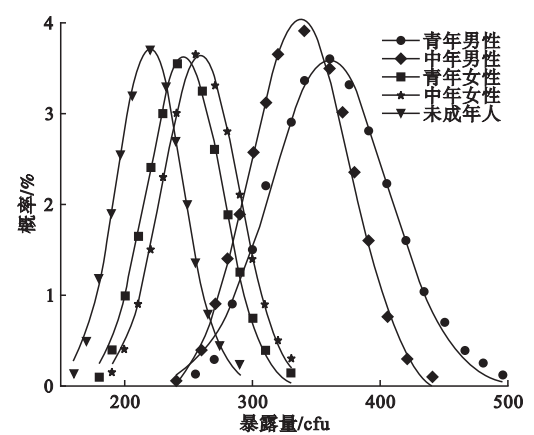


图5 展厅A中人员暴露量分布

Fig. 5 Distribution of personnel exposure in exhibition A

从模拟结果可以看出,展厅A中人员的暴露量均符合对数正太分布. 以暴露量的对

式中: E_p 为人员的日消耗量或在单位时间内不同活动强度下能量的消耗量,kJ/d; H 为每消耗单位能量时消耗的氧气量,取0.05 L/kJ; V_Q 为空气当量,取27.

表2 为不同活动强度下的不同人群的呼吸速率值.

数均值和对数标准差来表示暴露量的概率分布. 青年男性的平均暴露量为362.72 cfu,暴露量服从对数正态分布(362.72,48.57²),整体暴露量集中在300~420 cfu;中年男性平均暴露量为334.88 cfu,暴露量概率分布表示为(334.88,37.10²),暴露量集中在280~380 cfu;青年女性的平均暴露量为250.95 cfu,暴露量概率分布表示为(250.95,29.93²),暴露量集中在200~290 cfu;中年女性的暴露量集中在220~300 cfu,平均暴露量为262.63,暴露量概率分布表示为(262.63,30.49²),女性暴露量小于男性;未成年人的平均暴露量为223.39 cfu,暴露量概率分布表示为(223.39,27.06²),暴露量集中在190~260 cfu.

图6 为展厅B中参观人员的暴露量概率分布模拟结果同样服从对数正态分布,中年男性平均暴露量为346.03 cfu,暴露量概率分布表示为(346.03,38.15²),整体暴露量集中在290~390 cfu;中年男性平均暴露量为337.25 cfu,暴露量概率分布表示为(337.25,38.61²),暴露量集中在280~390 cfu;青年女性的平均暴露量为261.16 cfu,暴露量概率分布表示为(261.16,31.71²),整体暴露量集中在220~300 cfu;中年女性的平均暴露量为

267.02 cfu,暴露量概率分布表示为(267.02, 31.36²),暴露量集中在230~310 cfu;未成年人平均暴露量为227.08 cfu,暴露量概率分布表示为(227.08,28.15²),暴露量集中在190~260 cfu.

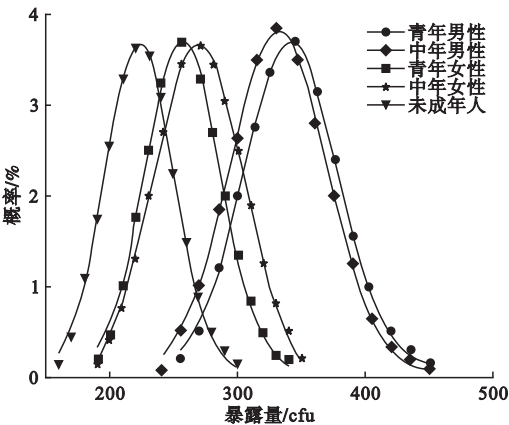


图6 展厅B中人员暴露量分布

Fig. 6 Distribution of personnel exposure in hall B

由于细菌的粒径不同导致被人体吸入后所沉积的位置不同,根据FA-1撞击式6级空气微生物采样器中6个等级的粒径划分等级及颗粒物吸入的半经验模型得出,粒径大于5 μm则不会进入人体内部,5~4.7 μm的粒子集中沉积在咽喉,2.1~4.7 μm的粒子沉积在支气管部位的量占据10%,0.65~2.1 μm的粒子进入人体肺泡中的量占有50%.细菌吸附于颗粒物上,随颗粒物进入人体内部,将沉积比例乘以人员在细菌中的暴露量即得出人员吸入细菌的沉积量(见表3).

表3 人员吸入细菌沉积量

Table 3 Bacterial deposit amount of human

人员属性	细菌沉积量/ cfu	
	支气管部位	肺泡部位
青年男性	35.55	177.76
中年男性	33.69	168.48
青年女性	25.66	128.30
中年女性	26.44	132.20
未成年人	22.50	112.50

通过计算细菌在人体内不同部位的沉积量可知,博物馆展厅内空气中的细菌主要伴

随着人员的呼吸作用进入人体内且主要沉积于人体肺泡中,作用于不同人员体内的沉积量与人员暴露量呈现正相关性.

5 结 论

(1)博物馆恒温恒湿展厅A与展厅B内空气中细菌浓度分别为558.52 cfu/m³与567.7 cfu/m³,展厅A的细菌浓度低于展厅B的细菌浓度是由于展厅B的相对湿度高于展厅A,相对湿度对细菌滋生的影响因素更大.

(2)根据模拟计算分别得展厅A与展厅B内的细菌暴露量,由于人体活动时呼吸速率不同,导致青、中年男性、青、中年女性、未成年人在细菌污染环境中的平均暴露量依次降低,说明人员暴露量与呼吸速率强度之间呈现典型的正相关性.

(3)根据测试所得到的展厅A与展厅B空气中的细菌浓度结合人员的暴露量与沉积概率计算出细菌在人员支气管与肺泡中的沉积量,并将博物馆空气中细菌菌落数与《室内空气质量标准》(GB/T18883—2002)所规定的标准值2500 cfu/m³相比较,该新建博物馆的两间恒温恒湿展厅空气品质良好,符合国家标准要求.

参考文献

[1] 唐欢,周理坤,王春,等.博物馆展厅人流高峰期空气微生物丰度及多样性调查[J]. 环境与健康杂志,2016,33(8):707-711.
(TANG Huan, ZHOU Likun, WANG Chun, et al. Richness and diversity of air microorganisms during peak period of visitors flow in museum exhibition hall [J]. Journal of environment and health, 2016, 33(8): 707-711.)

[2] 陈远生,解玉林.博物馆文物保存环境质量标准研究[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(增刊1):152-191.
(CHEN Yuansheng, XIE Yulin. Study on the quality standards of museum cultural relics preservation [J]. Sciences of conservation and archaeology, 2002, 14(S1): 152-191.)

[3] WYON D P. The Effects of indoor air quality on performance and productivity [J]. Indoor air, 2004, 14(S7): 92-101.

[4] 陈锴,万东,褚可成,等.空气微生物污染的监

- 测及研究进展[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4): 171-178.
(CHEN E, WAN Dong, CHU Kecheng, et al. Monitoring and research progress of airborne microbial contamination [J]. Environmental monitoring in China, 2014, 30(4): 171-178.)
- [5] SAUTOUR M, SIXT N, DALLE F, et al. Profiles and seasonal distribution of airborne fungi in indoor and outdoor environments at a French hospital[J]. Science of the total environment, 2009, 407(12): 3766-3711.
- [6] 王延路, 付红蕾, 李彦鹏, 等. 气流组织形式对室内微生物气溶胶的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3084-3090.
(WANG Yanlu, FU Honglei, LI Yanpeng, et al. Influence of airflow pattern on indoor microbial aerosols[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2016, 10(6): 3084-3090.)
- [7] PASTUSZKA J S, PAW U K T, LIS D O, et al. Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in upper silesia, poland[J]. Atmospheric environment, 2000, 34(22): 3833-3842.
- [8] GILMOUR M W, BERNARD K, TRACZ D M, et al. Molecular typing of a legionella pneumophila outbreak in Ontario, Canada[J]. Journal of medical microbiology, 2007, 56(3): 336-341.
- [9] PAVLOGEORGATOS G. Environmental parameters in museums[J]. Building & environment, 2003, 38(12): 1457-1462.
- [10] 北京钢铁学院. 物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1960.
(Beijing Iron and Steel Institute. Physical chemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1960.)
- [11] 郭宏. 文物保存环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(GUO Hong. Introduction to the preservation of cultural relics[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [12] 康忠铭. 文物保护学基础[M]. 成都: 四川大学出版社, 1995.
(KANG Zhongming. Foundation of cultural relics protection[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1995.)
- [13] ERHARDT D, MECKLENBURG M F. Accelerated vs natural aging: effect of aging conditions on the aging process of cellulose[J]. Materials research society symposium-proceedings, 1995, 352: 247-270.
- [14] 李艾阳, 东东, 孟志航, 等. 典型高校公共场所室内空气微生物分布特征[J]. 环境科学学报, 2016, 6(8): 2827-2831.
(LI Aiyang, DONG Dong, MENG Zhihang, et al. Characteristics of indoor air microbial distribution in public places of typical universities[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2016, 36(8): 2827-2831.)
- [15] 陈新宇, 徐巧兰, 李名钊, 等. 撞击法和自然沉降法监测室内空气细菌总数捕获效果的研究[J]. 热带医学杂志, 2007, 7(3): 282-284.
(CHEN Xinyu, XU Qiaolan, LI Mingzhao, et al. Study of natural precipitation method and impacting method for measurement of bacterial count in air[J]. Journal of tropical medicine, 2007, 7(3): 282-284.)
- [16] 方治国, 孙平, 欧阳志云, 等. 北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2526-2532.
(FANG Zhiguo, SUN Ping, OUYANG Zhiyun, et al. Studies on the size distribution of airborne microbes at home in Beijing[J]. Environmental science, 2013, 34(7): 2526-2532.)
- [17] 郭雅蓉, 廖春蓉, 刘玉梅. 室内空气微生物不同采样方法的检测分析[J]. 疾病预防控制通报, 2014, 29(4): 75-76.
(GUO Yarong, LIAO Chunrong, LIU Yumei. Detection and analysis of different sampling methods for indoor air microorganisms[J]. Bulletin of disease control and prevention, 2014, 29(4): 75-76.)
- [18] GE Qinjiang, LI Xiangdong, INTHAVONG K, et al. Numerical study of the effects of human body heat on particle transport and inhalation in indoor environment[J]. Building & environment, 2013, 59: 1-9.
- [19] 李贝妮. 中央空调空气处理机组微生物污染检测分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
(LI Beini. Analysis of microbial contamination in central air conditioning air handling units[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [20] 齐红霞. 病房空调环境微生物菌落特性分析与风险评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
(QI Hongxia. The analysis of the ward air conditioning environmental microbial colony characteristics and risk assessment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.)
- [21] 王贝贝, 段小丽, 蒋秋静, 等. 我国北方典型地区居民呼吸暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1421-1427.
(WANG Beibei, DUAN Xiaoli, JIANG Qiujing, et al. Study on respiratory exposure parameters of residents in typical areas of northern China[J]. Research of environmental sciences, 2010, 23(11): 1421-1427.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)