

# 兰州市室外大气细菌气溶胶浓度及粒径分布特征

陈镔<sup>1</sup>, 褚可成<sup>1</sup>, 杨仲玮<sup>2</sup>, 刘恩丽<sup>3</sup>, 李文杰<sup>3\*</sup>

(1. 甘肃省环境监测中心站, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州新区环境监测站, 甘肃 兰州 730300;  
3. 甘肃省生态环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 在兰州市不同室外环境区域布设4个采样点, 使用PSW-6型安德森(Andersen)6级筛孔撞击式空气微生物采样器采集大气细菌气溶胶, 分析其浓度和粒径日变化特征。结果表明, 不同季节各采样点的大气细菌气溶胶浓度上午时段为88 CFU/m<sup>3</sup>~1 335 CFU/m<sup>3</sup>, 下午时段为78 CFU/m<sup>3</sup>~865 CFU/m<sup>3</sup>。除了夏季兴隆山上午时段外, 其余不同季节各采样点上、下午时段的大气细菌气溶胶粒径均主要分布于I级—IV级(>2.10 μm), 占比为70.54%~93.94%; V级(1.10 μm~2.10 μm)和VI级(0.65 μm~1.10 μm)大气细菌粒子占比较低, 仅为6.06%~29.46%。

**关键词:** 大气细菌气溶胶; 浓度变化; 粒径分布; 室外环境区域; 兰州

中图分类号: X172; X513

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2023)03-0029-05

## Distribution Characteristics of Bacterial Aerosol Concentration and Particle Size in Outdoor Atmosphere in Lanzhou

CHEN E<sup>1</sup>, CHU Ke-cheng<sup>1</sup>, YANG Zhong-wei<sup>2</sup>, LIU En-li<sup>3</sup>, LI Wen-jie<sup>3\*</sup>

(1. Gansu Province Environmental Monitoring Center, Lanzhou, Gansu 730020, China;  
2. Lanzhou New Area Environmental Monitoring Station, Lanzhou, Gansu 730300, China;  
3. Gansu Academy of Eco-environmental Sciences, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** Atmospheric bacterial aerosol was sampled at four sites in different outdoor environment areas in Lanzhou by PSW-6 Andersen 6-stage sieve impact-type air microbial sampler, and the daily variation characteristics of its concentration and particle size were analyzed. The results showed that the concentration of atmospheric bacterial aerosol at each sampling site in different seasons ranged from 88 CFU/m<sup>3</sup> to 1 335 CFU/m<sup>3</sup> in the morning, and 78 CFU/m<sup>3</sup> to 865 CFU/m<sup>3</sup> in the afternoon. Except Xinglong Mountain site in summer morning, the particle size of atmospheric bacterial aerosol in the morning and afternoon periods at each sampling site in different seasons mainly distributed in grade I to grade IV (>2.10 μm), accounting for 70.54% to 93.94%, while that in grade V (1.10 μm~2.10 μm) and grade VI (0.65 μm~1.10 μm) was relatively low, accounting for only 6.06% to 29.46%.

**Key words:** Atmospheric bacterial aerosol; Change of concentration; Size distribution; Outdoor environment area; Lanzhou

大气细菌气溶胶是生物气溶胶重要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 其作为传播呼吸道疾病的介质在大气中扩散、迁徙, 并伴随着呼吸作用引起人类疾病和动、植物疾病等<sup>[3-7]</sup>。大气细菌气溶胶对人类健康的危害程度与其来源、组分、浓度、粒径大小等密切相关<sup>[8-11]</sup>, 其中粒径差异影响人体健康<sup>[12]</sup>, 较大粒径主要沉积在支气管, 较小粒径可引发肺部疾病<sup>[13]</sup>。

李婉欣等<sup>[14]</sup>研究表明, 西安市某大学室外环境中大气细菌气溶胶浓度范围为97 CFU/m<sup>3</sup>~

收稿日期: 2021-09-20; 修订日期: 2023-02-30

基金项目: 甘肃省青年科技计划基金资助项目(20JR5RA124, 18JR3RA023, 21JR7RA689)

作者简介: 陈镔(1986—), 男, 甘肃永靖人, 高级工程师, 硕士, 主要从事生物、土壤环境监测工作。

\* 通信作者: 李文杰 E-mail: 26766503@qq.com

1 909 CFU/m<sup>3</sup>。陈梅玲等<sup>[15]</sup>研究表明,南京市某校园室外夏季大气细菌气溶胶平均浓度低于春季,春、夏季大气细菌粒子浓度随海拔高度的增加而降低。宋超杰等<sup>[16]</sup>监测结果显示,广州市某医学院教学区的细菌浓度明显高于某公园,两区域 77.6%~93.7% 的细菌气溶胶粒径分布在 1.10 μm~7.00 μm 之间。已有关于大气细菌气溶胶研究多数以城市某单一特定区域为单元,今在兰州市选取 4 个室外不同环境区域开展大气细菌气溶胶浓度、粒径分布特征研究,以此为基础逐步探索制定衡量空气污染程度和大气环境质量的细菌学指标,进而评估受大气细菌气溶胶影响的环境及健康效应。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样地点及时间

在兰州市选取自然保护区、交通密集区、医疗区和科教区 4 个不同室外环境区域,在每个室外环境区域均布设 1 个大气细菌气溶胶采样点位,即兴隆山自然保护区烈士陵园(以下简称兴隆山)、火车站前广场(以下简称火车站)、甘肃省人民医院前广场(以下简称省医院)和兰州大学前广场(以下简称兰大)。4 个点位的地理位置分别为兴隆山(E104°03'06",N35°46'56"),火车站(E103°50'56",N36°02'08"),省医院(E103°51'53",N36°02'54"),兰大(E103°51'30",N36°02'48"),其中,兴隆山为背景点位。

于 2014 年春季,2018 年夏、秋、冬季,每个季节均选取气象状况相近时期连续采样 3 d,分别在 9:00—11:00(上午时段)和 14:00—16:00(下午时段),在 4 个点位同时采集大气细菌气溶胶样品,共采集 576 个样品。对上、下午时段的监测结果分别进行统计,分析各室外环境区域采样点大气细菌气溶胶浓度、粒径的日变化特征。

### 1.2 采样及培养方法

使用 PSW-6 型安德森(Andersen)6 级筛孔撞击式空气微生物采样器采集样品。该采样器模拟人类呼吸道解剖结构和空气动力学生理特征,采用惯性撞击原理,将悬浮于空气中的细菌气溶胶粒子按照粒径大小分别收集于各层级培养皿上供下一步培养和分析。该采样器分为 6 级,每级 400 孔,Ⅰ级—Ⅵ级采样孔直径逐渐缩小,空气流速逐级增大,进而将空气中的细菌气溶胶粒子按大小不同分别捕获于各层级培养皿上。具体技术参数见表 1。

表 1 PSW-6 型微生物采样器技术参数

Table 1 Technical parameters of PSW-6 microbial sampler

| 层级 | 捕获粒径范围<br>$d/\mu\text{m}$ | 空气流速<br>$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 有效截留粒径<br>$d/\mu\text{m}$ | 孔直径<br>$d/\text{mm}$ |
|----|---------------------------|--|---------------------------|----------------------|
| Ⅰ级 | > 7.00                    | 1.08                                     | 7.00                      | 1.18                 |
| Ⅱ级 | 4.70~7.00                 | 1.79                                     | 4.70                      | 0.91                 |
| Ⅲ级 | 3.30~4.70                 | 2.97                                     | 3.30                      | 0.71                 |
| Ⅳ级 | 2.10~3.30                 | 5.28                                     | 2.10                      | 0.53                 |
| Ⅴ级 | 1.10~2.10                 | 12.77                                    | 1.10                      | 0.34                 |
| Ⅵ级 | 0.65~1.10                 | 23.29                                    | 0.65                      | 0.25                 |

在无雨雪且相对静风天气下采集样品,采集高度距离地面约 1.5 m 处,模拟人类呼吸带高度,按照标准流量 28.3 L/min,利用 9 cm 培养皿取样,取样时间 25 min<sup>[17]</sup>。细菌气溶胶样品采集使用牛肉膏蛋白胨培养基(购自青岛日本水技术有限公司),在无菌条件下向上述培养皿中加入 25 mL 的培养基,使采样器各层级孔眼至采样面距离(即撞击距离)为 2 mm~3 mm。采集的细菌气溶胶样品置于 37 ℃ 恒温恒湿培养箱内,倒置培养 48 h,对各层级培养皿上的细菌菌落进行计数、分离纯化。计数用培养皿经无菌试验合格后使用。

### 1.3 大气细菌气溶胶粒径计算与统计

大气细菌气溶胶菌落浓度计算公式为:

$$n = (TN \times 1000) / (t \times V) \quad (1)$$

式中: $n$  为大气细菌气溶胶菌落浓度,CFU/m<sup>3</sup>;  $TN$  为各层级培养皿上大气细菌气溶胶总菌落数,CFU;  $t$  为采样时间,min;  $V$  为空气流量,L/min。

各层级细菌气溶胶粒子百分比:

$$P = N / TN \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P$  为各层级不同粒径大气细菌气溶胶百分比,%;  $N$  为该层级培养皿上大气细菌气溶胶菌落数,CFU;  $TN$  为各层级培养皿上大气细菌气溶胶总菌落数,CFU。

利用 Microsoft Excel 2010 对数据进行统计、分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气细菌气溶胶浓度日变化

表 2 为不同季节各采样点大气细菌气溶胶浓度及附近 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日变化。由表 2 可知,不同季节兴隆山(自然保护区)、火车站(交通密集区)、省医院(医疗区)和兰大(科教区)4 个采样点的大气细菌气溶胶浓度存在日变化差异。

各采样点大气细菌气溶胶浓度从高到低排序,

春季上午和下午时段均为火车站 > 省医院 > 兰大 > 兴隆山; 夏季上午时段为省医院 > 火车站 > 兰大 > 兴隆山, 下午时段为火车站 > 省医院 > 兰大 > 兴隆山; 秋季上午时段为火车站 > 兰大 > 省医院 > 兴隆山, 下午时段为火车站 > 省医院 > 兰大 > 兴隆山; 冬季上午时段为省医院 > 兰大 > 火车站 > 兴隆山, 下午时段为兴隆山 > 兰大 > 省医院 > 火车站。

各采样点大气细菌气溶胶浓度基本表现为上午时段较下午时段高, 可能因为经过上午的太阳辐射, 在一定程度上减少了细菌气溶胶数量, 所以大气细菌气溶胶浓度从上午至下午呈现随太阳辐射增强而降低的趋势, 这与朱希希等<sup>[18]</sup>、孙强等<sup>[19]</sup>研究结果基本一致。从不同季节各采样点大气细菌气溶胶浓度日变化看, 火车站、省医院、兰大的细菌气溶胶浓度普遍高于兴隆山, 这可能与上述 3 个采样点周边人员和车辆流动大、植被覆盖度较低有关。这 3 个采样点对环境颗粒物吸附能力有限, 相对而言更易使大气细菌气溶胶浓度升高, 而兴隆山点位周边植被茂密, 大范围茂密植被可有效吸附大气颗粒物及其中的细菌气溶胶, 且该点位人员和车辆流动较少, 故大气细菌气溶胶浓度也相对较低。仅冬季下午兴隆山细菌气溶胶浓度较其他采样点高, 这与该点位在冬季下午时段采样时恰逢烈士陵园特殊纪念活动有关, 人流量骤然增加导致该时段大气细菌气溶胶浓度升高, 说明细菌气溶胶浓度会随人员流动增大而升高。值得注意的是, 冬季各室外环境区域细菌气溶胶浓度普遍较低, 说明气温可能是影响大气细菌气溶胶浓度分布的重要因素。

上午时段, 兴隆山细菌气溶胶浓度秋、冬季高于夏、春季, 秋季浓度最高, 为  $315 \text{ CFU}/\text{m}^3$ , 春季最低, 为  $88 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 。火车站和兰大细菌气溶胶浓度均呈现春、秋季高于夏、冬季的趋势。初步推断, 春季和秋季气候条件更适宜细菌气溶胶增殖。夏季太阳辐射强度相对较强, 冬季气温较低, 两个环境要素均不利于细菌气溶胶增殖。春季火车站、兰大细菌气溶胶浓度均约为兴隆山的 14 倍~15 倍; 秋季二者为兴隆山的 2 倍~3 倍; 夏季均为兴隆山的 3 倍; 冬季火车站细菌气溶胶浓度较兴隆山略高, 兰大为兴隆山的 1.5 倍。而省医院细菌气溶胶浓度春、夏、秋、冬季逐渐递减, 分别为兴隆山的 15 倍、3.7 倍、1.7 倍、1.7 倍。

下午时段, 兴隆山细菌气溶胶浓度冬、春季高于秋、夏季; 火车站和省医院细菌气溶胶浓度均呈

现春、秋季高于夏、冬季, 推测其原因亦与气候条件有关, Zhen 等<sup>[20]</sup>也得出相似的研究结果。火车站和省医院春、秋季细菌气溶胶浓度均约为兴隆山的 4 倍, 夏季分别为兴隆山的 4.9 倍和 3.6 倍, 冬季均较兴隆山低。兰大细菌气溶胶浓度与上午时段的省医院变化趋势相似, 均呈现春、夏、秋、冬季逐渐递减态势, 分别为兴隆山的 3.2 倍、2.8 倍、1.9 倍、0.8 倍。说明人群流动频繁的火车站和省医院在春、夏、秋季的细菌气溶胶浓度较背景点兴隆山高, 同时兰大人员流动程度相对较低, 周边植物较火车站、省医院多, 细菌气溶胶浓度也次之, 在这 3 个季节植被覆盖度高的室外环境区域有助于降低大气细菌气溶胶浓度; 而在冬季火车站、省医院和兰大细菌气溶胶浓度均低于兴隆山, 这可能由于冬季气候干燥, 大量的植被存在可以为大气细菌气溶胶附着提供必要场所, 故植被覆盖度高的兴隆山细菌气溶胶浓度较火车站、省医院、兰大高。

综上所述, 兴隆山上午时段大气细菌气溶胶浓度按照季节性排序由高到低为秋季 > 冬季 > 夏季 > 春季, 下午时段为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季; 火车站上、下午时段均为春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季; 省医院上午时段和兰大下午时段均为春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季, 省医院下午时段和兰大上午时段均为春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季。在春、夏、秋季兴隆山点位上午和下午时段的大气细菌气溶胶浓度均远低于其他采样点, 说明兴隆山高覆盖度植物对微生物气溶胶传播有阻断作用<sup>[19]</sup>。就火车站、省医院、兰大而言, 春、秋季更适宜细菌气溶胶增殖, 且人群流动使细菌气溶胶浓度上升, 再次印证人群是微生物气溶胶的重要产生源之一<sup>[19]</sup>; 而太阳辐射和低气温均不利于细菌气溶胶增殖, 从而产生各采样点大气细菌气溶胶浓度季节性变化。

由表 2 可知, 火车站、省医院和兰大的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度较同时段兴隆山高。将  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与大气细菌气溶胶浓度作相关性分析得出, 除了春季兴隆山点位外, 不同季节各采样点的大气细菌气溶胶浓度 ( $y$ ) 与同期  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度 ( $x$ ) 存在较明显的正相关关系, 两者关系符合公式  $y = 12.299x - 103.8 (R^2 = 0.8061)$ 。因此, 大气细菌气溶胶浓度可能是环境空气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化的重要影响因素。西安、南昌等地已开展  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中微生物浓度及群落结构的研究<sup>[21-22]</sup>, 下一步将开展兰州市颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$ ) 中细菌气溶胶浓度、群落结

表 2 不同季节各采样点大气细菌气溶胶浓度及附近 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日变化  
Table 2 Diurnal variation of atmospheric bacterial aerosol concentration and nearby PM<sub>2.5</sub> mass concentration at each sampling site in different seasons

| 季节 | 采样点 | 大气细菌气溶胶浓度 / (CFU · m <sup>-3</sup> ) |       |           |     | PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 <sup>①</sup> / (μg · m <sup>-3</sup> ) |     |        |     |
|----|-----|--------------------------------------|-------|-----------|-----|---|-----|--------|-----|
|    |     | 上午时段                                 |       | 下午时段      |     | 上午时段  |     | 下午时段   |     |
|    |     | 范围                                   | 平均值   | 范围        | 平均值 | 范围  | 平均值 | 范围     | 平均值 |
| 春季 | 兴隆山 | 48~124                               | 88    | 117~314   | 185 | 27~55   | 42  | 13~41  | 27  |
|    | 火车站 | 1 025~1 948                          | 1 335 | 541~1 206 | 865 | 91~115  | 105 | 68~101 | 85  |
|    | 省医院 | 739~2 253                            | 1 326 | 324~1 371 | 797 | 91~115  | 105 | 68~101 | 85  |
|    | 兰大  | 892~1 792                            | 1 249 | 332~923   | 594 | 91~115  | 105 | 68~101 | 85  |
| 夏季 | 兴隆山 | 42~454                               | 184   | 31~153    | 78  | 9~48  | 34  | 10~48  | 26  |
|    | 火车站 | 430~807                              | 572   | 322~441   | 386 | 36~69   | 53  | 23~60  | 42  |
|    | 省医院 | 379~1 148                            | 688   | 253~308   | 279 | 36~69   | 53  | 23~60  | 42  |
|    | 兰大  | 288~849                              | 522   | 157~259   | 221 | 36~69   | 53  | 23~60  | 42  |
| 秋季 | 兴隆山 | 202~438                              | 315   | 102~110   | 105 | 10~21   | 17  | 6~13   | 10  |
|    | 火车站 | 589~1 730                            | 1 007 | 301~537   | 409 | 38~55   | 49  | 27~48  | 34  |
|    | 省医院 | 82~934                               | 537   | 284~478   | 392 | 38~55   | 49  | 27~48  | 34  |
|    | 兰大  | 441~1 029                            | 721   | 122~245   | 195 | 38~55   | 49  | 27~48  | 34  |
| 冬季 | 兴隆山 | 155~437                              | 284   | 167~208   | 191 | 28~31   | 29  | 14~18  | 16  |
|    | 火车站 | 199~495                              | 304   | 58~112    | 80  | 26~69   | 48  | 18~31  | 25  |
|    | 省医院 | 387~563                              | 490   | 58~199    | 116 | 26~69   | 48  | 18~31  | 25  |
|    | 兰大  | 339~531                              | 434   | 95~213    | 148 | 26~69   | 48  | 18~31  | 25  |

①兴隆山点位的 PM<sub>2.5</sub> 值参考同期距离最近的兰州榆中校区自动站点数据;火车站、省医院、兰大点位的 PM<sub>2.5</sub> 值参考同期距离最近的铁路设计院自动站点数据。

构相关研究,为颗粒物污染源解析提供有力支撑。

## 2.2 大气细菌气溶胶粒径日变化

表 3 为不同季节各采样点大气细菌气溶胶粒径占比日变化。由表 3 可知,除了夏季兴隆山上午时段外,其余不同季节各采样点上、下午时段的大气细菌气溶胶粒径均主要分布于 I 级—IV 级 (> 2.10 μm), 占比为 70.54% ~ 93.94%; V 级 (1.10 μm ~ 2.10 μm) 和 VI 级 (0.65 μm ~ 1.10 μm) 大气细菌粒子占比较低, 仅为 6.06% ~ 29.46%。不同室外环境区域的大气细菌气溶胶粒径百分比季节性分布状况有较明显差异。

春季,各采样点大气细菌气溶胶粒径百分比在上、下午时段大体呈现从 I 级 (> 7.00 μm) 到 VI 级 (0.65 μm ~ 1.10 μm) 逐渐降低的趋势。其中,上午时段兴隆山和火车站细菌气溶胶分别在 III 级 (3.30 μm ~ 4.70 μm) 和 II 级 (4.70 μm ~ 7.00 μm) 粒径粒子占比最多, 分别为 25.67% 和 28.72%, 省医院和兰大细菌气溶胶均在 I 级粒径粒子占比最多, 分别为 34.21% 和 26.37%; 下午时段兴隆山和兰大细菌气溶胶均在 I 级粒径粒子占比最多, 火车站和省医院均在 II 级粒径粒子占比最多。除火车站上午时段细菌气溶胶在 V 级 (1.10 μm ~ 2.10 μm) 粒径粒子占比最少, 仅为 5.01% 外, 其余各采样点

上、下午时段细菌气溶胶均在 VI 级粒径粒子占比最少, 不超过 6.15%。说明不同室外环境区域上、下午时段细菌气溶胶粒径分布有所差异。

夏季,上午时段火车站、省医院、兰大细菌气溶胶粒子占比最多和最少的层级均分别为 I 级 (占比 21.68% ~ 24.69%) 和 VI 级 (占比均 ≤ 6.14%), 兴隆山细菌气溶胶粒子占比最多和最少的层级为 V 级 (占比 50.26%) 和 II 级 (占比 2.31%), 且 VI 级粒径粒子占比也达到 33.85%, 说明夏季上午时段兴隆山细菌气溶胶浓度粒径主要集中在 0.65 μm ~ 2.10 μm 范围内; 下午时段兴隆山、火车站、省医院细菌气溶胶粒子均在 I 级粒径占比最多, 为 29.79% ~ 41.82%, 兰大在 II 级粒径粒子占比最多, 达 26.23%, 兴隆山、火车站、兰大细菌粒子占比最少层级均为 VI 级 (占比均 ≤ 5.76%), 省医院占比最少层级为 V 级 (占比 5.91%)。

秋季,上午时段兴隆山、火车站、省医院、兰大细菌气溶胶粒子占比最多的层级分别为 V 级 (占比 26.80%)、IV 级 (占比 28.34%)、I 级 (占比 25.44%)、II 级 (占比 20.18%), 而兴隆山、火车站、省医院细菌气溶胶粒子占比最少层级均为 VI 级 (占比均 ≤ 6.22%), 兰大为 V 级 (占比 11.04%); 下午时段各采样点细菌气溶胶粒子占比最多层级

表 3 不同季节各采样点大气细菌气溶胶粒径占比日变化

%

Table 3 Diurnal variation of particle size proportion of atmospheric bacterial aerosol at each sampling site in different seasons

%

| 季节 | 采样点 | 上午时段  |       |       |       |       |       | 下午时段  |       |       |       |       |       |
|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    |     | I 级   | II 级  | III 级 | IV 级  | V 级   | VI 级  | I 级   | II 级  | III 级 | IV 级  | V 级   | VI 级  |
| 春季 | 兴隆山 | 21.93 | 15.51 | 25.67 | 11.76 | 21.39 | 3.74  | 33.33 | 33.08 | 18.33 | 7.12  | 4.07  | 4.07  |
|    | 火车站 | 23.64 | 28.72 | 21.17 | 10.24 | 5.01  | 11.22 | 19.67 | 34.28 | 28.45 | 9.10  | 7.52  | 0.98  |
|    | 省医院 | 34.21 | 17.73 | 18.19 | 16.27 | 10.12 | 3.48  | 20.98 | 30.67 | 13.95 | 13.12 | 19.27 | 2.01  |
|    | 兰大  | 26.37 | 16.56 | 18.82 | 21.61 | 10.49 | 6.15  | 33.49 | 13.57 | 15.48 | 26.43 | 6.11  | 4.92  |
| 夏季 | 兴隆山 | 4.87  | 2.31  | 3.33  | 5.38  | 50.26 | 33.85 | 41.82 | 7.88  | 7.88  | 23.03 | 16.97 | 2.42  |
|    | 火车站 | 24.69 | 20.91 | 18.52 | 17.20 | 15.06 | 3.62  | 29.79 | 26.37 | 19.29 | 17.83 | 6.23  | 0.49  |
|    | 省医院 | 24.66 | 19.72 | 21.44 | 17.40 | 13.08 | 3.70  | 33.45 | 21.28 | 23.99 | 8.11  | 5.91  | 7.26  |
|    | 兰大  | 21.68 | 17.43 | 20.69 | 17.25 | 16.81 | 6.14  | 19.19 | 26.23 | 21.11 | 19.62 | 8.09  | 5.76  |
| 秋季 | 兴隆山 | 21.41 | 16.61 | 11.53 | 21.25 | 26.80 | 2.40  | 34.23 | 21.17 | 18.92 | 10.36 | 13.52 | 1.80  |
|    | 火车站 | 20.31 | 14.64 | 12.86 | 28.34 | 17.63 | 6.22  | 25.20 | 15.42 | 15.19 | 20.14 | 8.63  | 15.42 |
|    | 省医院 | 25.44 | 21.49 | 21.05 | 21.93 | 5.70  | 4.39  | 28.40 | 22.02 | 18.17 | 23.11 | 7.94  | 0.36  |
|    | 兰大  | 19.86 | 20.18 | 16.39 | 14.11 | 11.04 | 18.42 | 22.22 | 16.18 | 18.12 | 16.91 | 13.53 | 13.04 |
| 冬季 | 兴隆山 | 22.55 | 13.93 | 23.71 | 18.91 | 18.91 | 1.99  | 21.92 | 9.11  | 23.15 | 21.18 | 12.82 | 11.82 |
|    | 火车站 | 26.32 | 13.78 | 19.50 | 21.36 | 13.62 | 5.42  | 32.94 | 17.06 | 17.65 | 17.06 | 6.47  | 8.82  |
|    | 省医院 | 14.33 | 20.48 | 19.42 | 18.18 | 16.15 | 11.44 | 30.49 | 28.86 | 14.23 | 10.98 | 13.41 | 2.03  |
|    | 兰大  | 33.66 | 12.60 | 18.68 | 22.68 | 10.86 | 1.52  | 47.13 | 23.89 | 13.68 | 9.24  | 5.10  | 0.96  |

均为 I 级(占比 22.22% ~ 34.23%),兴隆山、省医院、兰大细菌粒子占比最少层级均为 VI 级(占比均 ≤ 13.04%),火车站为 V 级(占比 8.63%)。

冬季,上午时段兴隆山和省医院细菌气溶胶粒子占比最多层级分别为 III 级(占比 23.71%)和 II 级(占比 20.48%),火车站和兰大为 I 级,占比分别为 26.32% 和 33.66%,而各采样点细菌气溶胶粒子占比最少均为 VI 级(占比均 ≤ 11.44%);下午时段兴隆山细菌气溶胶粒子占比最多和最少层级分别为 III 级(占比 23.15%)和 II 级(占比 9.11%),其余采样点细菌气溶胶粒子占比最多层级均为 I 级(占比 30.49% ~ 47.13%),占比最少层级火车站为 V 级(占比 6.47%),省医院和兰大为 VII 级(占比 ≤ 2.03%)。

由不同季节各采样点细菌气溶胶粒径日变化可以看出,各室外环境区域细菌气溶胶的粒径主要集中于 I 级—IV 级( $> 2.10 \mu\text{m}$ ),V 级—VI 级( $0.65 \mu\text{m} \sim 2.10 \mu\text{m}$ )粒径粒子分布较少,这与孙强等<sup>[19]</sup>、许鹏程等<sup>[23]</sup>的研究结果相似,说明兰州市室外环境区域的大气细菌气溶胶主要影响人体支气管及鼻、咽等器官<sup>[17]</sup>。

### 3 结论

(1) 采样期间兴隆山上午和下午时段大气细菌气溶胶浓度范围分别为  $88 \text{ CFU}/\text{m}^3 \sim$

$315 \text{ CFU}/\text{m}^3$  和  $78 \text{ CFU}/\text{m}^3 \sim 191 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ,其余各采样点上午时段大气细菌气溶胶浓度范围为  $304 \text{ CFU}/\text{m}^3 \sim 1335 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ,下午时段为  $80 \text{ CFU}/\text{m}^3 \sim 865 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ,上午时段细菌气溶胶浓度普遍较下午时段高。

(2) 除春季兴隆山点位外,不同季节 4 个室外环境区域采样点的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与大气细菌气溶胶浓度日变化大体呈正相关趋势,细菌气溶胶浓度可能是  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度变化的重要影响因素。

(3) 除了夏季兴隆山上午时段外,其余不同季节各采样点上、下午时段的大气细菌气溶胶粒径均主要分布于 I 级—IV 级( $> 2.10 \mu\text{m}$ ),V 级—VI 级( $0.65 \mu\text{m} \sim 2.10 \mu\text{m}$ )粒径粒子占比较低,

#### [参考文献]

- [1] 汪瑶,祁建华,张婷,等. 青岛多种天气下生物气溶胶中细菌群落特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 88-98.
- [2] GAO M, JIA R Z, QIU T L, et al. Seasonal size distribution of airborne culturable bacteria and fungi and preliminary estimation of their deposition in human lungs during non-haze and haze days [J]. Atmospheric Environment, 2015, 118: 203-210.
- [3] HO J, DUNCAN S. Estimating aerosol hazards from an anthrax letter[J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 36(5/6): 701-719.

(下转第 38 页)