ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第8期
2017年8月15日

目 次

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响

李鸿涛,祁建华*,董立杰,高冬梅
(中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室,青岛 266100)

摘要:为了解沙尘对生物气溶胶中微生物的影响,于 2015 年 3 ~4 月间分别在兰州和青岛沙尘期间运用分级生物气溶胶采样器连续采集了生物气溶胶样品,并利用 DAPI 染色-荧光显微镜计数方法测定了总微生物浓度. 结果表明,沙尘发生时生物气溶胶中总微生物浓度显著增加($P<0.05$). 兰州和青岛总微生物浓度晴天背景均值分别为 5.61×10^5 cells·m^{-3}和 2.08×10^5 cells·m^{-3},沙尘时平均浓度分别是晴天的 14.8 倍和 6.42 倍. 晴天时兰州和青岛两地样品微生物粒径分布均呈双峰分布,最高峰值均出现在 >7.0 μm 的粒径上,最低值均出现在 4.7 ~7.0 μm 的粒径上,浓度次高峰值分别出现在 3.3 ~4.7 μm 的粒径上和 1.1 ~2.1 μm 的粒径上. 沙尘时粒径分布均发生明显变化,兰州仍呈现双峰分布,但其中一个峰值从 >7.0 μm 移动到 1.1 ~2.1 μm;而青岛粒径由双峰分布变为粗粒径偏态分布. 兰州和青岛沙尘前微生物负荷的背景值分别是2 224 cells·μg^{-1}和1 550 cells·μg^{-1},而沙尘发生时,颗粒物的微生物负荷均大幅增加,最高值分别达26 442 cells·μg^{-1}和10 250 cells·μg^{-1},这说明沙尘天气发生时,微生物浓度的增加不仅仅是因为空气中颗粒物的增加,而是因为长距离传输的沙尘颗粒携带有大量外源微生物.

关键词:沙尘;生物气溶胶;微生物浓度;粒径分布;PM_{10}
中图分类号:X172;X51 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2017)08-3169-09 **DOI**:10.13227/j.hjkx.201701011

Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols

LI Hong-tao, Qi jian-hua*, DONG Li-jie, GAO Dong-mei
(Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to study the influence of dust events on the airborne microbes in atmospheric bioaerosols, bioaerosol samples were continuously collected from March to April 2015 during two dust events using size-fractionated bioaerosol samplers in Lanzhou and Qingdao. The concentration of airborne microbes were measured using an epifluorescence microscope after staining with DAPI (4′,6-diamidino-2-phenylindole). The results showed that the concentration of airborne microbes increased significantly during the period of dust ($P<0.05$). The average concentrations of airborne microbes on sunny days were 5.61×10^5 cells·m^{-3} and 2.08×10^5 cells·m^{-3} in Lanzhou and Qingdao, respectively, whereas the mean concentrations on dusty days were 14.8 times and 6.42 times those on sunny days, respectively. The concentration of airborne microbes presented a bimodal size distribution on sunny days in Lanzhou and Qingdao, with a peak at >7.0 μm and the lowest values ranging from 4.7 μm to 7.0 μm. However, the second peak appeared at 3.3-4.7 μm and 1.1-2.1 μm in Lanzhou and Qingdao, respectively. The size distribution of airborne microbes changed during the dust period. The size distribution of microbes still presented a bimodal distribution in Lanzhou; however, one peak shifted from >7.0 μm to 1.1-2.1 μm. The size distribution in Qingdao changed from a bimodal distribution to a skewed distribution with the predominant fraction in coarse mode. The background values of microbial load in PM_{10} before the dust were 2 224 cells·μg^{-1} and 1 550 cells·μg^{-1} in Lanzhou and Qingdao, respectively, and the highest value of such increased significantly to 26 442 cells·μg^{-1} and 10 250 cells·μg^{-1} during the dust events, respectively. This demonstrated that the high concentration of microbes in the dust events resulted not only from increased atmospheric particles but also from dust source and transportation path along with long-range transported dust particles.

Key words: dust; bioaerosols; microbial concentration; size distribution; PM_{10}

生物气溶胶指大气颗粒中含有微生物或生物大分子等具有生命活性的微小粒子[1]. 微生物是生物气溶胶的主要成分,能够直接影响空气质量,并可引发人类急、慢性疾病[2~4]. 已有研究[5~11]显示,生物气溶胶受天气状况影响很大,特殊天气下生物气溶胶的浓度和群落结构会发生变化. 青岛霾天空气中优势菌属发生明显变化,细菌群落结构的粒径差

收稿日期:2017-01-03;**修订日期**:2017-03-07
基金项目:国家自然科学基金项目(41375143);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0531)
作者简介:李鸿涛(1991 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为气溶胶微生物,E-mail:276735801@qq.com
* 通信作者,E-mail:qjianhua@ouc.edu.cn

异性变小；沙尘天气下，生物气溶胶中总微生物浓度增加且粒径分布发生明显变化[5,6]．西安霾天可培养细菌和真菌水平远高于非霾天，微生物的群落结构也更为复杂[10]．特殊天气下空气中微生物浓度、组成和粒径分布的变化会导致其对环境和人体健康的影响不同[12,13]．因此，研究特殊天气下生物气溶胶的浓度和分布，对于全面认识生物气溶胶的性质及环境和健康效应具有重要意义．

沙尘天气是一种常见的特殊天气，近年来已成为全球重要的环境问题．根据气象观测定义，浮尘、扬沙和沙尘暴统称为沙尘天气，是一种由大风将地面沙尘扬起或被高空气流带到下游地区而造成的大气能见度显著降低的现象[14]．沙尘会造成空气污染、水源污染，危害人体健康，还可以通过影响太阳辐射，间接引起区域甚至全球的气候变化[15,16]．每年亚洲和非洲沙尘暴事件产生的气溶胶多达几十亿吨[17]．沙尘粒子不仅载有大量的化学物质，还携带有大量生物气溶胶．研究显示，沙尘天气会使生物气溶胶的浓度、群落结构和粒径分布发生很大变化．加勒比群岛附近沙尘天气可培养细菌浓度比非沙尘天气浓度升高 5 ~ 10 倍，微生物种类数上升了一个数量级，且其中革兰氏阳性菌比重显著增加[18]．韩国沙尘暴发时，可培养细菌和真菌浓度都随 PM_{10} 的增大而明显增大，且微生物群落结构发生很大变化，对人体有害的类群增多[19~21]．非洲沙尘向北美传输途中，大西洋中脊一带空气中可培养微生物浓度与沙尘颗粒物浓度呈显著正相关[22]．伊朗沙尘天气下空气中可培养细菌、真菌浓度显著上升[23]．在以色列也观测到沙尘期间空气中微生物浓度大幅增加，且微生物群落结构变化明显[24]．北京沙尘期间可培养微生物浓度比非沙尘期间高出 1 ~2 个数量级[25,26]．可见，沙尘天气对生物气溶胶的浓度和群落结构具有很大影响，相关研究已经取得了一定进展，但尚无法确定沙尘天气对生物气溶胶基本性质和环境效应的影响程度和作用机制．因此，研究沙尘过程中生物气溶胶浓度和粒径的变化，对于认识沙尘暴在运移过程中对下风向地区生物气溶胶的影响是非常必要的，对于全面了解生物气溶胶的环境效应和健康效应也是不可或缺的．

为了了解不同强度沙尘对下风向地区生物气溶胶的影响，选择了均受沙尘影响但离沙尘源区距离不同的两个城市对比研究．兰州市位于黄河河谷盆地，风速小，降水少，上风向沙尘源区众多，是西北沙尘东移的必经之道，也是西北沙尘气溶胶的重要沉降区和污染区[27,28]；青岛位于山东半岛南部沿海，西邻胶州湾，东部南部濒临黄海，年平均风速和降水高于兰州，虽然距离沙尘源较远，但它是亚洲沙尘气溶胶向中国近海及西北太平洋输送的重要通道之一，近年来频繁受到沙尘影响[29]．本研究于 2015 年 3 月下旬，在兰州和青岛分别采集了一次沙尘过程前后的生物气溶胶样品，分析了生物气溶胶中总微生物浓度，探讨了沙尘过程对总微生物浓度和粒径分布的影响．

1 材料与方法

1.1 采样点概况

采样点位于兰州市和青岛市两地，具体位置如图 1 所示．兰州市样品采集于西北师范大学生科楼楼顶(36.12°N，103.72°E)，距离黄河 1 km 左右，楼高 7 层，周围较空旷，无污染源．青岛市样品采集于

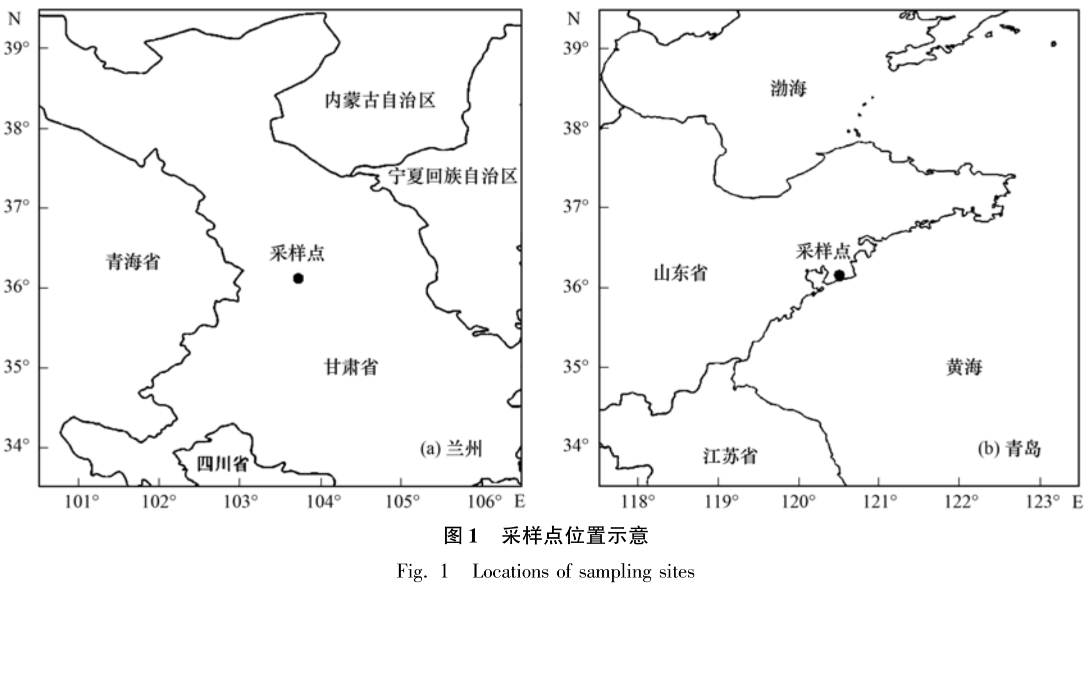

图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Locations of sampling sites

中国海洋大学崂山校区五区教学楼顶(36.16°N, 120.50°E),距离海岸线 7 km 左右,楼高 6 层,周边是教学区,绿地覆盖面积约为 50%,人为影响小.

1.2 样品采集与测定

非沙尘期间常规采样时间为 08:00 开始,沙尘时根据天气状况加采样品. 样品采集信息和部分气象、环境指标详见表 1. 本研究采用徐文兵等[8]建立的 DAPI 染色法结合荧光显微镜技术测定总微生物浓度. 该方法利用 4′,6-二脒基-2-苯基吲哚(4′,6-diamidino-2-phenylindole, DAPI)与 DNA 发生特异性结合,在一定波长的激发光下释放出蓝色至青绿色荧光,从而成功检测大气颗粒物中的微生物,鉴于该方法可以测定除完整孢子状真菌的所有微生物,已在生物气溶胶环境样品的研究中取得了较好的应用[6,9]. 采样前预先将采样器用 75% 无水乙醇擦拭并晾干,使用紫外灭菌 15 min 以上,生理盐水、吐温、滤膜、离心管等材料试剂均使用高压蒸汽灭菌锅在 121℃ 下灭菌 15 min,取用滤膜的镊子使用前在酒精灯下灼烧灭菌并冷却至室温.

采用 FA-1 型 6 级筛孔撞击式空气微生物采样器(辽阳市康洁仪器研究所),将生物气溶胶采集在直径 80 mm,孔径 0.2 μm 的聚碳酸酯滤膜上. FA-1 采样器共分 6 个粒径范围: >7.0 μm、4.7 ~ 7.0 μm、3.3 ~ 4.7 μm、2.1 ~ 3.3 μm、1.1 ~ 2.1 μm、0.65 ~ 1.1 μm,采样流量为 28.3 L·min^{-1},采样时间为 30 min. 采样结束后,在超净台中佩戴好一次性无菌手套,用镊子分别将不同粒径段的样品膜取出放入离心管中,离心管预先加有 200 μL 浓度为 0.25% 的吐温 80 和 20 mL 0.85% ~ 0.9% 的氯化钠溶液. 将离心管置于恒温振荡培养箱,于 37℃,150 r·min^{-1}振荡 30 min,将滤膜上采集到的微生物洗脱到生理盐水中,制成菌悬液. 再用 Whatman 黑色核孔滤膜过滤菌悬液,在负压条件下,抽滤至滤膜刚好呈湿润状态,加入浓度为 10 μg·mL^{-1}的 DAPI 避光反应 8 min,再次抽滤至干后,在荧光显微镜蓝光道油镜条件下,随机取 10 个视野,记录具有细菌形态呈亮蓝色的菌个数[8,9]. 根据公式来计算样品中各级微生物浓度.

总微生物浓度换算公式如下:

$$c_x = \frac{N_a \cdot S \cdot V_2}{S_f \cdot V_1 \cdot V_3}$$

表 1 样品采集信息及部分气象和环境指标1)

Table 1 Sampling information and related meteorological and environmental indices

地点	采样起始时间 (月-日 T 时)	温度 /℃	相对湿度 /%	风速 /m·s^{-1}	AQI	PM_{10} /μg·m^{-3}	$PM_{2.5}$ /μg·m^{-3}	能见度 /km
兰州	03-13T08:00	6	19	2	112	173	44	20.0
	03-14T08:00	1	37	3	137	223	57	15.0
	03-16T08:00	5	35	1	144	237	75	15.0
	03-19T08:00	4	58	2	68	86	32	15.0
	03-20T08:00	6	21	0	76	102	37	20.0
	03-24T08:00	6	57	2	49	46	34	11.0
	03-26T08:00	15	39	3	128	206	78	20.0
	03-27T08:00	11	30	1	121	192	67	None
	03-27T19:00	10	28	5	219	363	45	None
	03-27T21:00	10	32	4	372	477	53	None
	03-28T08:00	4	49	1	129	208	66	15.0
	03-31T08:00	12	38	1	168	285	78	13.0
青岛	03-03T08:00	4.3	75	8.7	139	154	106	3.8
	03-03T12:00	6.0	37	12.7	68	64	49	30.0
	03-05T08:00	1.0	38	1.7	61	69	20	28.0
	03-10T08:00	−2.2	55	2.8	71	91	37	21.0
	03-15T08:00	5.8	93	2.3	57	64	21	10.0
	03-20T08:00	12.3	34	2.9	153	218	117	8.0
	03-25T08:00	7.5	77	3.8	50	50	31	12.0
	03-28T08:00	7.7	98	4.3	80	86	58	3.0
	03-29T09:20	12.5	66	2.7	199	346	127	6.0
	03-29T13:00	8.8	86	4.7	118	183	86	6.0
	04-03T08:00	8.4	71	6.8	85	91	62	14.0
	04-10T08:00	8.5	86	2.7	64	76	28	16.0

1) None 表示 MICAPS 资料能见度数值缺失

$$c_T = \sum_{x=1}^{6} c_x$$

式中，c_T：不同粒径微生物浓度之和（cells·m^{-3}）；c_x：x 粒径微生物浓度（cells·m^{-3}）；N_a：各视野平均微生物粒子数（cells）；S：核孔滤膜实际过滤面积（mm^2）；S_f：显微镜视野面积（mm^2）；V_1：过滤样品量（L）；V_2：氯化钠缓冲液体积（L）；V_3：采样器空气流量（m^3）.

1.3 数据来源

本研究采用的兰州地区风速、温度、相对湿度数据来源于中国气象局 MICAPS 资料和 WeatherUnderground（www. wunderground. com），青岛地区风速、温度、相对湿度数据来源于青岛市气象局（qdqx. qingdao. gov. cn），中国气象局 MICAPS 资料和 WeatherUnderground（www. wunderground. com），兰州及青岛的 AQI、$PM_{2.5}$、PM_{10} 数据来源于中国环境监测总站（www. cnemc. cn），后向轨迹利用 NOAA 的 HYSPLIT 模式根据采样点经纬度和沙尘时间生成于 Air Resource Laboratory（www. arl. noaa. gov），晴、沙尘等天气状况是根据中国气象局 MICAPS 资料进行统计划分的. 运用方差分析比较数据的差异性，P 值 <0.05 的值为统计显著性.

2 结果与讨论

2.1 总微生物浓度背景值

图 2 为兰州及青岛观测期间晴天、空气质量优良（AQI <100）条件下的总微生物浓度背景值. 青岛共采集晴天样品 7 套，PM_{10} 均值 75.3 μg·m^{-3}，标准偏差 15.4 μg·m^{-3}，总微生物浓度范围在 1.33 ~ 3.45×10^5 cells·m^{-3}，均值为 2.08×10^5 cells·m^{-3}，标准偏差 7.17×10^4 cells·m^{-3}，这与 Dong 等[30] 2014 年 3 月在青岛同一采样点测得的微生物浓度均值 2.7×10^5 cells·m^{-3} 接近. 兰州采集的晴天样品数为 3 套，PM_{10} 均值 78.1 μg·m^{-3}，标准偏差 28.8 μg·m^{-3}，总微生物浓度范围在 3.34 ~ 9.11×10^5 cells·m^{-3}，均值为 5.61×10^5 cells·m^{-3}，标准偏差 3.07×10^4 cells·m^{-3}. 尚未见到兰州生物气溶胶中总微生物浓度的报道.

对比两地背景浓度可以发现，兰州和青岛晴天条件下的 PM_{10} 相差不大（$P>0.05$），但空气中总微生物浓度值存在明显差异（$P<0.05$），兰州总微生物浓度均值比青岛高 62.9%. 兰州靠近我国沙漠戈壁腹地，本地污染源众多，而其内陆河谷的自然条件不利于污染物扩散和清除[28]，因此兰州在同期内空气质量优良率明显低于青岛. 此外，不利于污染物扩散的自然条件同样不利于空气中悬浮微生物的扩散和传输，因而即使在 PM_{10} 相对较低的晴天条件下，兰州空气中的微生物浓度也高于青岛. 颗粒物上微生物的负荷将在 2.4 节详细讨论.

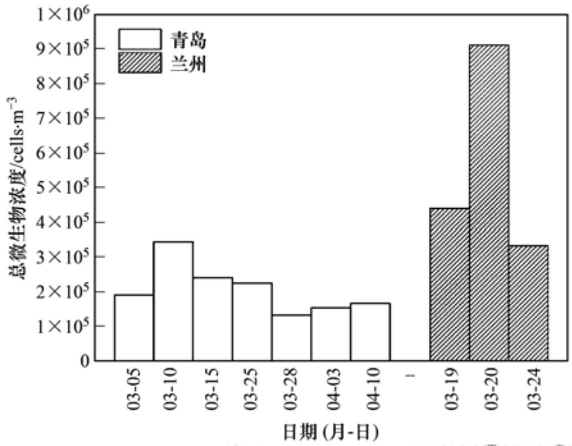

图 2 2015 年 3 ~ 4 月青岛及兰州晴天总微生物浓度

Fig. 2 Concentration of airborne microbes on sunny days from March to April 2015 in Qingdao and Lanzhou

2.2 沙尘过程分析

气象资料显示，3 月 27 日 19:00 ~ 20:00 之间在兰州开始出现沙尘天气，减弱于 21:00 ~ 22:00 之间. 图 3(a) 为兰州沙尘发生时 72 h 气团后向轨迹. 兰州此次沙尘主要来自于我国内蒙西部沙漠地区，该区域的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠等地是我国沙尘天气四大源区之一，兰州代表了这一源区的沙尘经过短时间输送到下风向地区的状况[31]，该源区对于兰州属于中等贡献源区[32].

图 4 是兰州沙尘前后几套样品总微生物浓度值（c）及对应的 PM_{10}、$PM_{2.5}$、相对湿度（RH）、风速（WV）、温度（T）随采样时间的变化情况. 3 月 26 日、3 月 27 日 10:00 沙尘未到达，总微生物浓度处于背景值. 19:00 风速从之前的 1 m·s^{-1} 迅速增加到了 5 m·s^{-1}，相对湿度降低，沙尘已经到达，PM_{10} 明显升高，$PM_{2.5}$ 略有下降，总微生物浓度急剧增加超过 1 个数量级，达到了最高值 8.43×10^6 cells·m^{-3}. 21:00，风速开始减弱，RH 也略有回升，但 PM_{10} 仍在积累，达到 477 μg·m^{-3}，总微生物浓度降低至 8.14×10^6 cells·m^{-3}，仍处于很高的水平. 3 月 28 日，PM_{10} 降低至 208 μg·m^{-3}，沙尘过程结束，风速和相对湿度恢复到沙尘前的水平，总微生物浓度为 5.50×10^6 cells·m^{-3}，相比前一天晚上明显降低. 到了 3 月 31 日，虽然 PM_{10} 因为浮尘高于 3 月 28 日，但沙尘过境后污染物传输扩散，总微生物浓度进

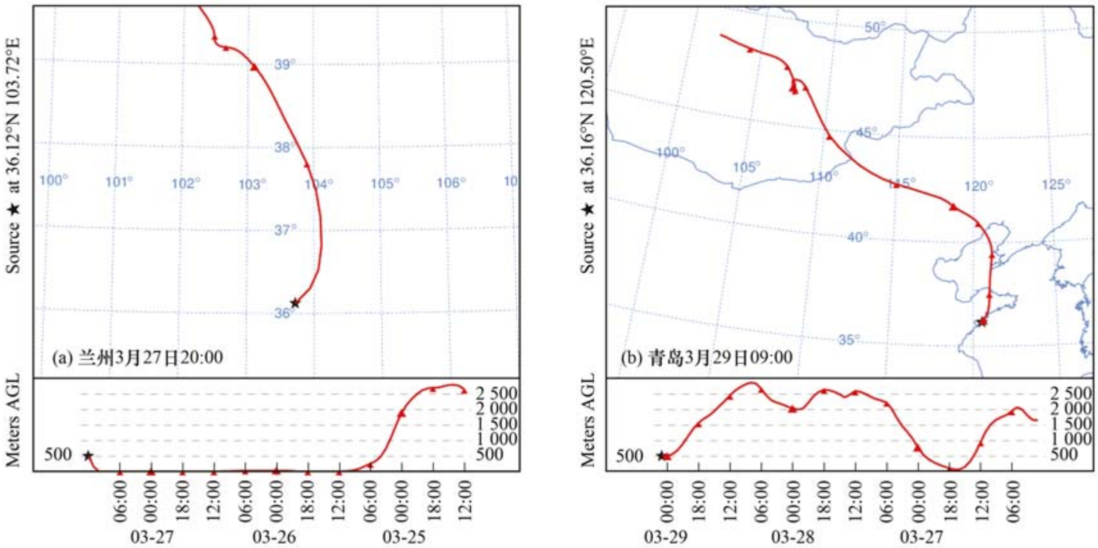

图 3　兰州及青岛沙尘时气团 72 h 后向轨迹

Fig. 3　The 72-h air mass backward trajectories for the two dust events in Lanzhou and Qingdao

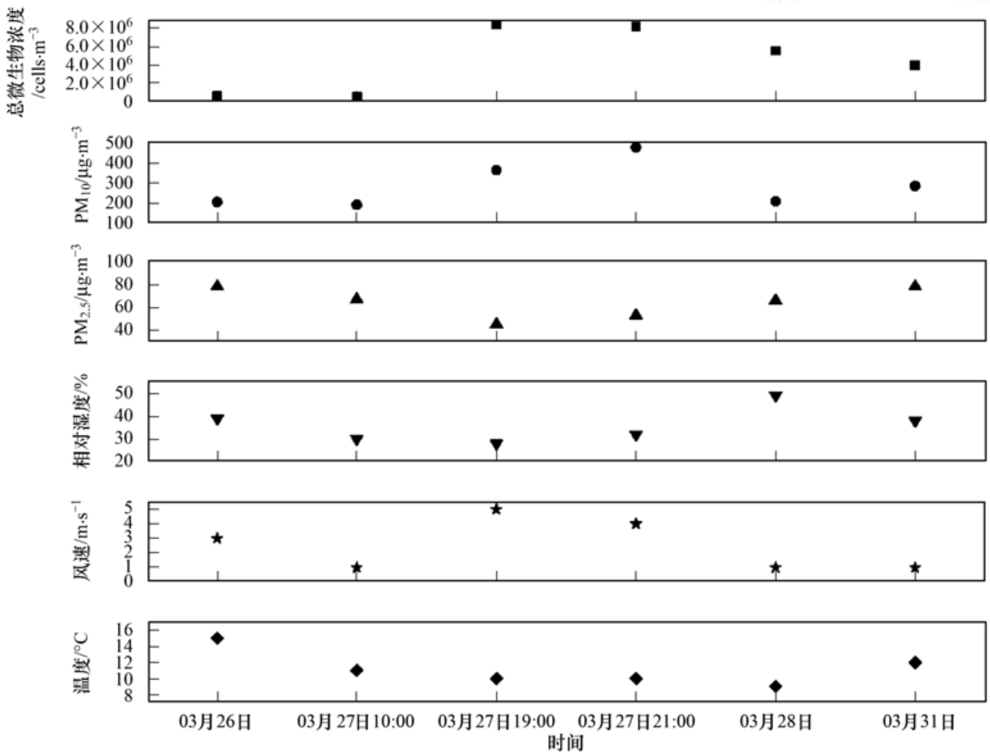

图 4　2015 年 3 月 26 日 ~ 31 日兰州总微生物浓度、PM_{10}、$PM_{2.5}$、相对湿度、风速、温度变化

Fig. 4　Variations in relative humidity, wind velocity, temperature, and concentrations of airborne microbes, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in Lanzhou from March 26 to 31, 2015

一步下降至 3.90×10^6 cells·m^{-3}.

观测期间,青岛也受到一次浮尘天气影响,且持续时间较长,自 3 月 28 日午后开始 PM_{10}上升到 150 μg·m^{-3}以上,AQI 也上升到 150 以上,一直到 3 月 29 日下午 AQI 逐渐降低到 100 以下. 图 3(b)为青岛沙尘发生时 72h 气团后向轨迹. 青岛沙尘盛行来源有偏北路径、西北路径和偏西路径,本次沙尘是由蒙古国-西伯利亚一带随盛行风向远距离传播而来,属于典型的西北路径[33]. 而就在青岛沙尘发生的前一天,新京报报道了青岛上风向的北京出现沙尘天气(http://epaper. bjnews. com. cn/html/2015-03/29/content_568774. htm? div = -1).

图 5 为青岛沙尘前后几套样品总微生物浓度值(c)及对应的 PM_{10}、$PM_{2.5}$、相对湿度(RH)、风速

(WV)、温度(T)随采样时间的变化情况. 3 月 28 日沙尘开始前总微生物浓度处于背景值, PM_{10}、$PM_{2.5}$都处于二级水平,相对湿度超过 90%,3 月 29 日 09:20 青岛浮尘天气已经出现并持续了几个小时,相对湿度迅速降到 66%,PM_{10}由前一日的 86 $\mu g \cdot m^{-3}$飙升到 346 $\mu g \cdot m^{-3}$、$PM_{2.5}$也从 58 $\mu g \cdot m^{-3}$上升到 127 $\mu g \cdot m^{-3}$,总微生物浓度随之上升到 1.04×10^6 $cells \cdot m^{-3}$,由于沙尘到达青岛已经明显减弱,风速并没有明显上升. 到了 13:00 沙尘已过境, PM_{10}、$PM_{2.5}$都已开始下降,相对湿度也开始回升,但风速增大,总微生物浓度较 09:20 更高,达到观测期间最高值 1.88×10^6 $cells \cdot m^{-3}$,可能是由于风速增大,土壤中微生物随地表扬尘悬浮于空气中所致.

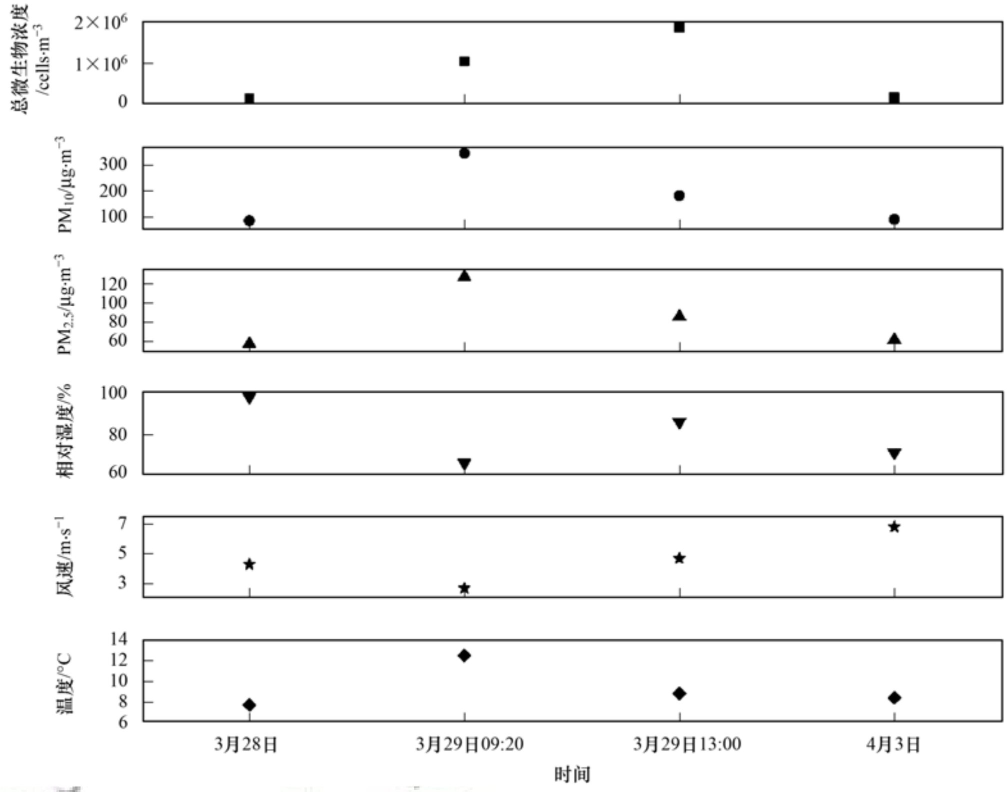

图 5 2015 年 3 月 28 ~ 4 月 3 日青岛总微生物浓度、PM_{10}、$PM_{2.5}$、相对湿度、风速、温度变化

Fig. 5 Variations in relative humidity, wind velocity, temperature, and concentrations of airborne microbes, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in Qingdao from March 28 to April 3, 2015

比较这两次沙尘过程,可以发现沙尘到来时风速均增加、相对湿度均出现明显降低,随着 PM_{10}的显著上升,总微生物浓度均呈现数量级的剧烈增长,这与 Griffin 等[18,22,34]的一系列研究结果相符. 两地观测到的沙尘过程的主要不同在于沙尘强度. 兰州在沙尘到来时风速明显增大、温度略有降低,颗粒物急剧升高,能见度下降,这与凌肖露[35]的研究结果一致. 而青岛远离沙尘源区,沙尘经过长距离传输,到达青岛时风力较小,温度有回升态势,已成为浮尘天气. 虽然能见度资料缺失,但从 PM_{10}可以看出兰州沙尘天气强度大于青岛.

2.3 沙尘对总微生物浓度和粒径分布的影响

为了了解沙尘对空气中微生物浓度和粒径分布的影响,对比了兰州和青岛地区 3 月沙尘过程中样品和晴天样品平均浓度和各粒径微生物平均浓度,如表 2 所示,沙尘发生时,兰州总微生物浓度均值是晴天的 14.8 倍,青岛总微生物浓度均值是晴天的 6.42 倍,两地沙尘时总微生物浓度呈现大幅上升趋势,这与大多研究结果一致[18~26]. 兰州和青岛微生物浓度增加幅度存在显著差异,笔者认为这与两地沙尘强度的差异有关. 有研究发现,微生物浓度与 PM_{10}呈现很好的正相关[19,20,36],沙尘越强,颗粒物越多,总微生物浓度增加越多. 兰州整个观测期间空气中微生物浓度与 PM_{10}呈显著的正相关($P < 0.01$),而青岛则相关性不明显($P > 0.05$),这是兰州沙尘时总微生物浓度升高幅度更大的原因,而青岛沙尘强度较弱,观测期间微生物浓度可能受到了其他因素的影响,但即便如此,沙尘时微生物浓度还

是升高到原来的 6 倍多.

由图 6 可以看出,晴天时兰州和青岛两地样品微生物浓度均呈双峰分布,最高峰值出现在 >7.0 μm 的粗粒径上,所占质量分数分别是 22.2% 和 26.9%；最低值均出现在 4.7 ~7.0 μm 的粒径上,所占质量分数分别为 13.8% 和 9.6%. 青岛样品浓度次高峰值(19.7%)出现在 1.1 ~2.1 μm 的较细粒径上；兰州与青岛不同,次高值(18.7%)出现在 3.3 ~4.7 μm 的中等粒径. 研究发现兰州主城区春季颗粒物粒径主要分布在 5.8 ~10.0 μm 区间范围内,其次为 1.1 ~3.3 μm 粒径[37],与本研究结果相符.

沙尘发生时,总微生物粒径分布发生了明显变化. 兰州沙尘天气时 1.1 ~2.1 μm 和 3.3 ~4.7 μm 两个粒径段微生物浓度升高幅度最大,分别达到 22.8 倍和 18.4 倍,粒径分布仍为双峰分布,但峰值发生移动,最高峰值从 >7.0 μm 移动到了 1.1 ~2.1 μm,细粒径上微生物快速增加；>7.0 μm 粒径的微生物浓度增加为 9.81 倍,所占质量分数(14.8%)明显低于晴天. 而浮尘天气时青岛生物气溶胶粒径呈偏态分布,微生物浓度更多地集中到了 >4.7 μm 的粗粒径,占了总浓度的 75%. 其中 >7.0 μm 粒径上的微生物浓度平均是晴天的 9.17 倍,比例也显著上升到了 38.5%,在所有粒径段中所占比例最高；原先比例最低的 4.7 ~7.0 μm 粒径,微生物浓度迅速增加,上升到了原来的 24.4 倍,所占质量分数上升到 36.5% 成为次高峰值,而细粒径上微生物浓度升高幅度相对小,细粒径所占质量分数也相应降低,且随粒径减小而递减. 这与董立杰等 2015 年春季在青岛的研究结果相符[6].

表 2　晴天与沙尘天生物气溶胶中微生物平均浓度比较1)

Table 2　Comparison of mean concentrations of airborne microbes in bioaerosols on sunny and dusty days

粒径/μm	兰州			青岛		
	晴天(N=3)	沙尘(N=2)	平均浓度比值	晴天(N=5)	沙尘(N=2)	平均浓度比值
0.65 ~1.1	8.59 ±4.22	82.3 ±11.3	9.58	2.59 ±1.14	3.70 ±4.68	1.43
1.1 ~2.1	8.97 ±7.12	205 ±7.43	22.8	4.48 ±3.28	6.13 ±7.43	1.37
2.1 ~3.3	7.88 ±5.60	131 ±49.2	16.6	3.99 ±1.71	10.8 ±9.00	2.70
3.3 ~4.7	10.5 ±5.63	194 ±76.6	18.4	3.37 ±1.79	16.0 ±12.9	4.74
4.7 ~7.0	7.75 ±5.93	94.9 ±20.4	12.2	2.18 ±1.42	53.2 ±2.41	24.4
>7.0	12.5 ±3.60	122 ±45.9	9.81	6.11 ±2.36	56.0 ±53.4	9.17
总浓度	56.2 ±30.7	829 ±20.1	14.8	22.7 ±7.80	146 ±59.2	6.42

1)晴天与沙尘天浓度及标准偏差单位均为 $\times 10^4$ cells·m^{-3},平均浓度比值为沙尘天平均浓度/晴天平均浓度,无量纲

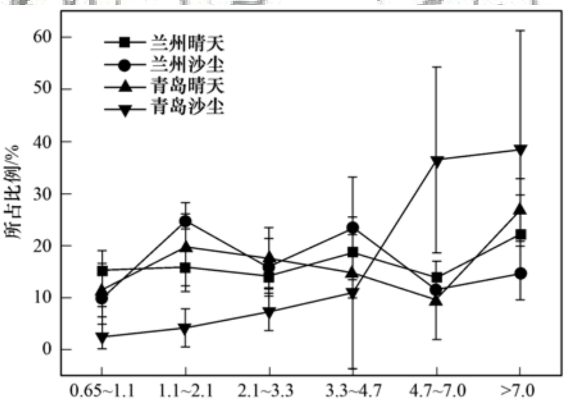

图 6　兰州及青岛晴天与沙尘天生物气溶胶中微生物粒径分布对比

Fig. 6　Comparison of size distributions of microbes in bioaerosols on sunny and dusty days in Lanzhou and Qingdao

不论晴天还是沙尘天,兰州任一粒径上微生物浓度都明显高于青岛,而且沙尘天兰州各粒径段微生物浓度的增加幅度显著大于青岛,其粒径分布变化与青岛有很大不同. 不同来源沙尘对观测地点影响程度的差异主要由源区地理位置和距离观测地点的远近不同造成[38]. 由于兰州更靠近沙尘源区,其地形和气象条件又容易使大气污染物富集,而青岛距离源区相对远,沙尘到达青岛时强度减弱很多,因而兰州微生物增加幅度普遍大于青岛,且随着沙尘长距离传输,不同粒径粒子上的微生物浓度增加不同,导致微生物粒径分布发生变化. 可见,沙尘天气对生物气溶胶中微生物浓度和粒径分布的影响与沙尘强度有关.

2.4　沙尘对微生物负荷的影响

为了了解沙尘过程中微生物来源,笔者计算了兰州和青岛沙尘过程中颗粒物的微生物负荷(表 3). 可以看出,沙尘时总微生物浓度随 PM_{10} 的升高而升高,两地沙尘过程中单位质量 PM_{10} 颗粒物上的微生物负荷都出现显著的上升,沙尘后又明显下降. 兰州沙尘前负荷的背景值是2 224 cells·μg^{-1},沙尘时最高上升到26 442 cells·μg^{-1},沙尘过后回落到13 678 cells·μg^{-1}；青岛沙尘前背景值是1 550

cells·μg^{-1},沙尘时最高上升到10 250 cells·μg^{-1},沙尘过后回落到1 689 cells·μg^{-1}. 可见,沙尘发生时,不论兰州还是青岛,颗粒物的微生物负荷都大为增加($P<0.05$),这说明沙尘天气发生时,微生物浓度的增加不仅仅是因为空气中颗粒物增加因而附着的微生物增加,而是因为长距离传输的沙尘颗粒携带有大量外源微生物. 兰州沙尘时的负荷峰值远高于青岛,说明沙尘越强,沙尘粒子携带的微生物就越多.

表 3 兰州及青岛沙尘前后总微生物浓度、PM_{10}和微生物负荷1)

Table 3 Concentrations of airborne microbes and PM_{10} and the microbial load in PM_{10} during the dust events in Lanzhou and Qingdao

站位	时间 (月-日 T 时)	总浓度 ×10^5 /cells·m^{-3}	PM_{10} /μg·m^{-3}	微生物负荷 /cells·μg^{-1}
兰州	03-27T10:00	4.27	192	2 224
	03-27T19:00	84.3	363	23 220
	03-27T21:00	81.4	477	17 075
	03-28T08:00	55.0	208	26 442
	03-31T08:00	39.0	285	13 678
青岛	03-28T08:00	1.33	86	1 550
	03-29T09:20	10.4	346	3 003
	03-29T13:00	18.8	183	10 250
	04-03T08:00	1.54	91	1 689

1) PM_{10}颗粒上的微生物负荷是总微生物浓度与 PM_{10} 浓度的比值

Yadav 等[39]在印度西北部沙尘天气的观测发现,样品中存在有喜马拉雅地区特有的花粉和孢子品种,推测它们是直接或间接经沙尘传输而来. 韩晨等[40]在青岛的观测发现,沙尘时青岛生物气溶胶中不仅可培养真菌数量大于晴天,真菌群落结构也发生了明显改变,且来自不同沙尘源的沙尘样品中微生物群落结构有较大差异,这与白雪[41]在塔克拉玛干沙漠西缘的观测研究结果一致. 这些发现与本研究的微生物负荷量结果一致,印证了沙尘天气发生时,沙尘颗粒会携带源区微生物长距离传输,会向下风向地区输入外来微生物,而且沙尘强度、传输距离和下风向地区的地理条件都会影响外源微生物的输入量. 可见,沙尘会对下风向地区空气中微生物的浓度、粒径分布和群落结构产生很大影响,既而影响下风向地区生物气溶胶的环境效应和健康效应. 沙尘过程对生物气溶胶的影响值得关注和深入研究.

3 结论

(1)沙尘发生时,生物气溶胶中总微生物浓度显著增加,微生物的粒径分布发生明显变化. 兰州生物气溶胶中微生物仍呈双峰分布,但最高峰值从 >7.0 μm 移动到 1.1 ~ 2.1 μm; 而青岛主要是 > 4.7 μm 的粗粒径上微生物增加,粒径从非沙尘的双峰分布变为粗粒径偏态分布. 沙尘强度越大,对生物气溶胶的影响就越大.

(2)沙尘发生时,不仅颗粒物和生物气溶胶中总微生物浓度增加,颗粒物的微生物负荷也大为增加,说明长距离传输的沙尘颗粒携带有大量微生物,会对下风向地区空气中微生物的浓度、粒径分布产生很大影响.

致谢:感谢西北师范大学苏雪老师及相关人员在兰州提供生物气溶胶采样帮助,感谢中国气象科学研究院王亚强老师提供 MICAPS 填图资料.

参考文献:

[1] Ariya P A, Amyot M. New Directions: the role of bioaerosols in atmospheric chemistry and physics [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(8): 1231-1232.
[2] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al*. Inhalable microorganisms in Beijing's $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(3): 1499-1507.
[3] Ho J, Duncan S. Estimating aerosol hazards from an anthrax letter[J]. Journal of Aerosol Science, 2005, **36**(5-6): 701-719.
[4] Reponen T, Willeke K, Ulevicius V, *et al*. Effect of relative humidity on the aerodynamic diameter and respiratory deposition of fungal spores[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(23): 3967-3974.
[5] 邵聪聪. 霾天青岛大气细菌群落结构特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
[6] 董立杰. 青岛及海洋大气生物气溶胶中总微生物浓度分布特征及其影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
[7] 邵倩. 青岛地区生物气溶胶中微生物活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
[8] 徐文兵, 祁建华, 金川, 等. 青岛近海夏、秋季生物气溶胶分布特征研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 9-17.
Xu W B, Qi J H, Jin C, *et al*. Concentration distribution of bioaerosol in summer and autumn in the Qingdao coastal region [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 9-17.
[9] Li M F, Qi J H, Zhang H D, *et al*. Concentration and size distribution of bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(19): 3812-3819.
[10] 王伟, 付红蕾, 王廷路, 等. 西安市秋季灰霾天气微生物气溶胶的特性研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 279-288.
Wang W, Fu H L, Wang T L, *et al*. Characteristics of microbial aerosols on haze days in Autumn in Xi'an, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(1): 279-288.
[11] Heo K J, Kim H B, Lee B U. Concentration of environmental fungal and bacterial bioaerosols during the monsoon season[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, **77**: 31-37.
[12] Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations-a review[J]. Science of

the Total Environment, 2004, **326**(1-3): 151-180.

[13] 韩晨. 青岛生物气溶胶中可培养微生物的分布特征及其健康风险初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.

[14] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

[15] 耿敏. 青岛地区沙尘天气的特征及成因分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.

[16] Kim N K, Park H J, Kim Y P. Chemical composition change in TSP due to dust storm at Gosan, Korea: do the concentrations of anthropogenic species increase due to dust storm? [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, **204**(1-4): 165-175.

[17] Kellogg C A, Griffin D W, Garrison V H, *et al*. Characterization of aerosolized bacteria and fungi from desert dust events in Mali, west Africa[J]. Aerobiologia, 2004, **20**(2): 99-110.

[18] Griffin D W, Kellogg C A, Garrison V H, *et al*. Atmospheric microbiology in the northern Caribbean during African dust events [J]. Aerobiologia, 2003, **19**(3-4): 143-157.

[19] Jeon E M, Kim H J, Jung K, *et al*. Impact of Asian dust events on airborne bacterial community assessed by molecular analyses [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(25): 4313-4321.

[20] Jeon E M, Kim Y P, Jeong K, *et al*. Impacts of Asian dust events on atmospheric fungal communities [J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 39-50.

[21] Lee S, Choi B, Yi S M, *et al*. Characterization of microbial community during Asian dust events in Korea[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(20): 5308-5314.

[22] Griffin D W, Westphal D L, Gray M A. Airborne microorganisms in the African desert dust corridor over the mid-Atlantic ridge, Ocean Drilling Program, Leg 209[J]. Aerobiologia, 2006, **22**(3): 211-226.

[23] Soleimani Z, Goudarzi G, Sorooshian A, *et al*. Impact of Middle Eastern dust storms on indoor and outdoor composition of bioaerosol[J]. Atmospheric Environment, 2016, **138**: 135-143.

[24] Schlesinger P, Mamane Y, Grishkan I. Transport of microorganisms to Israel during Saharan dust events[J]. Aerobiologia, 2006, **22**(4): 259-273.

[25] Yuan H L, Zhang D Z, Shi Y N, *et al*. Cell concentration, viability and culture composition of airborne bacteria during a dust event in Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **55**: 33-40.

[26] 任启文. 北京市绿地空气微生物浓度的变化特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.

[27] 郭勇涛, 辛金元, 李旭, 等. 沙尘对兰州市大气环境质量的影响[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(4): 977-982.
Guo Y T, Xin J Y, Li X, *et al*. Characteristics of dust events and their influence on air quality of Lanzhou, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, **35**(4): 977-982.

[28] 褚润, 张国珍, 谢红刚. 兰州市大气污染成因分析[J]. 兰州交通大学学报, 2006, **25**(4): 59-62.

[29] 张凯, 高会旺, 张仁健, 等. 我国沙尘的来源、移动路径及对东部海域的影响[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(6): 627-636.

[30] Dong L J, Qi J H, Shao C C, *et al*. Concentration and size distribution of total airborne microbes in hazy and foggy weather [J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 1011-1018.

[31] 奚晓霞, 李杰, 权建农. 兰州市春季沙尘气溶胶质量浓度的若干研究[J]. 干旱区研究, 2004, **21**(2): 112-116.

[32] 刘娜, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州春季沙尘过程 PM_{10} 输送路径及其潜在源区[J]. 大气科学学报, 2012, **35**(4): 477-486.
Liu N, Yu Y, Chen J B, *et al*. A study on potential sources and transportation pathways of PM_{10} in spring in Lanzhou [J]. Transactions of Atmospheric Science, 2012, **35**(4): 477-486.

[33] 耿敏, 盛立芳. 青岛地区沙尘天气特征分析[J]. 山东气象, 2006, **26**(4): 6-8.

[34] Griffin D W, Kubilay N, Koçak K M, *et al*. Airborne desert dust and aeromicrobiology over the Turkish Mediterranean coastline [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(19): 4050-4062.

[35] 凌肖露. 沙尘气溶胶对中国半干旱区近地层气象要素影响的特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.

[36] 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.

[37] 程慧波. 兰州市主城区大气颗粒物污染特征和健康风险研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.

[38] 冯鑫媛. 兰州不同粒径颗粒物污染特征及沙尘天气对其影响的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.

[39] Yadav S, Chauhan M S, Sharma A. Characterisation of bio-aerosols during dust storm period in N-NW India [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(28): 6063-6073.

[40] 韩晨, 祁建华, 谢绵测, 等. 青岛近海春季沙尘天空气可培养真菌及其潜在健康风险[J]. 城市环境与城市生态, 2015, **28**(4): 18-23.
Han C, Qi J H, Xie M C, *et al*. Cultivable fungi in spring sandy dust air in Qingdao coastal region and their potential health risk [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015, **28**(4): 18-23.

[41] 白雪. 塔克拉玛干沙漠西缘沙尘天气过程中空气微生物群落多样性[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.

HUANJING KEXUE Vol. 38 No. 8
Environmental Science (monthly) Aug. 15, 2017

CONTENTS