

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小峰, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化

祁建华^{1,2}, 武丽婧^{1,2}, 高冬梅^{1,2}, 金川^{1,2}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 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: 为了研究近海生物气溶胶中可培养微生物浓度和群落多样性, 于2009年7月~2010年6月在青岛两个采样点连续采集生物气溶胶样品, 分析了其中陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌的浓度, 并计算了Shannon-Weiner指数、Simpson's指数和Pielou指数。结果表明, 陆源细菌和海源细菌月均浓度分别为12~436 CFU·m⁻³和25~561 CFU·m⁻³, 陆源真菌和海源真菌月均浓度分别为0~817 CFU·m⁻³和11~1346 CFU·m⁻³之间。陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌浓度在冬季月份较低, 2月达到最低值, 在春夏月份较高。海源微生物对总可培养类微生物的贡献高于陆源, 平均占63%。可培养微生物物种数在17~102之间, 与微生物浓度具有一定的相关性, 但并未呈现出明显的季节变化。3种指数表明, 生物气溶胶中陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌的群落结构在2月最简单, 1月、11月和5月群落多样性较高, 群落多样性与浓度的季节变化特征并不一致, 而且不同类别的微生物群落存在季节和空间差异。

关键词: 生物气溶胶; 群落多样性; 细菌; 真菌; 青岛

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0801-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.001

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region

QI Jian-hua^{1,2}, WU Li-jing^{1,2}, GAO Dong-mei^{1,2}, JIN Chuan^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Bioaerosol samples were collected in Qingdao coastal region during July 2009 - June 2010 to investigate the concentration and community diversity of microbes in bioaerosols. Microbe concentrations (bacteria and fungi) in marine and terrestrial bioaerosols were determined and diversity indices including Shannon-Weiner index, Simpson's index and Pielou index were calculated in this study. Monthly average concentrations of terrestrial bacteria, marine bacteria, terrestrial fungi and marine fungi were in the ranges of 12-436 CFU·m⁻³, 25-561 CFU·m⁻³, 0-817 CFU·m⁻³ and 11-1346 CFU·m⁻³, respectively. There were consistent seasonal variations of these four types of microbe, with higher concentrations in spring and summer and lowest during winter, especially in February. Compared to terrestrial microbes, marine microbes account for higher proportion to the total culturable microbes, with a percentage of 63%. The number of microbial species varied from 17 to 102, and was partially correlated with microbial concentrations, however, it did not show obvious seasonal variation. Based on the analysis of calculated diversity indices, we found that the community diversities of four types of microbe were much higher in January, November and May than in February. The community diversity varied with the season, space and different microbial species, and showed a different seasonal variation from the microbial concentration.

Key words: bioaerosols; community diversity; bacteria; fungi; Qingdao

生物气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 对空气质量和人体健康具有明显的影响^[1,2]。生物气溶胶还可以改变大气中冰核(ice nuclei, IN)和云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)的数量和特性^[3-8], 进而影响云量和气候变化。生物气溶胶主要由含有微生物或生物大分子等生命活性物质的生物微粒组成, 包括细菌、真菌、病毒、花粉、孢子、动植物碎裂分解体等具有生命活性的粒子^[9,10]。而微生物是生物气溶胶中重要的组成部分, 其微生物群落可以反映生物气溶胶中微生物的种类、数量和

组成特征, 不同的群落结构对空气质量和人体健康的影响不同, 同时微生物群落的变化也可以反映出环境因素对空气质量的影响。因此, 研究微生物群落多样性对于全面评价生物气溶胶对于人体健康、环境空气质量及气候变化的影响具有重要的意义。

目前国内外对生物气溶胶中微生物群落特征和

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375143); 山东省自然科学基金项目(ZR2012DM003)

作者简介: 祁建华(1973~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气气溶胶环境效应, E-mail: qjianhua@ouc.edu.cn

多样性所展开的研究中, Jeon 等^[11]在韩国观察到生物气溶胶中的细菌群落在亚洲沙尘事件中发生了突然改变. Maki 等^[12]调查了日本 Suzu 城生物气溶胶中耐盐细菌的群落结构, 发现微生物群落在 600 m 和 10 m 高度相差较大, 600 m 高度的微生物群落虽然没有 10 m 的丰富, 但是具有独特的微生物种类, 可能源于长距离传输的沙尘. Lee 等^[13]分析了 2007 年中秋到冬末朝鲜半岛中部生物气溶胶中细菌和真菌的群落特征, 研究发现颗粒物中细菌和真菌的多样性很高, 包括潜在病原体和过敏原; 细菌和真菌群落的多样性存在季节变化. Bowers 等^[14]发现生物气溶胶在近地表层 $>0.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子中占了很大的比例(平均 22%), 细菌群落组成具有明显的季节变化, 这种变化主要原因是不同季节的局地陆源环境的差异, 而不是季节更替的大气条件. Munday 等^[15]收集了不同高度(最高到 150 m)的生物气溶胶样品, 鉴定出 15 个细菌种群, 细菌群落具有高多样性, 而且群落多样性随高度而降低. 郑芷青等^[16]对珠三角城市群气溶胶的研究指出, 城市细菌的多样性趋势为: 交通枢纽 $>$ 工业区 $>$ 商业区 $>$ 居住区 $>$ 绿化带. 夏晓敏等^[17]发现厦门空气气溶胶中的细菌类群主要由厚壁菌门及变形细菌门的细菌构成, 与其他城市相比厦门的空气细菌多样性较低. 已有的研究表明, 不同地区的生物气溶胶微生物群落都具有一定的多样性, 群落组成具有明显的空间变化, 且群落多样性随采样高度和沙尘等特殊天气而变化, 但目前关于生物气溶胶群落多样性的季节变化特征仍很缺乏, 尤其是沿海生物气溶胶. 因此, 研究沿海地区生物气溶胶中微生物的群落多样性对于全面了解生物气溶胶的环境效应尤为重要.

本研究基于 2009 年 7 月 ~ 2010 年 6 月在青岛地区连续采集的生物气溶胶样品, 测定了样品中陆源和海源细菌及真菌的浓度, 系统分析了青岛近海地区生物气溶胶中群落多样性的季节变化.

1 材料与方法

1.1 样品采集

在青岛地区设置了两个生物气溶胶采样点(图 1), 一个采样点位于中国海洋大学鱼山校区测试中心楼顶($36^{\circ}03'N$, $120^{\circ}19'E$, 距地面高度约为 7.0 m), 距海边 1.0 km 左右, 附近为居民生活区, 四周绿地面积约为 50%; 另一个采样点位于中国海洋大学崂山校区教学楼六区楼顶($36^{\circ}09'N$, $120^{\circ}29'E$, 距

地面高度约 9.0 m), 离海 7 km, 四周为学校教学区, 绿地面积可达 50%.

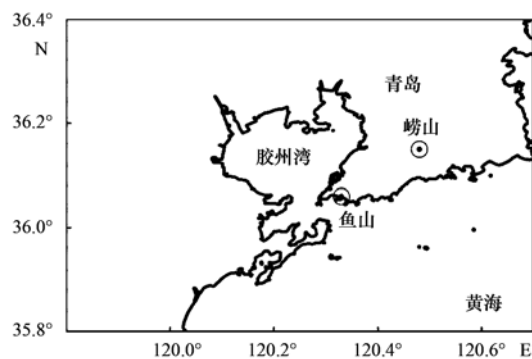


图 1 采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling site

于 2009 年 7 月 ~ 2010 年 6 月在两个采样点运用 FA-1 筛孔撞击式空气微生物采样器(辽阳康洁仪器研究所)采集可培养类微生物样品. 每月分别在上、中、下旬采样一次, 每次间隔 10 d 左右; 采样时间为早上 08:00. 在沙尘天气时加采样品. 采样器高度为 1.5 m, 采样流量为 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 可培养陆源细菌和可培养海源细菌样品的采集时间为 8 min, 可培养陆源真菌和可培养海源真菌样品的采集时间为 5 min; 总微生物样品的采集时间为 30 min^[18].

采用 9.0 cm 的玻璃平板进行生物气溶胶收集, 平板灭菌后在无菌条件下加入 20 mL 的培养基. 陆源细菌、陆源真菌、海源细菌和海源真菌样品的培养基以及培养条件见表 1^[19]. 培养结束后分别对各级采样平板进行菌落计数以及形态观察.

表 1 四类微生物的培养基以及培养条件

采集样品	培养基	采样时间 /min	培养温度 /°C	培养时间 /h
陆源细菌	牛肉膏蛋白胨培养基	8	37	48 ~ 72
陆源真菌	马丁氏培养基	5	27	72 ~ 96
海源细菌	2216E 培养基	8	28	48 ~ 72
海源真菌	通用真菌培养基	5	25	72 ~ 96

1.2 浓度计算

运用 Macher^[20]提出的方法, 对空气中细菌和真菌浓度进行了校正, 并依据下式计算了生物气溶胶中微生物浓度:

$$c_i = \frac{N_i}{Q \cdot t} \times 1000 \quad (1)$$

$$c = \sum c_i, \quad N = \sum N_i \quad (2)$$

式中, c_i 和 c 分别为采样器各级和 6 级总微生物浓

度($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$); N_i 和 N 分别为采样器各级和 6 级总菌数(CFU); Q 为采样器空气流量($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为采样时间(min).

1.3 指数计算

香农多样性指数 H' 和辛普森指数 D 的计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (4)$$

式中, S 表示总的物种数, p_i 表示第 i 个种占总数的比例.

Pielou 均一度指数用 J 表示:

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}} \quad (5)$$

式中, H' 为香农指数, $H'_{\max}$ 是 H' 的最大值.

2 结果与讨论

2.1 青岛近海生物气溶胶中可培养类微生物浓度月变化特征

2009 年 7 月 ~ 2010 年 6 月在青岛鱼山采样点和崂山采样点采集了可培养生物气溶胶样品, 通过对每月上、中、下旬的样品进行体积加权平均, 得到陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌的月平均浓度值.

2.1.1 青岛近海生物气溶胶中可培养细菌浓度的月际变化特征

图 2(a) 为 2009 年 7 月 ~ 2010 年 6 月鱼山采样点陆源细菌及海源细菌的月平均浓度变化. 鱼山生物气溶胶中陆源细菌浓度与海源细菌的相关性系数为 0.902, 在 $P < 0.01$ 水平上显著相关. 鱼山采样点陆源和海源细菌月浓度变化范围分别为 $9 \sim 375 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $25 \sim 532 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 陆源细菌及海源细菌月平均浓度最高值均出现在 2009 年 12 月, 其他月份中 5 月较高, 2 月和 6 月浓度较低. 从图 2(b) 中可以看出, 崂山陆源细菌的月均浓度最高值出现在 2009 年 12 月, 为 $436 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 随后 9 ~ 10 月出现较高值, 最低值 $22 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 出现在 6 月, 2 ~ 4 月浓度也较低. 海源细菌 5 月浓度最高, 为 $561 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 12 月浓度较高 ($474 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$), 6 月浓度最低, 仅为 $40 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 尽管两个采样点陆源细菌和海源细菌的变化不尽相同, 但是 12 月均出现了浓度高值, 这是因为 12 月 26 日采集到沙尘样品, 研究发现沙尘期间生物气溶胶浓度会显著增加^[18,21], 所

以引起 12 月浓度明显高于其它月份. 2010 年 2 月温度相对较低 ($-2.5 \sim 3^\circ\text{C}$), 不适于微生物的存活, 所以细菌出现了最低值. 4 月 5 日、16 日, 6 月 5 日、16 日样品采集时均有不同程度的雾, 研究表明空气细菌浓度受雾滴的温度、化学组成和酸碱度的影响较大^[22], 因此 4 月、6 月细菌浓度也较低. 5 月平均气温为 $14 \sim 19^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $55\% \sim 86\%$, 气候适宜微生物的生存, 而且春季植被生长繁茂, 微生物的来源较多, 这是 5 月出现高浓度细菌的原因. 两个采样点陆源和海源细菌浓度的月际变化具有一定差异性, Adhikari 等^[23] 的研究表明不同采样点对生物气溶胶的分布有着影响, 可能是因为微生物来源和环境因素的不同.

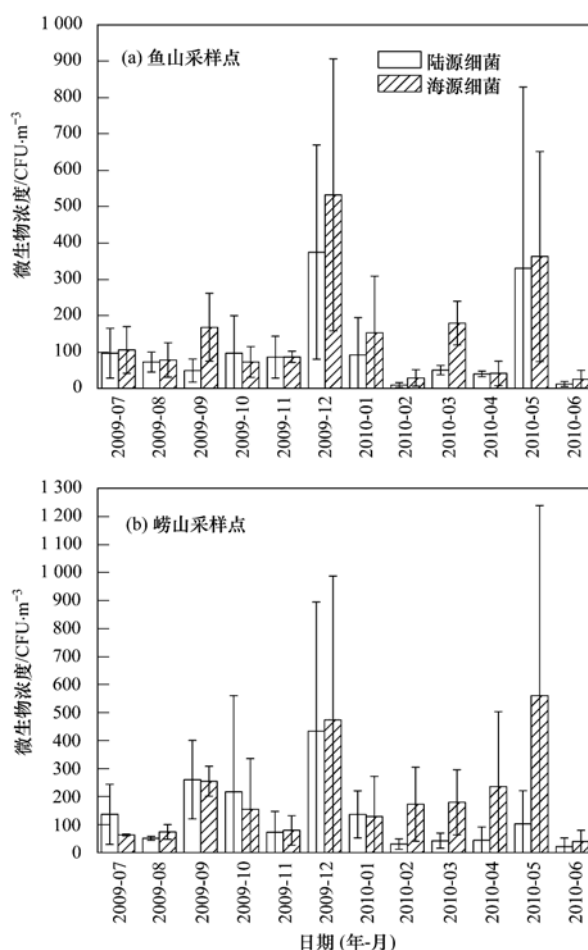


图 2 青岛近海生物气溶胶中细菌浓度的月变化

Fig. 2 Monthly variation of bacterial concentrations in the Qingdao coastal region

鱼山和崂山采样点生物气溶胶中海源细菌占总细菌的平均百分比为 60.1% 和 61.0%, 海源细菌的贡献高于陆源细菌, 可见青岛沿海区域的生物气溶胶组成明显受到海洋的影响.

2.1.2 青岛近海生物气溶胶中可培养真菌浓度的月际变化特征

图3(a)为2009年7月~2010年6月鱼山采样点陆源和海源真菌浓度的月变化,从中可以看出鱼山生物气溶胶中陆源真菌月平均浓度最高值出现在2010年5月,最低值出现在2009年10月和2010年3月,月平均浓度变化范围为 $0 \sim 516 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 而海源真菌月平均浓度最高值出现在2009年10月,最低值出现在2010年2月,月平均浓度变化范围为 $11 \sim 805 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 图3(b)为崂山采样点陆源真菌和海源真菌浓度的月变化特征. 崂山陆源真菌浓度的变化与鱼山类似,在2009年10月和2010年2月和3月的陆源真菌浓度最低,均为 $2 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,从2010年4月起浓度开始升高,在6月到最高值,817 $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 崂山生物采样点海源真菌浓度在 $100 \sim 1346 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,月变化与鱼山采样点类似,浓度最高值出现在2009年10月,最低值出现在2010年2月,在9月、5月浓度都较高.

2009年5月陆源和海源真菌的浓度都很高,此时气候适宜微生物的生存,而且春季植被生长繁茂,造成真菌浓度增加. 2009年10月两个采样点海源真菌浓度很高,与之前对青岛生物气溶胶的研究结果一致^[19],采样期间盛行东南风,由海洋吹向陆地,这可能是海源真菌浓度很高而陆源真菌浓度很低的原因. 2009年8月、9月海源和陆源真菌浓度相对较高,是因为当地夏季温度较高,平均为 24°C ,适于真菌粒子的生长. 已有的研究也发现,在一定的环境温度范围内,真菌更容易在较高温度下存活,而在低温时则受到抑制^[18,24,25]. 因此真菌在夏季浓度较高,而在温度很低的2月出现了浓度的低值. 如前所述,6月因为出现了雾天,细菌浓度受到影响出现了较低值,而真菌浓度较高,这是因为真菌孢子对极端天气的耐受力要强于细菌^[26]. 鱼山采样点2009年12月陆源真菌浓度高达 $494 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,与细菌类似,浓度增大可能与12月26号采集到的沙尘样品有关. 但是崂山采样点陆源真菌浓度的增加远没有鱼山显著. 总体而言,崂山采样点陆源和海源真菌月平均浓度略高于鱼山. 除个别月份,崂山采样点生物气溶胶中真菌的月变化与鱼山采样点相近,这表明真菌浓度的分布具有一定的规律性,但是也存在空间分布差异,表明真菌浓度受到不同地区来源和环境因素的影响.

鱼山和崂山采样点生物气溶胶中海源真菌占总真菌的平均百分比为59.1%和71.2%,海源真菌的

贡献高于陆源细菌,可见海洋对沿海区域的生物气溶胶组成有明显的影响,与已有的研究结果一致^[19,27].

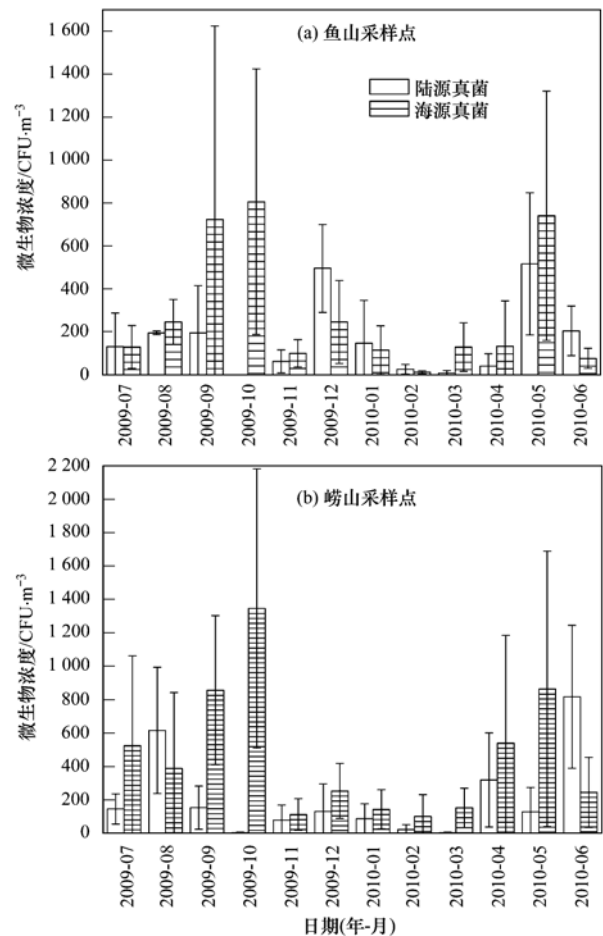


图3 青岛近海生物气溶胶中真菌浓度的月变化

Fig. 3 Monthly variation of fungi concentrations in the Qingdao coastal region

2.2 青岛近海生物气溶胶中可培养微生物群落的月季特征

2.2.1 青岛近海生物气溶胶总可培养微生物群落的月季分布

2009年11月~2010年6月青岛近海生物气溶胶中总可培养微生物浓度(细菌和真菌浓度之和)及物种数随月份变化较大. 鱼山采样点2010年2月可培养微生物浓度最低,为 $73 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,微生物物种数目最少,为17. 5月可培养微生物浓度最高,达 $1948 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,微生物物种数最高,为102. 崂山采样点的微生物物种数变化与鱼山物类似,2月最低,6月最高,变化范围为 $39 \sim 90$. 2009年12月鱼山和崂山采样点的微生物浓度很高,相应的物种数也很高,分别为102和88,比11月增加59%和57%,可见沙尘天气不仅对微生物浓度影响显著,而

且对微生物物种数目的增加也起到显著作用, 沙尘期间应该有外来微生物长距离输入研究区域. Jeon 等^[11]在韩国观察到生物气溶胶中的细菌群落在亚洲沙尘事件中发生了突然改变. 研究发现, 沙尘传输过几百乃至几千公里后, 耐盐菌成为生物气溶胶中微生物的典型种类^[28,29]. 可见, 沙尘天气对生物气溶胶中微生物群落结构及优势微生物的影响非常大. 除个别月份外, 两个采样点可培养微生物浓度和物种数目的变化趋势类似. 鱼山和崂山采样点可培养微生物月平均浓度和物种数目的相关系数分别为 0.835 和 0.827, 均在 $P < 0.01$ 水平上显著相关.

从季节上看, 鱼山采样点可培养微生物浓度的季节分布为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季, 而崂山采样点与鱼山不同, 可培养微生物浓度秋季与春季接近, 略高于夏季, 而冬季最低, 这是因为夏季气温高、紫外线强, 而秋季气候温和、适宜微生物的生长繁殖. 两个采样点可培养微生物浓度都是秋季较高, 与之前对青岛^[30]、广州^[31]和北京^[32]的研究结果一致. Adhikari 等^[33]也在美国俄亥俄州观察到真菌浓度的最高值出现在秋季. 另外一些研究发现生物气溶胶中可培养微生物浓度在夏季出现浓度最大值, 而

冬季和春季浓度较低^[34~36], 这是因为这些地区夏季温度较高适宜微生物生长所致. 可见, 生物气溶胶中可培养微生物浓度的季节分布特征因不同地区的气象条件不同而存在显著的空间差别.

鱼山采样点可培养微生物浓度春季为 $855 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显高于冬季的 $741 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 但物种数相差不大, 春、冬季分别为 67 和 64. 与鱼山类似, 崂山可培养微生物浓度也是春季高于冬季, 浓度分别为 $1057 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $703 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 物种数也是春季 (72) 高于冬季 (67). 由此可见, 与微生物浓度存在显著的季节变化不同, 物种数的季节变化并不明显. 崂山采样点季节平均的微生物物种数目略高于鱼山采样点.

图 4 是 2009 年 11 月 ~ 2010 年 6 月青岛近海生物气溶胶中可培养微生物的 3 种多样性指数的月际分布. Shannon-Weiner 指数通常多用于反映群落的复杂程度, 指数越大, 则群落越复杂, 对环境的反馈功能越强, 从而使群落得到较大的缓冲, 更趋于稳定. Simpson's 指数即优势度指数, 指数越大群落多样性越高. Pielou 指数即均匀度指数, 反映了各物种个体数目分配的均匀程度, 指数越大, 物种数目分配

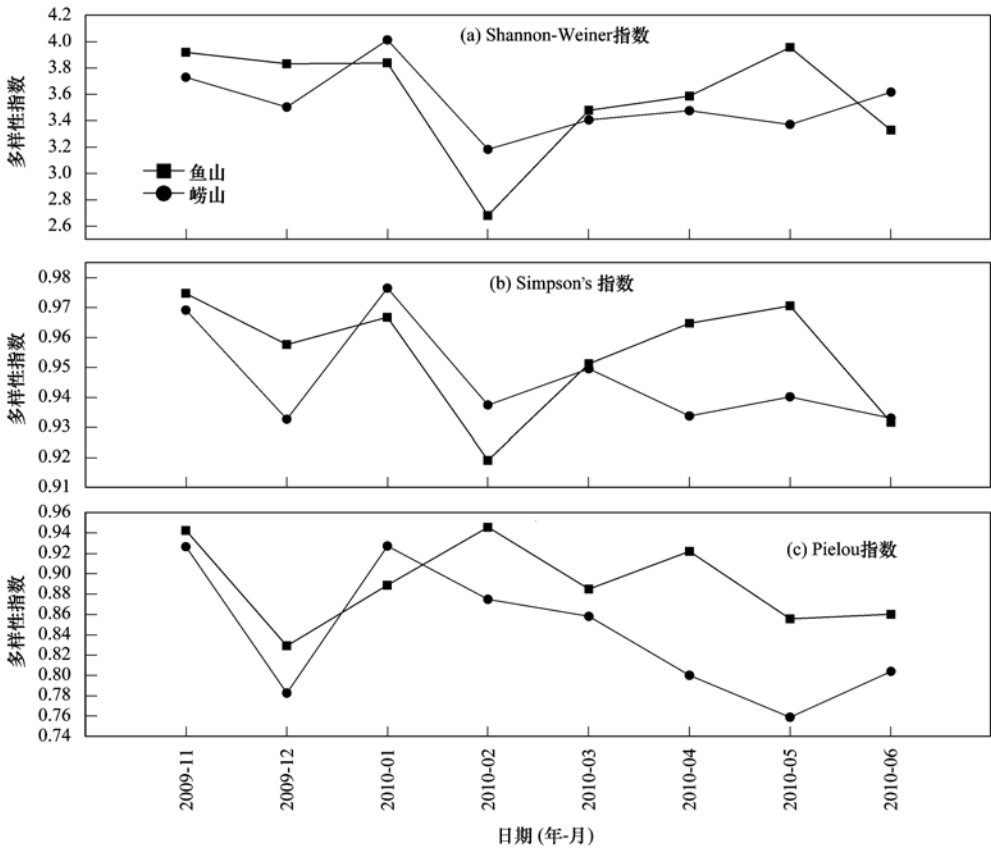


图 4 青岛近海生物气溶胶中可培养微生物多样性指数的月际变化

Fig. 4 Monthly variation of the diversity index of total culturable microbes in the Qingdao coastal region

越均匀. 由图 4(a) 可以看出, Shannon-Weiner 指数 2010 年 1 月、2 月和 6 月崂山采样点的 Shannon-Weiner 指数大于鱼山, 其他月份则是鱼山采样点的指数更大, 而且鱼山采样点的物种数高于崂山, 说明该区域的微生物群落相对复杂. 鱼山和崂山采样点可培养微生物的 Shannon-Weiner 指数分别在 2.68 ~ 3.99 和 3.14 ~ 3.89 之间, 月际分布并不完全相同. 两个采样点 Shannon-Weiner 指数最低值都出现于 2012 年 2 月, 鱼山采样点的 Shannon-Weiner 指数 5 月最高, 11 月次之, 而崂山采样点则是 1 月最高, 11 月和 6 月次之.

2010 年 2 月两个采样点的微生物浓度和物种数目最低, 所以 Shannon-Weiner 指数也是最低. 11 月份鱼山和崂山的物种数分别是 64 和 56, 但是 Simpson's 指数和 Pielou 指数都很高, 说明物种数目分布均匀、优势菌较少, 所以群落多样性高, 相应地 Shannon-Weiner 指数也较高. 2009 年 12 月和 2010 年 5 月, 崂山采样点的微生物浓度和物种数目都属于较高水平, 但是其 Shannon-Weiner 指数并不是最高. 从图 4(b) 和 4(c) 可以看出 12 月的 Simpson's 指数和 Pielou 指数较低, 说明该月份优势菌较多而且各物种数目分配的不均匀, 所以微生物浓度虽然高, 但是群落反而相对简单, 多样性不高. 鱼山采样点 5 月份物种数高达 102, 远高于崂山 (85), 而且鱼山的 Simpson's 指数和 Pielou 指数都明显高于崂山, 说明鱼山物种数比崂山分布均匀而且群落多样性高, 所以鱼山 Shannon-Weiner 指数在 5 月出现了最大值但崂山 Shannon-Weiner 指数较低. 2010 年 1 月两个采样点的微生物浓度并不高, 但是 3 种指数都很高, 而且物种数目相对较高, 说明物种分布相对均匀, 优势菌相对较少, 群落多样性高.

鱼山和崂山采样点的 Pielou 指数和微生物浓度的相关性系数分别为 -0.773 和 -0.858 , 在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上呈显著负相关, 这说明微生物浓度大的月份往往存在优势度较大的菌种, 导致 Pielou 指数降低, 如 2009 年 12 月和 2010 年 5 月两采样点的样品; 而 2009 年 11 月和 2010 年 2 月微生物浓度较小, Pielou 指数较高, 说明物种分配比较均匀. 除了 2010 年 1 月, 鱼山采样点的 Pielou 指数均高于崂山采样点, 这说明鱼山采样点微生物群落中物种分配比崂山相对均匀.

除个别月, 崂山采样点可培养微生物浓度高于鱼山, 但是微生物物种数、Shannon-Weiner 指数和 Simpson's 指数低于鱼山, 这表明崂山采样点优势菌

对微生物浓度的贡献高于鱼山, 而鱼山采样点的群落比崂山采样点多样性更高, 群落更复杂、稳定.

2.2.2 青岛近海生物气溶胶中不同类别微生物的群落的月际变化

从表 2 可知, 2009 年 11 月 ~ 2010 年 6 月, 陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌的物种数随着月季变化很大. 由表 2 可知, 青岛近海生物气溶胶中不同来源可培养微生物浓度和物种数基本上呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其中崂山采样点陆源真菌浓度和物种数的相关性在 $P < 0.01$ 程度上呈显著正相关; 鱼山采样点海源细菌浓度和物种数并不相关. 这说明当不同季节, 生物气溶胶来源和环境条件不同, 引起生物气溶胶中微生物物种增加或减少的时候, 通常会引起微生物浓度升高或降低.

两个采样点陆源细菌的物种数略高于海洋细菌 (表 3), 其 Shannon-Weiner 指数、Simpson's 指数和 Pielou 指数均略高于海洋细菌, 与海源细菌相比, 陆源细菌的微生物群落中物种数分布均匀, 优势菌相对较少, 生物多样性高, 群落较复杂. 崂山采样点的陆源、海源物种数和生物多样性略高于鱼山. 与总可培养微生物类似, 鱼山样点陆源和海源细菌的 Shannon-Weiner 指数最低值都出现于 2 月, 这是因为 2 月温度低, 不利于微生物生长, 来源少, 微生物浓度和物种数目最低. 而崂山采样点的情况较为复杂, 陆源细菌的 Shannon-Weiner 指数在 6 月出现最低值, 而海源细菌在 12 月出现了最低值. 这是因为 6 月陆源细菌的物种数最低, 只有 11, 而且 Simpson's 指数较低, 说明微生物种类少, 而且存在优势菌, 所以 6 月微生物群落多样性很低. 12 月海源细菌虽然浓度高但物种数为 19, Simpson's 指数和 Pielou 指数分别为 0.76 和 0.68, 远低于其它月份, 说明微生物种类较少, 而且物种数分配不均匀, 优势菌相对较多, 因此微生物群落相对简单, 多样性低. 鱼山采样点陆源和海源细菌 Shannon-Weiner 指数的最高值分别出现在 12 月和 11 月, 而物种数分别为 16 和 30, 崂山采样点陆源和海源细菌 Shannon-Weiner 指数的最高值出现在 1 月和 2 月. 陆源和海源细菌在相应月份的物种数较高, 而且 Simpson's 指数和 Pielou 指数都很高, 表明微生物物种数分布均匀, 优势菌相对较少, 群落相对复杂, 生物多样性高. 可见, 陆源和海源细菌的群落特征和变化并不完全相同, 而且两个采样点也因为来源和环境条件的不同而存在空间差异.

除了鱼山冬季外, 两个采样点海源真菌的物种

数和 Shannon-Weiner 指数均为略高于陆源真菌,这表明海源真菌的群落结构比陆源真菌较为复杂、多样性更高. 两个采样点陆源真菌和海源真菌的物种数随季节变化较大,没有明显的贡献优势. 两个采样点陆源真菌的 Shannon-Weiner 指数都是在 12 月最高,这是因为 12 月陆源真菌物种数很高, Simpson's 指数和 Pielou 指数也很高,表明微生物物种分布均匀,多样性高. 鱼山和崂山采样点陆源真菌 Shannon-Weiner 指数的最低值分别出现在 3 月和 2 月,因为物种数很低,分别为 3 和 2,所以微

生物群落多样性很低. 鱼山和崂山海源真菌 Shannon-Weiner 指数的最高值分别出现在 5 月和 6 月,这是因为相应月份物种丰富,物种数高达 33 和 30,而且 Simpson's 指数和 Pielou 指数也很高,表面物种数分布均匀,微生物群落比较复杂. 鱼山和崂山海源真菌 Shannon-Weiner 指数的最低值均出现在 2 月,如前所述,是因为 2 月物种数非常低,因此微生物群落简单. 同样,陆源和海源细菌的群落特征和变化并不完全相同,而且两个采样点也存在空间差异.

表 2 青岛近海生物气溶胶中不同来源可培养微生物的浓度和物种数目相关性

Table 2 Correlation of different kinds of culturable microbial concentration and species number in the Qingdao coastal region				
采样点	陆源细菌	海源细菌	陆源真菌	海源真菌
鱼山采样点微生物浓度和物种数目相关性	0.732	0.407	0.697	0.739
崂山采样点微生物浓度和物种数目相关性	0.657	0.681	0.910	0.718

表 3 采样点各类微生物的物种数和 3 种多样性指数

Table 3 Species number and three diversity indexes of different kinds of microbes in the sampling sites						
项目	采样点	指标	物种数	Shannon-Weiner 指数	Pielou 指数	Simpson's 指数
陆源细菌	鱼山	范围	4 ~ 30	1.39 ~ 2.77	0.76 ~ 1.00	0.75 ~ 0.92
		平均	17	2.33	0.90	0.87
	崂山	范围	11 ~ 30	2.35 ~ 3.14	0.72 ~ 1.02	0.82 ~ 0.95
		平均	19	2.60	0.91	0.88
海源细菌	鱼山	范围	5 ~ 20	1.50 ~ 2.50	0.72 ~ 0.96	0.76 ~ 0.89
		平均	14	2.20	0.87	0.85
	崂山	范围	12 ~ 19	2.01 ~ 2.42	0.68 ~ 0.93	0.77 ~ 0.89
		平均	15	2.26	0.83	0.86
陆源真菌	鱼山	范围	3 ~ 36	1.10 ~ 3.00	0.80 ~ 1.00	0.67 ~ 0.93
		平均	16	2.22	0.90	0.84
	崂山	范围	2 ~ 37	0.69 ~ 2.76	0.76 ~ 1.00	0.50 ~ 0.93
		平均	16	2.11	0.88	0.82
海源真菌	鱼山	范围	2 ~ 33	0.64 ~ 2.72	0.78 ~ 0.94	0.44 ~ 0.93
		平均	17	2.31	0.88	0.84
	崂山	范围	5 ~ 32	1.41 ~ 3.02	0.63 ~ 0.90	0.73 ~ 0.94
		平均	20	2.35	0.83	0.85

总体而言,不同地区、不同季节、不同类别的微生物群落结构存在差异,主要是受到微生物来源和环境条件的影响,微生物浓度并不能反映微生物群落的多样性.

3 结论

(1)生物气溶胶中陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌浓度在冬季月份较低,在春夏月份较高,可培养微生物浓度的最低值均出现在温度较低的 2 月. 不同种类的细菌和真菌月季变化并不完全一致,这是来源和不同物种对环境条件耐受力的不同所致.

(2)沙尘天气下微生物浓度明显升高,而雾天会使细菌浓度降低.

(3)海源微生物对总可培养微生物的贡献高于陆源,可见海洋对沿海区域的生物气溶胶组成有明显的影响.

(4)生物气溶胶中微生物物种数目和微生物浓度具有一定的相关性,微生物浓度越高,物种数目也越多. 微生物浓度存在显著的季节变化,但物种数的季节变化并不明显.

(5)生物气溶胶中陆源细菌、海源细菌、陆源真菌和海源真菌的群落结构在 2 月最简单,1 月、11 月和 5 月群落多样性较高,而群落多样性与浓度的

分布特征并不一致,可见,微生物浓度并不能反映微生物群落的多样性。要全面评价微生物对空气质量和人体健康的影响,不仅需要研究浓度分布,更需要对群落结构深入研究。

(6)不同类别的生物气溶胶中微生物群落多样性存在季节和空间差异,主要是受到微生物来源、环境条件以及为微生物物种特性的影响。

参考文献:

- [1] Kalogerakis N, Paschali D, Lekaditis V, *et al.* Indoor air quality—bioaerosol measurements in domestic and office premises [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, **36**(5-6): 751-761.
- [2] Ho J, Duncan S. Estimating aerosol hazards from an anthrax letter[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, **36**(5-6): 701-719.
- [3] Vali G, Christensen M, Fresh R, *et al.* Biogenic ice nuclei. Part II: Bacterial sources [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1976, **33**(8): 1565-1570.
- [4] Vaitilingom M, Attard E, Gaiani N, *et al.* Long-term features of cloud microbiology at the puy de Dôme (France) [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **56**: 88-100.
- [5] Maki L R, Galyan E L, Chang-Chien M M, *et al.* Ice nucleation induced by *Pseudomonas syringae* [J]. *Applied Microbiology*, 1974, **28**(3): 456-459.
- [6] Garcia E, Hill T C, Prenni A J, *et al.* Biogenic ice nuclei in boundary layer air over two U. S. High Plains agricultural regions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D18), doi: 10.1029/2012JD018343.
- [7] Franc G D, DeMott P J. Cloud activation characteristics of airborne *Erwinia carotovora* cells [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**(10): 1293-1300.
- [8] Bauer H, Giebl H, Hittenberger R, *et al.* Airborne bacteria as cloud condensation nuclei [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D21), doi: 10.1029/2003JD003545.
- [9] 胡家骏, 周群英. 环境工程微生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [10] Mandrioli P. Basic aerobiology [J]. *Aerobiologia*, 1998, **14**(2-3): 89-94.
- [11] 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.
- [12] Maki T, Susuki S, Kobayashi F, *et al.* Phylogenetic analysis of atmospheric halotolerant bacterial communities at high altitude in an Asian dust (KOSA) arrival region, Suzu City [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4556-4562.
- [13] Lee S H, Lee H J, Kim S J, *et al.* Identification of airborne bacterial and fungal community structures in an urban area by T-RFLP analysis and quantitative real-time PCR [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(6): 1349-1357.
- [14] Bowers R M, McCubbin I B, Hallar A G, *et al.* Seasonal variability in airborne bacterial communities at a high-elevation site [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 41-49.
- [15] Munday C I, O'Loingsigh T, Tapper N J, *et al.* Utilisation of Rep-PCR to track microbes in aerosols collected adjacent to their source, a saline lake in Victoria, Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **450-451**: 317-325.
- [16] 郑芷青, 谢小保, 欧阳友生, 等. 珠江三角洲城市群大气微生物优势种群及时空分异特征 [J]. *地理研究*, 2009, **28**(3): 625-633.
- [17] 夏晓敏, 汪建君, 陈立奇, 等. 厦门市10月份大气气溶胶中细菌群落结构的初步研究 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2010, **49**(5): 682-687.
- [18] 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.
- [19] 刘苗苗, 祁建华, 高冬梅, 等. 青岛近海秋季生物气溶胶分布特征 [J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 565-571.
- [20] Macher J M. Positive-hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms [J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1989, **50**(11): 561-568.
- [21] Griffin D W, Kubilay N, Koçak M, *et al.* Airborne desert dust and aeromicrobiology over the Turkish Mediterranean coastline [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(19): 4050-4062.
- [22] Fuzzi S, Mandrioli P, Peretto A. Fog droplets—an atmospheric source of secondary biological aerosol particles [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(2): 287-290.
- [23] Adhikari A, Sen M M, Gupta-Bhattacharya S, *et al.* Airborne viable, non-viable, and allergenic fungi in a rural agricultural area of India: a 2-year study at five outdoor sampling stations [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **326**(1): 123-141.
- [24] Fang Z, Ouyang Z, Hu L, Wang X, *et al.* Progresses of airborne microbial communities in urban ecosystem [J]. *Aata Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2): 315-322.
- [25] Mitchell R, Gu J D. *Environmental microbiology* [M]. (2nd ed.). Beijing: Science Press, 2010.
- [26] Tang J W. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, **6**(Suppl 6): S737-S746.
- [27] 陈皓文. 青岛空气微生物状况的测定 [J]. *山东科学*, 2003, **16**(1): 9-13.
- [28] Maki T, Susuki S, Kobayashi F, *et al.* Phylogenetic diversity and vertical distribution of a halobacterial community in the atmosphere of an Asian dust (KOSA) source region, Dunhuang city [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2008, **1**(2): 81-89.
- [29] Kellogg C A, Griffin D W. Aerobiology and the global transport of desert dust [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, **21**(11): 638-644.
- [30] 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.
- [31] 欧阳友生, 谢小保, 陈仪本, 等. 广州市空气微生物含量及其变化规律研究 [J]. *微生物学通报*, 2006, **33**(3): 47-51.

- [32] Fang Z, Ouyang Z, Zheng H, *et al.* Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China [J]. *Microbial Ecology*, 2007, **54**(3): 487-496.
- [33] Adhikari A, Reponen T, Grinshpun S A, *et al.* Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone; a two-year study [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140**(1): 16-28.
- [34] O'Gorman C M, Fuller H T. Prevalence of culturable airborne spores of selected allergenic and pathogenic fungi in outdoor air [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4355-4368.
- [35] Matthias-Maser S, Reichert K, Jaenicke R. Primary biological aerosol particles at the high alpine site of Jungfraujoch/Switzerland [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2000, **31**: 955-956.
- [36] Lighthart B, Shaffer B T. Viable bacterial aerosol particle size distributions in the midsummer atmosphere at an isolated location in the high desert chaparral [J]. *Aerobiologia*, 1995, **11**(1): 19-25.

欢迎订阅 2014 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2014 年为大 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway ...	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行