

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM_{2.5}时空分布特征 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO₂ 及 δ¹³C(CO₂) 本底变化 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe₃O₄@SiO₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布

刘婷¹, 李露¹, 张家泉¹, 占长林¹, 刘红霞¹, 郑敬茹¹, 姚瑞珍¹, 曹军骥^{1,2}

(1. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室, 黄石 435003; 2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

摘要: 大学宿舍室内生物气溶胶可通过空气传播, 可能会危害学生身体健康. 本研究调查了梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度和粒径分布特点, 对其同空气颗粒物浓度、环境温度和湿度的 Spearman 相关性进行了研究, 分析了学生活动对宿舍室内气溶胶的影响. 结果表明, 学生宿舍室内的细菌和真菌气溶胶平均浓度分别为 $(2\ 133 \pm 1\ 617)$ CFU·m⁻³ 和 $(3\ 111 \pm 2\ 202)$ CFU·m⁻³, 真菌气溶胶的浓度明显高于细菌. 学生宿舍室内的 PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀ 与细菌气溶胶浓度呈负相关, 与真菌气溶胶浓度呈显著负相关; PM_{2.5} 与可吸入细菌气溶胶呈正相关, PM₁₀ 与可吸入真菌气溶胶呈正相关; 环境温度与细菌和真菌气溶胶浓度呈正相关, 环境相对湿度与细菌和真菌气溶胶浓度呈负相关. 在下午, 宿舍室内真菌气溶胶浓度显著增加, 上午和下午生物气溶胶的粒径分布有差异. 本研究结果将为评价高校学生宿舍室内空气质量提供基础数据.

关键词: 大学宿舍; 生物气溶胶; 空气颗粒物; 可培养微生物; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1256-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.04.009

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period

LIU Ting¹, LI Lu¹, ZHANG Jia-quan¹, ZHAN Chang-lin¹, LIU Hong-xia¹, ZHENG Jing-ru¹, YAO Rui-zhen¹, CAO Jun-ji^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control and Remediation, School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: Bioaerosols of university dormitory can spread through air and cause a potential health risk for student staying in indoor environment. To quantify the characteristics of bioaerosols in indoor environment of university dormitory, concentration and size distribution of culturable bioaerosols were detected during the plum rain period, the correlations of culturable bioaerosol with concentration of particulate matter, the ambient temperature and relative humidity were analyzed using Spearman's correlation coefficient and finally the changes of size distribution of culturable bioaerosol caused by activities of students were detected. The results showed that the mean concentrations of culturable airborne bacteria and fungi were $(2\ 133 \pm 1\ 617)$ CFU·m⁻³ and $(3\ 111 \pm 2\ 202)$ CFU·m⁻³. The concentrations of culturable airborne bacteria and fungi exhibited negative correlation with PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀, respectively. The respirable fractions of bacteria exhibited positive correlation with PM_{2.5}, and the respirable fractions of fungi exhibited significant positive correlation with PM₁₀. Ambient temperature had positive correlation with culturable airborne bacteria and fungi, and relative humidity had negative correlation with culturable airborne bacteria and fungi. In the afternoon, concentrations of culturable airborne fungi in indoor environment of university dormitory significantly increased, and the size distribution of culturable bioaerosols was different in the morning and afternoon.

Key words: university dormitory; bioaerosols; airborne particulate matter; culturable microorganism; size distribution

生物气溶胶污染问题近年来受到广泛关注, 生物气溶胶包含悬浮在空气中的细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉、孢子和动植物的残骸等^[1], 粒径大小为 0.5 ~ 100 μm^[2]. 室内生物气溶胶是危害人体健康的潜在原因之一^[3,4], 在室内环境中, 暴露于生物气溶胶可能会引起传染病、哮喘、支气管疾病、过敏及癌症等^[3,5,6].

大学宿舍是学生休息、学习的场所, 学生们每天在宿舍里停留约有 15 h, 甚至更长时间. 宿舍内的空气质量直接影响着学生的身体健康. 大学宿舍

面积较小, 人口集中, 生物气溶胶的浓度较高. 不同动力学粒径的生物气溶胶颗粒可以进入呼吸系统的不同部位, 直径小于 4.7 μm 的颗粒可以进入人体肺泡, 可能会导致过敏性肺炎炎症等疾病^[7]. 因此, 对大学宿舍的生物气溶胶进行研究是十分有必要

收稿日期: 2015-08-28; 修订日期: 2015-11-21

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2013FY112700); 湖北省自然科学基金项目(2013CFC099); 湖北省科技支撑计划项目(2014BHE0030); 湖北理工学院优秀青年科技创新团队资助计划项目(13xtz07)

作者简介: 刘婷(1976~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境微生物与生物气溶胶, E-mail: liutingxd@qq.com

的. 国内外研究者已经对某些大学校园的可培养生物气溶胶浓度和粒径分布进行过研究^[6,8~11], 国内对大学宿舍的生物气溶胶浓度也有多篇报道^[8,12~21]. 然而, 目前关于高校学生宿舍生物气溶胶的粒径分布以及学生活动对生物气溶胶的影响研究鲜见报道. 针对这一现状, 本研究对高校学生宿舍进行采样, 分析空气中可培养细菌和真菌气溶胶的浓度及粒径分布情况, 以期对评价学生宿舍空气质量提供基础数据.

1 材料与方 法

1.1 采样地点和时间

本研究的采样地点位于湖北省某高校的学生宿舍, 选取的两栋学生宿舍楼均建于 2003 年, 楼层共 7 层, 宿舍的使用面积 20 m² 左右, 每个房间设有卫生间和盥洗室, 每个宿舍住 4 人. 学生宿舍房型及采样位置见图 1. 选取女生宿舍 23 间和男生宿舍 23 间, 宿舍所在楼层有 1、3、4、5、7 层. 选取的宿舍内没有肉眼可见的霉菌; 没有明显能够闻到的霉味; 房屋建筑没有受到湿度的破坏. 在宿舍的学习、休息区域进行空气生物气溶胶样品采集, 采样点离地 1.2~1.5 m. 于 2015 年 6 月 23、24、30 日,

7 月 4、12、13、15 日的上午、下午进行样品采集, 采样期间是湖北的梅雨期, 连续多日都是阴雨天气, 6 月 20 日到 7 月 15 日期间有 15 d 有雨, 9 d 多云, 采样日的天气情况见表 1. 为了探讨学生活动对室内生物气溶胶的影响, 选择了两间宿舍作为对照, 这两间宿舍在采样日全天无人在室内活动, 在 9 月 26 日和 10 月 2 日的早、中、晚时段分别采集了这两间宿舍的生物气溶胶样品.

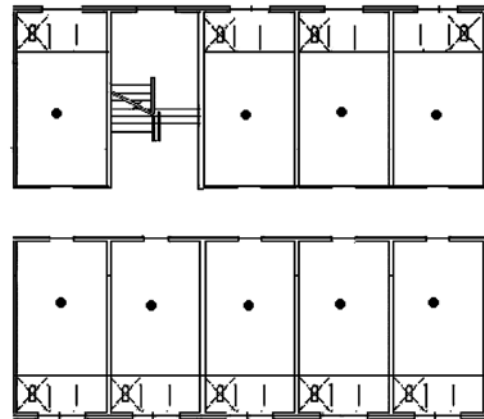


图 1 大学宿舍采样位置示意

Fig. 1 Schematic planimetry of university dormitories with localization of sampling sites

表 1 采样日天气情况

Table 1 Weather conditions of the sampling days

日期(年-月-日)	2015-06-23	2015-06-24	2015-06-30	2015-07-04	2015-07-12	2015-07-13	2015-07-15
天气	阵雨~多云	小雨~多云	阵雨~暴雨	多云	多云~晴	晴~多云	中雨~大雨

1.2 采样方法和培养方法

生物气溶胶的采集使用 ETW-6 撞击式采样器(金坛, 中国). 该仪器模拟人体呼吸道的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在空气中的微生物粒子分等级地收集到采样介质表面, 供微生物学分析. 空气中的带菌粒子按大小分别捕获在各级的培养皿上. 1 级: >7.0 μm, 2 级: 4.7~7.0 μm, 3 级: 3.3~4.7 μm, 4 级: 2.1~3.3 μm, 5 级: 1.1~2.1 μm, 6 级: 0.65~1.1 μm^[22]. 样品采集时间为 2 min, 气体流量为 28.3 L·min⁻¹. 每个采样点重复取样 3 次. 每次采样之前都用 75% 的酒精对采样器进行消毒, 然后在每一级上放入培养皿.

培养皿采用 9 cm 平皿, 灭菌后在无菌条件下加入 20 mL 培养基. 细菌采用营养肉汤琼脂培养基(北京, 奥博星), 37℃ 培养箱内培养 2 d; 真菌采样用虎红琼脂培养基(北京, 奥博星), 28℃ 培养箱内培养 5 d. 采集的样品在进行菌落计数时, 采用

Positive hole method 方法对菌落数进行相应校正^[22].

在生物气溶胶采样的同时, 采用 Dust trak II DRX(美国 TSI)测定宿舍的 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 的实时数据.

1.3 计算方法

1.3.1 生物气溶胶总浓度

根据采样时间和气体流量, 利用公式(1)计算各级生物气溶胶总浓度.

$$c = \frac{N \times 1000}{t \times F} \quad (1)$$

式中, c 为细菌或者真菌气溶胶浓度(CFU·m⁻³); N 为各级菌落数之和; t 为采样时间(min); F 为采样时的气体流量(L·min⁻¹). 空气温度和相对湿度用温湿度计(天津科辉)检测.

1.3.2 各级细菌、真菌在生物气溶胶中的比例

各级的细菌所占总浓度的百分比, 按公式(2)

计算.

$$B_i = (c_{bi}/c_b) \times 100\% \quad (2)$$

式中, B 为各级细菌所占的百分数; c_{bi} 为第 i 级的细菌浓度, c_b 为细菌的总浓度.

各级的真菌所占总浓度的百分比,按公式(3)计算.

$$F_i = (c_{fi}/c_f) \times 100\% \quad (3)$$

式中, F 为各级真菌所占的百分数; c_{fi} 为第 i 级的真菌浓度, c_f 为真菌的总浓度.

1.3.3 生物气溶胶中可吸入颗粒物所占的比例

粒径 $< 4.7 \mu\text{m}$ 的细菌、真菌可进入下呼吸道,为可吸入颗粒物^[23]. 细菌气溶胶可吸入部分所占的百分比,按公式(4)计算^[24].

$$R_b = \frac{(c_{b3} + c_{b4} + c_{b5} + c_{b6})}{c_b} \times 100\% \quad (4)$$

式中, R_b 为细菌气溶胶可吸入部分的百分数.

真菌气溶胶可吸入部分所占的百分比,按公式(5)计算^[24].

$$R_f = \frac{(c_{f3} + c_{f4} + c_{f5} + c_{f6})}{c_f} \times 100\% \quad (5)$$

式中, R_f 为真菌气溶胶可吸入部分的百分数.

1.4 统计分析

利用 SPSS 21.0 来计算描述性统计参数,如 t -检验、单因素方差分析和 Spearman 相关分析. 当 P 值小于 0.05 时,表明在 95% 的置信区间内具有统计学意义上的显著差异.

2 结果与分析

2.1 大学宿舍生物气溶胶浓度及粒径分布

学生宿舍室内生物气溶胶中可培养的细菌和真菌浓度见表 2. 宿舍生物气溶胶总浓度的均值为 $5\,244 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 细菌和真菌气溶胶的平均浓度分别为 $2\,133 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3\,111 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 真菌气溶胶的浓度明显高于细菌 ($P < 0.05$). 我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002) 规定: 室内空气细菌的卫生标准是: 撞击法的细菌总数 $\leq 2\,500 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 学生宿舍的细菌气溶胶平均浓度没有超过限值. 文献[25]推荐的清洁空气细菌浓度标准值 ($2\,500 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$) 相比, 细菌气溶胶平均浓度没有超过允许值, 真菌气溶胶平均浓度超过清洁空气限值 ($750 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$)^[25], 是限值的 4.1 倍, 属于中度污染水平. 对比其他国家的空气微生物标准, 本研究的生物气溶胶浓度超过了限值, 如美国政府工业卫生学家会议 (ACGIH) 规定真菌生物气溶胶的限值是 200

$\text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[26]; 加拿大卫生部门规定: 对于混合物种, 在 $150 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下才是正常的^[8]; 韩国环境部公布了空气总细菌浓度的限值是 $800 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[27]. 欧洲社区标准委员会规定: 敬老院和学校宿舍室内空气的细菌和真菌浓度是 $100 \sim 500 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[28].

表 2 大学宿舍细菌、真菌气溶胶浓度及气象指数

Table 2 Concentrations of airborne bacteria and fungi of university dormitory and meteorological index

项目 ¹⁾	平均值	最大值	最小值	SD
c_b (细菌)/ $\text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$	2 133	7 951	353	1 617
$B_1/\%$	12.97	63.33	0	12.71
$B_2/\%$	16.25	38.03	1.63	9.17
$B_3/\%$	17.98	54.35	0	12.05
$B_4/\%$	20.11	64.21	3.33	10.97
$B_5/\%$	17.18	34.94	3.33	6.95
$B_6/\%$	15.40	52.50	0	9.77
$R_b/\%$	70.67	93.83	26.67	14.09
c_f (真菌)/ $\text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$	3 111	10 265	459	2 202
$F_1/\%$	9.05	39.60	0	8.06
$F_2/\%$	13.60	34.48	4.35	5.69
$F_3/\%$	27.17	47.50	2.89	10.31
$F_4/\%$	23.05	42.96	4.95	9.30
$F_5/\%$	16.97	69.33	3.85	11.13
$F_6/\%$	10.51	37.97	1.33	7.81
$R_f/\%$	77.71	93.75	55.45	9.59
温度/ $^{\circ}\text{C}$	29.80	34.00	26.50	1.34
相对湿度/ $\%$	68.20	80.00	59.00	5.24

1) $B_1 (> 7 \mu\text{m})$ 、 $B_2 (4.7 \sim 7 \mu\text{m})$ 、 $B_3 (3.3 \sim 4.7 \mu\text{m})$ 、 $B_4 (2.1 \sim 3.3 \mu\text{m})$ 、 $B_5 (1.1 \sim 2.1 \mu\text{m})$ 、 $B_6 (0.65 \sim 1.1 \mu\text{m})$; $F_1 (> 7 \mu\text{m})$ 、 $F_2 (4.7 \sim 7 \mu\text{m})$ 、 $F_3 (3.3 \sim 4.7 \mu\text{m})$ 、 $F_4 (2.1 \sim 3.3 \mu\text{m})$ 、 $F_5 (1.1 \sim 2.1 \mu\text{m})$ 、 $F_6 (0.65 \sim 1.1 \mu\text{m})$

本研究中的生物气溶胶浓度与国内外其他高校的学生宿舍相比较 (见表 3), 细菌气溶胶平均浓度与多所高校的水平相当, 而真菌气溶胶浓度最高. 本研究采样期间是湖北的梅雨期, 平均温度为 29.80°C , 相对湿度大 (平均达到 68.20%), 有利于真菌生长繁殖. 比较了女生宿舍和男生宿舍的生物气溶胶浓度, 女生宿舍生物气溶胶浓度高于男生宿舍. 采样期间天气闷热, 男生宿舍的门窗均打开, 有利于室内空气流通; 但是女生宿舍不常开门, 窗户也拉上窗帘, 空气流通不畅, 造成生物气溶胶浓度较高.

学生宿舍的生物气溶胶浓度与其他室内环境生物气溶胶浓度相比: 北京市居家环境空气细菌平均浓度为 $1\,821 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 真菌平均浓度为 $837 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[29]. 北京南站的空气细菌平均浓度为 $12\,639 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 真菌平均浓度为 $1\,528$

CFU·m⁻³[30]. 新加坡居住环境室内空气细菌和真菌浓度低于 500 CFU·m⁻³[31].

空气颗粒物的动力学粒径是决定人类暴露以及后续危害评价的重要参数,不同粒径的生物气溶胶粒子会沉降在人体呼吸道的不同位置[22,32],其中 1、2 级沉降在上呼吸道,3~6 级沉降在下呼吸道. 从学生宿舍的细菌气溶胶平均粒径分布来看,1~6 级各占比例为: 12.97%、16.25%、17.98%、20.11%、17.18%、15.40%,其中,细菌气溶胶在第 4 级(2.1~

3.3 μm)分布最多. Li 等[8]对长安大学学生宿舍的研究、Wang 等[24]对台湾北部公交车的研究也发现细菌的最高浓度出现在第 4 级. 宿舍的真菌气溶胶平均粒径分布从 1 级到 6 级各占比例为: 9.05%、13.60%、27.17%、23.05%、16.97%、10.51%,其中真菌气溶胶在第 3 级(3.3~4.7 μm)分布最多,其次是 4 级(2.1~3.3 μm). 与本研究的结果不同, Li 等[8]对长安大学学生宿舍的研究发现真菌的最高浓度出现在第 4 级,其次是第 5 级.

表 3 多所大学宿舍生物气溶胶浓度统计

位置	细菌/CFU·m ⁻³		真菌/CFU·m ⁻³		文献
	女生宿舍	男生宿舍	女生宿舍	男生宿舍	
西南农业大学	7 446	5 635	432	664	[12]
盐城师范学院		3 328			[13]
西北师范大学	3 064	3 075			[14]
曲阜师范大学	2 713	1 508			[15]
成都某大学		1 187			[16]
北京某大学	550~1 875	425~3 200			[17]
河北大学	2 692	910	894	2 340	[18]
沈阳市某大学		3 700		800	[19]
青岛某大学	2 310	2 450			[20]
广西百色某些大学		2 200			[21]
伊朗德黑兰的学校宿舍		488		186	[33]
长安大学		614		421	[8]
湖北某大学	2 489	1 778	3 220	3 002	本研究

粒径 < 4.7 μm 的颗粒物为可吸入颗粒物,是指可以进入人体的下呼吸道如气管、支气管或肺泡的颗粒物[23],学生宿舍细菌和真菌气溶胶的可吸入部分所占百分比(R_b 和 R_f) 分别为 70.67% 和 77.71%. Li 等[8]对长安大学学生宿舍的研究发现,细菌和真菌气溶胶的可吸入部分所占百分比都在 80% 以上. 学生宿舍真菌和细菌气溶胶的可吸入部分所占百分比是高于其他的一些研究[7,34],这表明宿舍室内生物气溶胶对学生有较大的影响.

2.2 大学宿舍室内空气颗粒物浓度

本研究在测定宿舍生物气溶胶的同时,也测定了宿舍室内空气颗粒物的浓度(见表 4). 学生宿舍室内的 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 的平均浓度分别为 52、46 和 46 μg·m⁻³. 我国《室内空气中可吸入颗粒物卫生标准》(GB/T 17095-1997)规定:可吸入颗粒物是指能进入呼吸道的质量中值直径为 10 μm 的颗粒物,室内可吸入颗粒物日平均最高容许浓度为 0.15 mg·m⁻³. 学生宿舍的 PM₁₀ 平均浓度在限值以下,说明空气质量符合卫生标准. 我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)规定:PM₁₀ 的二级限值是 150 μg·m⁻³,PM_{2.5} 的二级限值是 75 μg·m⁻³. 学生

宿舍的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 平均浓度均在限值以下,说明空气质量优良. 而学生宿舍生物气溶胶浓度和文献[25]推荐的空气微生物标准值相比,真菌气溶胶平均浓度超过清洁空气限值(750 CFU·m⁻³),属于中度污染水平. 由此可见,用不同的标准判断空气质量得到的结果不一致. 判断环境空气质量的优劣,除了要考虑物理、化学的污染物以外,还应考虑到生物气溶胶污染.

表 4 大学宿舍室内空气颗粒物浓度/μg·m⁻³

项目	平均值	最大值	最小值	SD
PM ₁₀	52	154	13	33
PM _{2.5}	46	146	1	32
PM ₁	46	146	1	32

2.3 生物气溶胶与空气颗粒物浓度、温度、湿度的相关分析

对学生宿舍的空气颗粒物浓度、温度、湿度和生物气溶胶进行了 Spearman 相关分析,包括总生物气溶胶浓度(c_b 和 c_f)、不同粒径范围内的生物气溶胶浓度(c_{b1} 到 c_{b6} 、 c_{f1} 到 c_{f6})、细菌可吸入部分的百

分比(R_b)和真菌可吸入部分的百分比(R_f),结果如 表5 所示.

表5 生物气溶胶与空气颗粒物浓度、温度、湿度的 Spearman 相关系数

Table 5 Spearman's correlation analysis between the concentration of airborne bacteria, fungi and concentration of airborne particulate matter, ambient temperature and relative humidity

项目	PM ₁₀ (n=43)	PM _{2.5} (n=43)	PM ₁ (n=43)	温度 (n=46)	湿度 (n=46)
c_b	-0.088	-0.086	-0.088	0.025	-0.005
c_{b1}	-0.114	-0.089	-0.091	0.043	-0.238
c_{b2}	-0.101	-0.096	-0.098	0.063	0.213
c_{b3}	-0.040	-0.045	-0.047	0.103	0.114
c_{b4}	-0.070	-0.081	-0.082	-0.007	0.017
c_{b5}	0.056	0.049	0.048	-0.020	-0.129
c_{b6}	-0.076	-0.094	-0.096	-0.082	-0.096
R_b	-0.076	0.102	0.103	-0.179	-0.160
c_f	-0.389 **	-0.352 *	-0.352 *	0.010	-0.066
c_{f1}	-0.291	-0.264	-0.262	-0.109	-0.160
c_{f2}	-0.313 *	-0.273	-0.275	0.040	-0.058
c_{f3}	-0.097	-0.055	-0.055	0.002	0.205
c_{f4}	-0.251	-0.216	-0.215	0.097	0.146
c_{f5}	-0.454 **	-0.439 **	-0.439 **	-0.018	-0.200
c_{f6}	-0.391 **	-0.374 *	-0.374 *	-0.236	-0.355 *
R_f	0.013	-0.002	-0.004	0.009	0.086

1) **表示 $P < 0.01$ (2-tailed), *表示 $P < 0.05$ (2-tailed), n 为采样次数

学生宿舍的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 与细菌气溶胶总浓度呈负相关,与绝大部分粒径范围内细菌气溶胶的浓度(除了 c_{b5})呈负相关,但是相关性不显著. PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 与真菌气溶胶总浓度呈显著负相关,与6级粒径范围内真菌气溶胶的浓度呈负相关,其中 PM₁₀ 与 c_{f2} 显著负相关,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 与 c_{f5} 、 c_{f6} 显著负相关. 这说明空气中的细菌和真菌气溶胶浓度随着颗粒物的增加而逐渐减小,这一结果与以往报道的细菌、真菌气溶胶浓度正相关于空气颗粒物浓度^[35,36]的结果不同. 而 Kalogerakis 等^[4]

研究了居家和办公室生物气溶胶浓度及 PM₁₀ 的变化,发现生物气溶胶浓度与 PM₁₀ 的浓度变化并不一致. 高敏等^[32]研究北京雾霾天气生物气溶胶浓度变化时,发现空气中的细菌和真菌气溶胶浓度随着 PM_{2.5} (AQI)的增加而逐渐减小. 这可能是因为空气颗粒物中含某些有毒有害物质^[37],这些有害物质可能对生物气溶胶产生不利影响,所以出现颗粒物浓度同细菌和真菌气溶胶浓度负相关的结果. PM_{2.5} 与可吸入细菌气溶胶呈正相关,PM₁₀ 与可吸入真菌气溶胶呈正相关,但是相关性不显著. 环境温度与

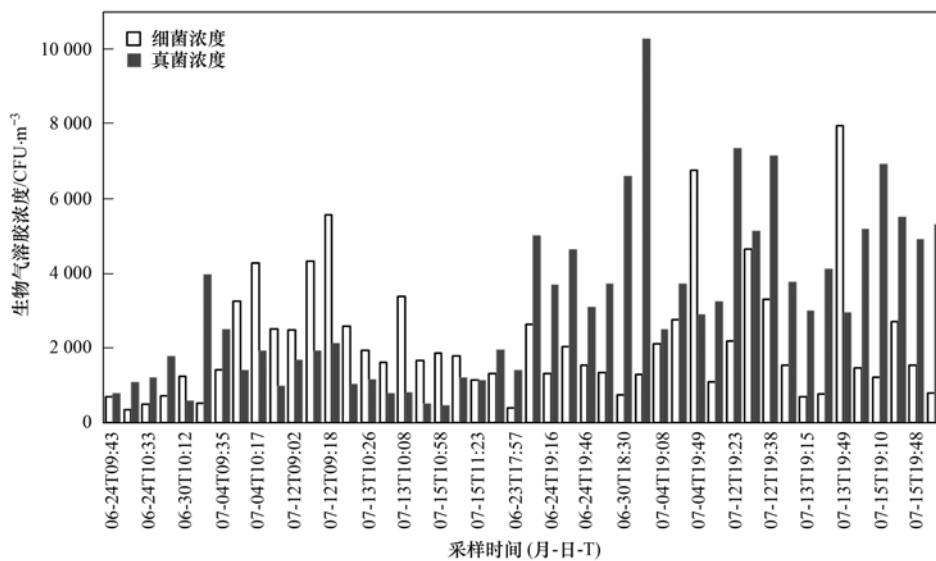


图2 上午和下午的大学宿舍室内生物气溶胶浓度

Fig. 2 Concentration of bioaerosols in indoor environment of university dormitory in the morning and in the afternoon

细菌和真菌气溶胶浓度呈正相关,但是相关性不显著. 环境相对湿度与细菌和真菌气溶胶浓度呈负相关,但是相关性也不显著.

2.4 宿舍室内生物气溶胶的昼变化

在室内环境里,生物气溶胶部分来源于室外的生物气溶胶,部分来源于人类活动^[4]. 宿舍室内生物气溶胶浓度的昼变化会受到室外生物气溶胶浓度以及学生活动的影响. 本研究采样的时间主要分为上午和下午,下午采样时间主要在 18:00~20:00 之间. 上午和下午的学生宿舍室内生物气溶胶浓度变化见图 2. 学生宿舍上午和下午细菌气溶胶平均浓度分别为:2 091 CFU·m⁻³和 2 169 CFU·m⁻³; 上午和下午真菌气溶胶平均浓度分别为:1 386 CFU·m⁻³和 4 561 CFU·m⁻³. 整体上看,上午的细菌气溶胶浓度和下午的没有显著差异($P > 0.05$),而上午和下午的真菌气溶胶有显著差异($P < 0.05$),下午的真菌气溶胶浓度显著增加. 采样期间正值学生复习课程准备期末考试时间,学生 09:00~17:00 在教室、图书馆复习,18:00 以后一般回到宿舍休息. 学生的活动可以使得室内真菌孢子再悬浮,增加真菌气溶胶浓度. Faridi 等^[33]对德黑兰的养老院的研究也表明,老人及医护人员的室内活动使得真菌孢子再悬浮,增加生物气溶胶浓度. 下午真菌气溶胶浓度的增加也有可能是由于室外真菌气溶胶浓度升高引起的,通过后续补充的对照宿舍的采样分析发现,宿舍内一天都没有学生时,19:00 之后细菌气溶胶的浓度有所降低而真菌气溶胶浓度有显著增加($P < 0.05$),见图 3.

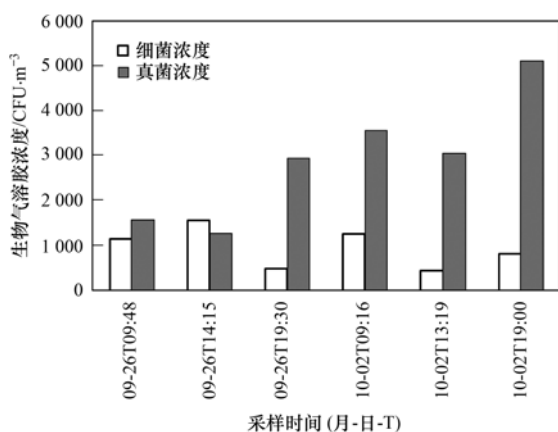


图3 对照宿舍室内生物气溶胶浓度

Fig. 3 Concentration of bioaerosols in indoor environment of control dormitory

人类活动会影响真菌孢子的聚集速度,也许会 引起生物气溶胶中可吸入部分含量的变化^[23,33]. 为了进一步了解宿舍生物气溶胶粒径变化,分析了上

午和下午宿舍室内细菌和真菌气溶胶的粒径分布特点,结果见图 4 和图 5. 上午和下午宿舍室内细菌和真菌气溶胶的粒径分布存在差异. 上午宿舍室内细菌气溶胶的最大浓度分布在 3.3~4.7 μm 范围内,其次是 2.1~3.3 μm 范围内;而下午细菌气溶胶的最大浓度分布在 0.65~1.1 μm 范围内,其次是 4.7~7 μm 范围内. 上午宿舍室内真菌气溶胶的最大浓度分布在 4.7~7 μm 范围内,其次是 2.1~3.3 μm 范围内;而下午真菌气溶胶的最大浓度分布在 2.1~3.3 μm 范围内,其次是 3.3~4.7 μm 范围内. 出现这样的结果,可能是学生的活动使得空气中粒径较小的颗粒再悬浮,同时也增加了粒子间的碰撞和聚集,造成较大粒径的颗粒增加.

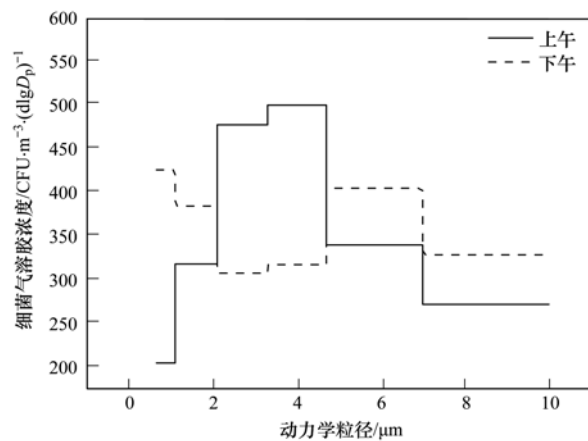


图4 上午和下午大学宿舍室内细菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 4 Size distribution of airborne bacteria in indoor environment of university dormitory in the morning and in the afternoon

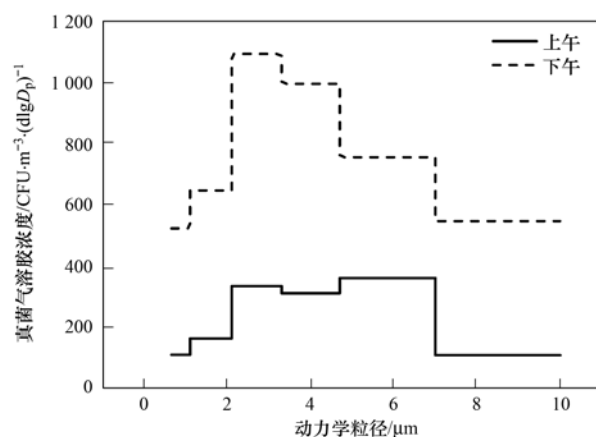


图5 上午和下午大学宿舍室内真菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 5 Size distribution of airborne fungi in indoor environment of university dormitory in the morning and in the afternoon

3 结论

(1)在梅雨期,学生宿舍室内的细菌和真菌气

溶胶平均浓度分别为 $(2\ 133 \pm 1\ 617)$ CFU·m⁻³ 和 $(3\ 111 \pm 2\ 202)$ CFU·m⁻³, 真菌气溶胶的浓度明显高于细菌 ($P < 0.05$).

(2) 学生宿舍室内的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 与细菌气溶胶浓度呈负相关, 与真菌气溶胶浓度呈显著负相关. PM_{2.5} 与可吸入细菌气溶胶呈正相关, PM₁₀ 与可吸入真菌气溶胶呈正相关. 环境温度与细菌和真菌气溶胶浓度呈正相关, 环境相对湿度与细菌和真菌气溶胶浓度呈负相关.

(3) 上午和下午的宿舍室内细菌气溶胶浓度没有显著差异, 下午真菌气溶胶浓度显著增加; 上午和下午的生物气溶胶的粒径分布存在差异, 上午和下午的细菌气溶胶最大浓度分别分布在 3.3 ~ 4.7 μm 和 0.65 ~ 1.1 μm 范围内, 上午和下午的真菌气溶胶最大浓度分别分布在 4.7 ~ 7 μm 和 2.1 ~ 3.3 μm 范围内.

参考文献:

- [1] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(4): 546-552.
- [2] Nevalainen A, Pastuszka J, Liebhaber F, *et al.* Performance of bioaerosol samplers: Collection characteristics and sampler design considerations[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(4): 531-540.
- [3] Ross M A, Curtis L, Scheff P A, *et al.* Association of asthma symptoms and severity with indoor bioaerosols [J]. Allergy, 2000, **55**(8): 705-711.
- [4] 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.
- [5] Lam W K, Zhong N S, Tan W C. Overview on SARS in Asia and the world[J]. Respiriology, 2003, **8**(S1): S2-S5.
- [6] Meklin T, Reponen T, Toivola M, *et al.* Size distributions of airborne microbes in moisture-damaged and reference school buildings of two construction types [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(39-40): 6031-6039.
- [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] Li Y P, Wang W, Guo X, *et al.* Assessment of airborne bacteria and fungi in various university indoor environments: a case study in Chang'an University, China [J]. Environmental Engineering Science, 2015, **32**(4): 273-283.
- [9] Giulio M D, Grande R, Campli E D, *et al.* Indoor air quality in university environments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **170**(1-4): 509-517.
- [10] Tran D T, Alleman L Y, Coddeville P, *et al.* Indoor-outdoor behavior and sources of size-resolved airborne particles in French classrooms [J]. Building and Environment, 2014, **81**: 183-191.
- [11] 张杏辉, 罗燕群, 周振明. 校园空气微生物和悬浮物污染评价及相关性分析[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(4): 71-75.
- [12] 刘国强, 周娅. 校园空气污染微生物的检测与评价[J]. 微生物学杂志, 2004, **24**(3): 56-58.
- [13] 王兰萍. 校园空气微生物污染的监测与分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2005, **15**(11): 1354-1355.
- [14] 陈源, 巨天珍, 赵英杰, 等. 校园空气微生物污染状况及时空分布特征[J]. 云南地理环境研究, 2007, **19**(5): 123-128.
- [15] 司美茹, 李桂芝, 苏涛. 校园室内空气微生物污染的调查与分析[J]. 曲阜师范大学学报, 2008, **34**(1): 100-103.
- [16] 王跃, 杨涛, 任宴梅, 等. 成都市某高校室内空气细菌污染的监测与分析[J]. 成都医学院学报, 2009, **4**(4): 295-297.
- [17] 赵安乐, 郭玉明, 吴双, 等. 某高校教室和学生宿舍空气细菌污染情况调查[J]. 环境与健康杂志, 2009, **26**(6): 512-513.
- [18] 李春青, 吕艳萍, 李红权, 等. 夏季校园室内空气微生物含量测定及评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, **39**(2): 125-127.
- [19] 喻道军, 叶丽杰, 程明, 等. 校园空气微生物浓度的监测与分析[J]. 微生物学杂志, 2011, **31**(2): 102-105.
- [20] 康琦, 吕锐. 某大学校园室内空气细菌含量检测及空气质量评价[J]. 青岛大学医学院学报, 2012, **48**(5): 449-450.
- [21] 吴冬柠, 韦彩娇, 余波, 等. 百色城区高校大学生宿舍空气微生物的监测与分析[J]. 右江民族医学院学报, 2013, **35**(5): 667.
- [22] Andersen A A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles [J]. Journal of Bacteriology, 1958, **76**(5): 471-484.
- [23] Nasir Z A, Colbeck I, Sultan S, *et al.* Bioaerosols in residential micro-environments in low income countries: a case study from Pakistan [J]. Environmental Pollution, 2012, **168**: 15-22.
- [24] Wang Y F, Wang C H, Hsu K L. Size and seasonal distributions of airborne bioaerosols in commuting trains [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(35): 4331-4338.
- [25] 陈锸, 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.
- [26] ACGIH. Bioaerosols: Assessment and control [C]. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1999.
- [27] Korean Ministry of Environment. The act of indoor air quality management [R]. 2004.
- [28] Kalwasińska A, Burkowska A, Wilk I. Microbial air contamination in indoor environment of a university library [J]. Annals of Agricultural and Environmental Medicine: AAEM, 2012, **19**(1): 25-29.
- [29] 方治国, 欧阳志云, 刘芑, 等. 北京市居家空气微生物污染特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(4): 1166-1172.
- [30] Dong S F, Yao M S. Exposure assessment in Beijing, China: biological agents, ultrafine particles, and lead [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **170**(1-4): 331-343.
- [31] Balasubramanian R, Nainar P, Rajasekar A. Airborne bacteria,

- fungi, and endotoxin levels in residential microenvironments: a case study[J]. *Aerobiologia*, 2012, **28**(3): 375-390.
- [32] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4415-4421.
- [33] Faridi S, Hassanvand M S, Naddafi K, *et al.* Indoor/outdoor relationships of bioaerosol concentrations in a retirement home and a school dormitory[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(11): 8190-8200.
- [34] Gao M, Qiu T L, Jia R Z, *et al.* Concentration and size distribution of viable bioaerosols during non-haze and haze days in Beijing [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, **22**(6): 4359-4368.
- [35] 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.
- [36] Degobbi C, Lopes F D T Q S, Carvalho-Oliveira R, *et al.* Correlation of fungi and endotoxin with PM_{2.5} and meteorological parameters in atmosphere of Sao Paulo, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2277-2283.
- [37] Xu W Z, Chen H, Li D H, *et al.* A case study of aerosol characteristics during a haze episode over Beijing[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **18**: 404-411.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiahua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行