

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性

邱雄辉, 李彦鹏*, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君

(长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘要: 为探明城市污水厂生成的微生物气溶胶的污染特性, 于2011年6~7月利用Andersen六级撞击式采样器对西安市第三污水处理厂不同污水处理单元的微生物气溶胶进行现场采样, 利用平皿培养和菌落计数法检测分析了细菌、真菌和放线菌这3类微生物气溶胶的浓度、粒径分布和中值直径。结果表明, 污水处理厂污泥脱水车间的细菌和放线菌气溶胶浓度最高, 分别为 $7\,866\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3} \pm 960\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2\,139\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3} \pm 227\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 而真菌气溶胶浓度最高出现在氧化沟, 为 $2\,156\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3} \pm 119\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 。细菌、真菌和放线菌气溶胶粒径分布均呈偏态型, 其中细菌和真菌的粒径分布峰值出现在 $2.1\sim 3.3\text{ }\mu\text{m}$ 范围, 而放线菌气溶胶粒径分布峰值出现在 $1.1\sim 2.1\text{ }\mu\text{m}$ 范围。总体上, 污水厂中细菌气溶胶中值直径 > 真菌气溶胶中值直径 > 放线菌气溶胶中值直径。另外, 微生物气溶胶的空间变化特征表现为粒径大的微生物气溶胶浓度减少率大。3类微生物气溶胶浓度减少率的变化程度从大到小依次为细菌 > 真菌 > 放线菌。

关键词: 城市污水处理厂; 微生物气溶胶; 污染特性; 粒径分布; 浓度; 中值直径

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2191-06

Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant

QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, LI Mei-ling, MA Zhi-hui, MIAO Ying, WANG Xiang-jun

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To characterize the pollution characteristics of microbial aerosols emitted from municipal sewage treatment plants, microbial aerosols were sampled with an Andersen 6-stage impactor at different treatment units of a Xi'an sewage treatment plant between June 2011 and July 2011. The plate-culture and colony-counting methods were employed to determine the concentrations, particle size distributions and median diameters of the airborne bacteria, fungi and actinomycetes. The results showed that the highest concentrations of bacteria ($7\,866\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3} \pm 960\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$) and actinomycetes ($2\,139\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3} \pm 227\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$) were found in the sludge-dewatering house while the highest fungi concentration ($2\,156\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3} \pm 119\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$) in the oxidation ditch. The airborne bacteria, fungi and actinomycetes all showed a skewed distribution in particle size. The peaks of bacteria and fungi were in the size range of $2.1\sim 3.3\text{ }\mu\text{m}$, whereas the peak of airborne actinomycetes was between $1.1\sim 2.1\text{ }\mu\text{m}$ in size. In general, the order of the median diameters of different microbial aerosols generated from the sewage treatment plant was airborne bacteria > airborne fungi > airborne actinomycetes. In addition, the spatial variation characteristics of microbial aerosols showed that the larger the particle size of the microorganism, the faster the reducing rate of the aerosol concentration. The variations in the reducing rate of concentration with particle sizes can be ordered as airborne bacteria > airborne fungi > airborne actinomycetes.

Key words: municipal sewage treatment plant; microbial aerosols; pollution characteristics; particle size distribution; concentration; median diameters

近年来,随着我国城市化进程的加速,越来越多的城市污水处理厂相继投产运行。在污水处理过程中,污水厂也产生了一些有毒有害的空气污染物,因而成为人们日益关注的新的空气污染源^[1,2]。其中,污水中存在的多种微生物可能会在曝气或机械搅动作用下以气溶胶的形式散发到空气中,形成微生物气溶胶,对空气环境和污水处理厂的工人及周边居民造成危害^[3~5]。因此了解污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性,对于其环境效应和健康风险评估具有重要的理论和现实意义。

当前国内外研究者对污水处理产生的微生物气溶胶的研究主要集中在3个方面:一是污水处理厂

生成的细菌和真菌型微生物气溶胶的种属和浓度^[6~9];二是污水处理工艺及运行方式、气象条件和采样方式等因素对微生物气溶胶生成的影响^[10~14];三是污水处理厂生成的微生物气溶胶的扩散传输规律及其风险评价^[15,16]。然而,微生物气溶胶对环境 and 人体健康的影响除了与其浓度和种类有关,还与粒径分布直接相关。而目前在污水处理厂

收稿日期: 2011-09-26; 修订日期: 2011-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(20706007); 中央高校基本科研业务费专项(CHD2012JC005)

作者简介: 邱雄辉(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气气溶胶, E-mail: qiu_xionghui@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liyanp01@chd.edu.cn

微生物气溶胶粒径分布方面的研究非常有限^[17,18]. 另外,已有的文献只涉及了细菌、真菌和病毒类气溶胶,还没有关于放线菌气溶胶的报道. 流行病学研究表明,放线菌也是空气中常有的微生物,放线菌粒子进入人体后,会导致颞骨肿瘤和肺部感染等疾病,甚至造成死亡^[19~21]. 因此,污水处理厂产生的放线菌气溶胶对人体健康的影响也不容忽视.

鉴于此,笔者选取西安市一个典型城市污水处理厂为研究对象,对不同污水处理单元生成的细菌、真菌和放线菌这3类微生物气溶胶进行采样分析,旨在获得城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的浓度与粒径分布等污染特征,为评估污水微生物气溶胶引起的环境效应和健康风险提供基础数据.

1 采样与分析

1.1 样品采集

研究对象选取位于西安市东郊的西安市第三污水处理厂. 该厂占地面积 $2.15 \times 10^5 \text{ m}^2$,通过市政管网集纳生活废水,采用奥贝尔氧化沟工艺,处理能力为 $2 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,服务人口 29 万人.

采样点布置在污水处理厂的曝气沉砂池、氧化沟、终沉池、污泥脱水车间和出水口等5个污水处理单元以及厂区内上风向 100 m 处的背景值点,具体位置如图 1 所示. 各采样点除了污泥脱水车间,均为室外采样. 曝气沉砂池采用鼓风曝气,氧化沟采用水平转刷曝气,污泥脱水车间采用离心式脱水机处理污泥.

采样时间为 2011 年 6~7 月,采样时段为 10:00~13:00,每次采样均选择气象条件相似的天气进行,以减小气象因子对采样数据的影响. 采样期间,

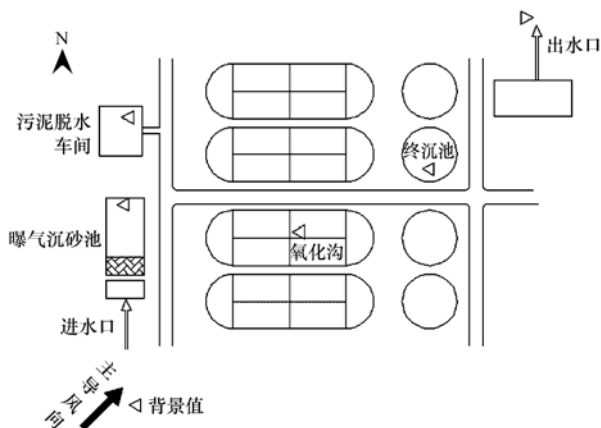


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Sketch of sampling locations at the 3rd sewage treatment plant of Xi'an

室外气温范围 $26.9 \sim 30.2^\circ\text{C}$, 平均温度 27.9°C , 主导风向西南风, 平均风速 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对湿度 55.3%.

采样仪器采用 Andersen 六级撞击式空气采样器 (Westech, UK), 粒子的空气动力学截留直径分别为 0.65 、 1.1 、 2.1 、 3.3 、 4.7 和 $7.0 \mu\text{m}$. 采样流量为 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 样品采集时间为 10 min , 采样时进气口距离地面约 1.5 m , 每个采样点重复取样 3 次.

1.2 培养计数方法

采用平皿培养和平板菌落计数法来检测分析微生物的类别和浓度. 每次采样放入 6 个经灭菌处理 (121°C 和 30 min) 的 93 mm 玻璃培养皿, 每个培养皿内装有 30 mL 适应于相应微生物生长的培养基. 采样完成后, 迅速将培养皿取出、加盖、倒置, 然后放入培养箱内培养. 细菌采用营养琼脂培养基, 37°C 培养箱内培养 48 h ; 真菌采用沙氏培养基, 28°C 培养箱内培养 72 h ; 放线菌采用高氏一号培养基, 28°C 培养箱内培养 120 h . 每次采样前后, 使用 75% 的酒精对 Andersen 采样仪的各级进行消毒处理.

为了避免培养皿上微生物粒子的重叠现象, 采用式 (1) 的活性微生物粒子数校正公式^[22]:

$$\text{Pr} = N \cdot \left[\frac{1}{N} + \frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \cdots + \frac{1}{N-r-1} \right] \quad (1)$$

式中, Pr 和 r 分别表示校正后菌落数和实际菌落数; N 为采样器各级采样孔数.

然后根据采样时间 t 和采样流量 Q , 由公式 (2) 可以得出各级空气中微生物气溶胶的数浓度:

$$c = \frac{\text{Pr} \times 1000}{t \times Q} \quad (2)$$

式中, c 表示空气微生物浓度, 以菌落形成单位表示 ($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$).

2 结果与讨论

2.1 微生物气溶胶的浓度水平

厂内各个处理单元均检测出细菌、真菌和放线菌, 其气溶胶浓度水平如图 2 所示. 其中每一个采样点的浓度结果均由算术平均值和标准偏差组成. 从图 2 可以看出, 各采样点的细菌气溶胶浓度从高到低依次为: 污泥脱水车间 [$(7866 \pm 970) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$] > 氧化沟 [$(4328 \pm 347) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$] > 曝气沉砂池 [$(3117 \pm 233) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$] > 终沉池 [$(2755 \pm 212) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$] > 出水口 [$(1696 \pm 96) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$] > 背

景值 $[(1\,165 \pm 39)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}]$. 对于真菌气溶胶,各采样点的浓度从高到低的顺序为:氧化沟 $[(2\,156 \pm 119)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 污泥脱水车间 $[(1\,014 \pm 51)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 曝气沉砂池 $[(910 \pm 55)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 终沉池 $[(850 \pm 41)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 出水口 $[(822 \pm 70)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 背景值 $[(599 \pm 87)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}]$. 而对于放线菌气溶胶,其浓度由高到低表现为:污泥脱水车间 $[(2\,139 \pm 229)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 氧化沟 $[(1\,705 \pm 96)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 曝气沉砂池 $[(1\,291 \pm 69)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 终沉池 $[(949 \pm 120)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 出水口 $[(902 \pm 54)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 背景值 $[(473 \pm 46)\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}]$.

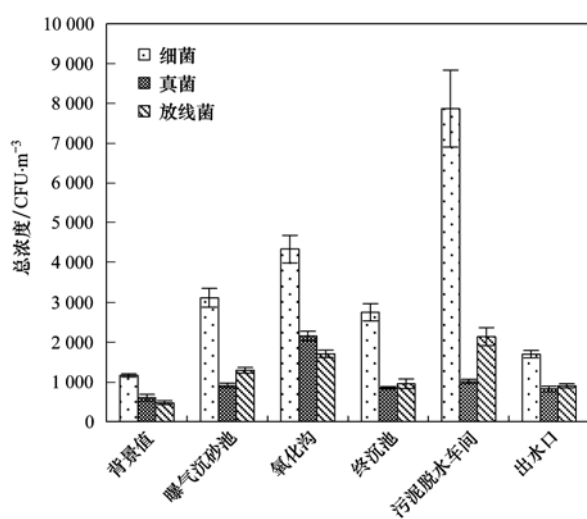


图2 各采样点微生物气溶胶的浓度比较

Fig. 2 Comparison of airborne microorganism concentrations at different sampling sites

显然,对于污水处理厂各处理单元,检测的3类微生物气溶胶的浓度均大于各自的背景值,其中细菌和放线菌气溶胶浓度最大值出现在污泥脱水车间,而真菌气溶胶浓度的最大值均出现在氧化沟.同

时还发现,凡是有曝气(比如氧化沟)和高速机械操作(污泥脱水车间)的处理单元,3类微生物气溶胶的浓度都较高.根据文献[23]规定的我国室内空气中细菌浓度 $2\,500\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 的限值,污泥脱水车间的细菌浓度已经达到标准的3.1倍,超标严重,而氧化沟的值略小于这个限值,这一方面表明高强度机械操作和曝气是污水处理厂微生物气溶胶的主要源,另一方面也说明了室内外空气流通程度对细菌气溶胶的浓度水平有十分重要的影响.由于目前国内没有真菌和放线菌的浓度限值可供参考,这里未能对它们是否超标进行评估.

2.2 微生物气溶胶的粒径分布

图3为污水处理厂生成的3类微生物气溶胶的粒径分布.这里的浓度是各个处理单元生成的微生物气溶胶的浓度之和.可以看到,污水厂生成的细菌、真菌和放线菌气溶胶的粒径分布均呈现负偏态分布,但是峰值对应的粒径范围不同.其中,细菌与真菌气溶胶浓度最高出现在 $2.1 \sim 3.3\mu\text{m}$ 范围,对应的频率分别为25.5%和29.8%;放线菌气溶胶浓度最高出现在 $1.1 \sim 2.1\mu\text{m}$ 范围,对应的频率为33.8%.从图3中还可以看出,3类微生物气溶胶的粒径主要分布在 $1.1 \sim 4.7\mu\text{m}$,分别占细菌、真菌和放线菌气溶胶总数的61.2%、67%和62.8%.这主要是由于污泥脱水车间和氧化沟这2个最主要的微生物气溶胶源生成的气溶胶粒径绝大多数在 $1.1 \sim 4.7\mu\text{m}$ 范围.这一点还可以从图4中更清楚地看到.另外,图3的结果也表明在 $<1.1\mu\text{m}$ 的气溶胶中也存在着真菌.这是因为本研究分析检测的是总真菌,即包括了个体微小的 $1\mu\text{m}$ 左右的单细胞真菌或孢子,也包括了个体稍大的多细胞真菌.

图4统计了各污水处理单元生成的微生物气溶胶的粒径频率分布.由图4可见,污水处理厂各处理

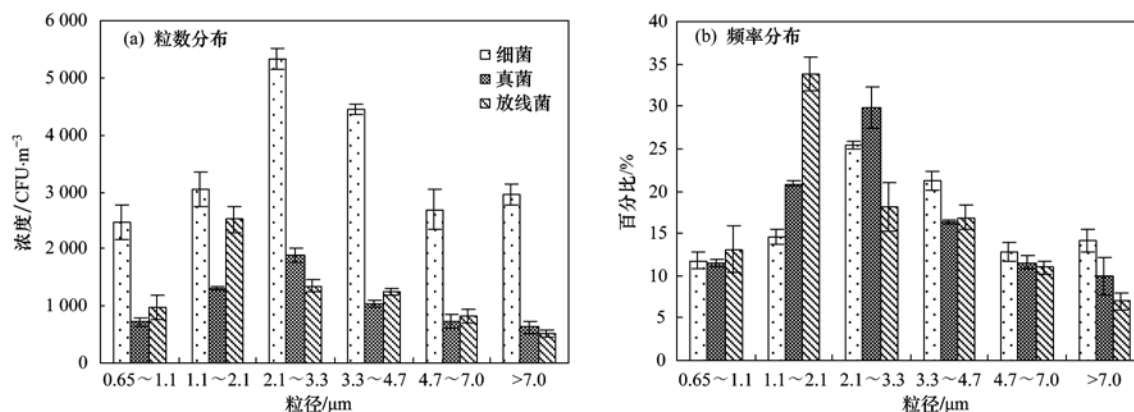


图3 污水处理厂空气微生物气溶胶的粒径分布

Fig. 3 Size distributions of airborne microorganisms at the 3rd sewage treatment plant of Xi'an

单元生成的细菌、真菌和放线菌气溶胶的粒径分布尽管也呈现偏正态分布,但是也存在着较大的差异.从图 4(a)可以看出,曝气沉砂池、氧化沟、终沉池和污泥脱水车间的细菌气溶胶的粒径分别集中在 2.1 μm 以上、1.1 ~ 4.7 μm 、2.1 μm 以上和 0.65 ~ 4.7 μm , 分别占总数的 82.2%、65.9%、71.3% 和 83.8%, 其中前三者的峰值都分布在 2.1 ~ 3.3 μm , 而污泥脱水车间的峰值分布在 3.3 ~ 4.7 μm . 从图 4(b)可以看出,曝气沉砂池、氧化沟、终沉池和污泥

脱水车间生成的真菌气溶胶的绝大多数都分布在 1.1 ~ 3.3 μm 范围,分别占总数的 57.6%、50.7%、48.2% 和 55.9%. 各污水处理单元的峰值均出现在 2.1 ~ 3.3 μm . 从图 4(c)可以看出,曝气沉砂池、终沉池、污泥脱水车间的放线菌气溶胶均在 1.1 ~ 2.1 μm 出现峰值,且此时的粒径频率较高,分别占总数的 31.1%、37.5%、32.0%. 氧化沟的峰值出现在 3.3 ~ 4.7 μm , 占总数的 30.9%.

2.3 微生物气溶胶的中值直径

根据粒径频率分布,又计算得到了各个处理单元生成的 3 类微生物气溶胶的中值直径,如表 1 所示. 可以观察到,除氧化沟之外,每一处理单元上 3 类微生物气溶胶中值直径的高低顺序是相同的,即细菌气溶胶中值直径 > 真菌气溶胶中值直径 > 放线菌气溶胶中值直径. 这可能是因为细菌主要吸附在尘埃粒子表面,而真菌和放线菌则是以单个孢子的形式存在于空气中的缘故^[24,25]. 另外还可以发现,不同处理单元上同一类微生物气溶胶的中值直径也不相同. 细菌、真菌和放线菌气溶胶中值直径最大值分别出现在曝气沉砂池、氧化沟和氧化沟,最小值均在污泥脱水车间. 这表明,曝气沉砂池和氧化沟生成的微生物气溶胶的粒径普遍大于污泥脱水车间. 这主要与曝气沉砂池所采用的鼓风曝气方式以及氧化沟所采用的转刷曝气方式容易逸出较大的气溶胶粒径有关.

表 1 还给出了污水处理厂总的 3 类微生物气溶胶的中值直径,分别是细菌气溶胶约为 3.2 μm ,真菌气溶胶约为 2.8 μm ,放线菌气溶胶约为 2.3 μm . 根据肺气体动力学试验的研究结果,2.1 ~ 3.3 μm 的气溶胶粒子在人的支气管沉积率最大,且粒径越小越容易沉积. 因此污水处理厂生成的放线菌相比细菌和真菌气溶胶更容易进入人体的支气管,从而造成潜在的健康危害,这一点需要引起足够的重视.

表 1 不同污水处理单元微生物气溶胶的中值直径/ μm

Table 1 Median diameters of airborne microorganisms at different wastewater treatment units/ μm

位置	细菌	真菌	放线菌
曝气沉砂池	4.0	2.7	2.4
氧化沟	3.1	3.0	3.7
终沉池	3.4	2.9	2.2
污泥脱水车间	2.9	2.4	2.0
污水处理厂	3.2	2.8	2.3

2.4 微生物气溶胶的空间变化

为了考察微生物气溶胶浓度的空间变化,分别在氧化沟与曝气沉砂池的下风向 1 ~ 10 m 处采样,

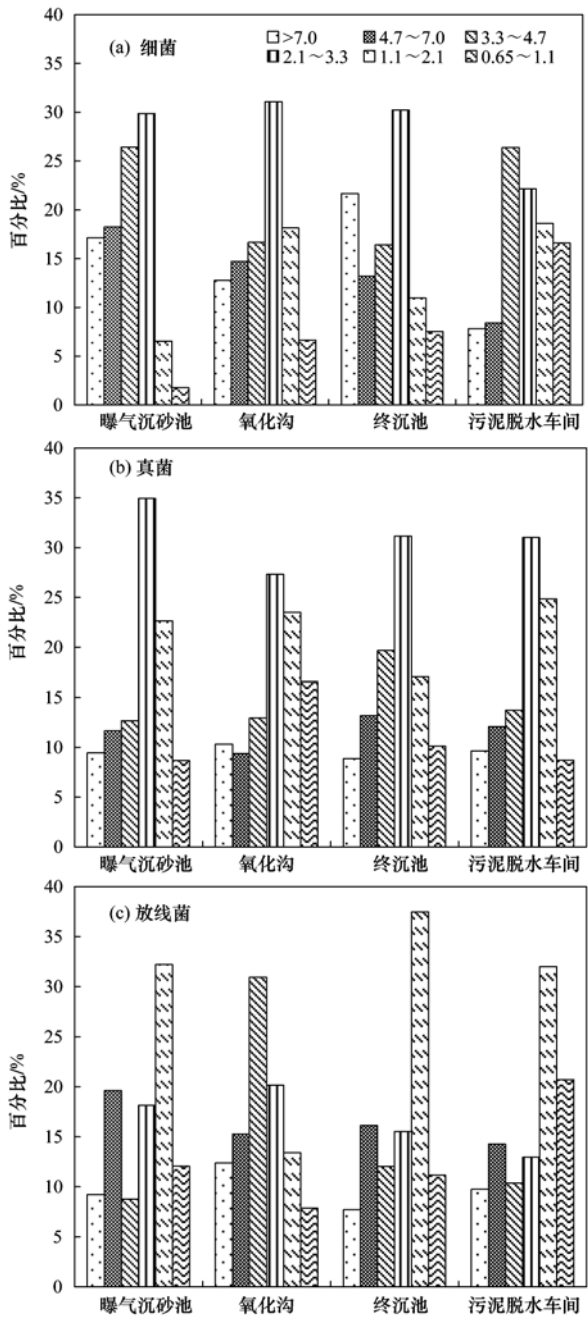


图 4 各污水处理单元微生物气溶胶的粒径频率分布

Fig. 4 Size frequency distributions of airborne microorganisms at different wastewater treatment units

进行对比分析. 图 5 为不同微生物粒子浓度的空间变化情况. 从中可以看出, 从下风向 1~10 m 处, $>7.0\ \mu\text{m}$ 的细菌、真菌和放线菌粒子的浓度减少非常明显, 而 $0.65\sim1.1\ \mu\text{m}$ 的 3 类微生物粒子的浓度减少率均较小. 这表明, 不同粒径大小的微生物气溶胶的浓度减少率随下风向距离的变化情况不同, 粒径大的浓度减少率大, 粒径小的浓度减少率小. 从 3 类微生物之间的比较来看, 细菌气溶胶的浓度减少率随粒径的变化而变化的程度最大, 真菌次之, 放线菌最小.

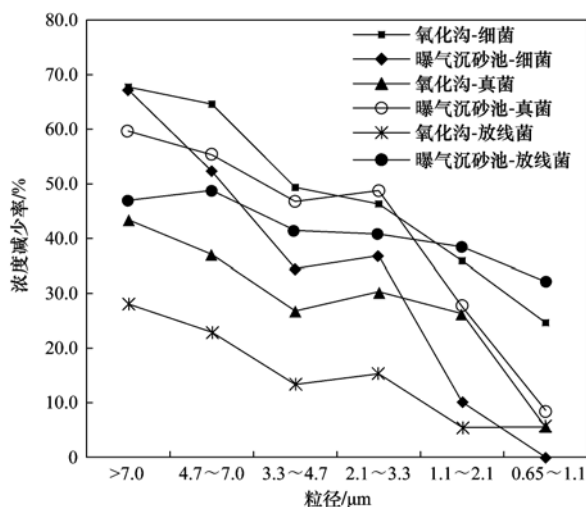


图 5 不同粒径的微生物气溶胶浓度变化

Fig. 5 Concentration variations of airborne microorganisms with different particle sizes

3 结论

(1) 污水处理厂内各个处理单元均检测出细菌、真菌和放线菌微生物气溶胶, 但是它们在各处理单元的浓度值存在很大差异, 其中细菌和放线菌气溶胶浓度最大值出现在污泥脱水车间, 而真菌气溶胶浓度的最大值出现在氧化沟. 污泥脱水车间的细菌气溶胶浓度超过我国《室内空气质量标准》规定限值的 3.1 倍.

(2) 污水处理厂生成的细菌、真菌和放线菌气溶胶的粒径分布均呈正偏态分布, 但粒径分布的范围各不相同. 细菌和真菌气溶胶粒径分布的峰值出现在 $2.1\sim3.3\ \mu\text{m}$, 放线菌气溶胶粒径分布的峰值出现在 $1.1\sim2.1\ \mu\text{m}$.

(3) 除氧化沟之外, 污水处理厂每一处理单元上 3 类微生物气溶胶中值直径的高低顺序均为: 细菌气溶胶中值直径 $>$ 真菌气溶胶中值直径 $>$ 放线菌气溶胶中值直径. 不同处理单元上同一类微生物气

溶胶的中值直径各不相同.

(4) 不同粒径大小的微生物气溶胶的浓度减少率随下风向距离的变化情况不同, 粒径大的浓度减少率大, 粒径小的浓度减少率小. 在研究的 3 类微生物气溶胶中, 细菌气溶胶的浓度减少率随粒径变化而变化的程度最大, 真菌次之, 放线菌最小.

参考文献:

- [1] 唐小东, 王伯光, 赵德俊, 等. 城市污水处理厂的挥发性恶臭有机物组成及来源[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(4): 576-583.
- [2] 高敏, 李琳, 刘俊新. 典型城市污水处理工艺微生物气溶胶逸散研究[J]. 给水排水, 2010, **36**(9): 146-150.
- [3] Brandi G, Sisti M, Amagliani G. Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems[J]. Journal of Applied Microbiology, 2000, **88**(5): 845-852.
- [4] 于森, 孙群, 宋志文, 等. 自由表面流人工湿地微生物气溶胶研究[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(2): 8-12.
- [5] Wlazio A, Pastuszka J S, Łudzeń-Izbińska B. Assessment of workers' exposure to airborne bacteria at a small wastewater treatment plant[J]. Medycyna Pracy, 2002, **53**(2): 109-114.
- [6] Pascual L, Pérez-Luz S, Yáñez M A, et al. Bioaerosol emission from wastewater treatment plants[J]. Aerobiologia, 2003, **19**(3-4): 261-270.
- [7] 胡利锋, 方治国, 欧阳志云, 等. 北京市室外空气真菌分布特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 222-271.
- [8] Heinonen-Tanski H, Reponen T, Koivunen J. Airborne enteric coliphages and bacteria in sewage treatment plants[J]. Water Research, 2009, **43**(9): 2558-2566.
- [9] Laitinen S, Kangas J, Kotimaa M, et al. Workers' exposure to airborne bacteria and endotoxins at industrial wastewater treatment plants[J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1994, **55**(11): 1055-1060.
- [10] 胡庆轩, 徐秀芝, 姜黎. 采样时间对空气微生物采样效果的影响[J]. 上海环境科学, 1997, **16**(5): 17-20.
- [11] Sánchez-Monedero M A, Aguilar M I, Fenoll R, et al. Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2008, **42**(14): 3739-3744.
- [12] Fracchia L, Pietronave S, Rinaldi M, et al. Site-related airborne biological hazard and seasonal variations in two wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2006, **40**(10): 1985-1994.
- [13] Karra S, Katsivela E. Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site[J]. Water Research, 2007, **41**(6): 1355-1365.
- [14] Dowd S E, Gerba C P, Pepper I L, et al. Bioaerosol transport modeling and risk assessment in relation to biosolid placement[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(1): 343-348.

- [15] Carducci A, Gemelli C, Cantiani L, *et al.* Assessment of microbial parameters as indicators of viral contamination of aerosol from urban sewage treatment plants [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1999, **28**(3): 207-210.
- [16] 于玺华. 现代空气微生物学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002. 10-11.
- [17] 张靖, 夏立江, 杜文利, 等. 垃圾填埋场空气真菌群落结构和时空分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3184-3188.
- [18] Li L, Gao M, Liu J X. Distribution characterization of microbial aerosols emitted from a wastewater treatment plant using the Orbal oxidation ditch process [J]. *Process Biochemistry*, 2011, **46**(4): 910-915.
- [19] Lacey J, Crook B. Fungal and actinomycete spores as pollutants of the workplace and occupational allergens [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1988, **32**(4): 515-533.
- [20] Zaitlin B, Watson S B. Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: myths, tenets and truths [J]. *Water Research*, 2006, **40**(9): 1741-1753.
- [21] Terkina I A, Drukker V V, Parfenova V V, *et al.* The biodiversity of actinomycetes in Lake Baikal [J]. *Microbiology*, 2002, **71**(3): 346-349.
- [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] GB/T 1883-2002, 室内空气质量标准[S].
- [24] 胡庆轩, 车凤翔, 张松乐, 等. 京、津地区大气微生物的浓度 [J]. *环境科学*, 1989, **10**(5): 30-35.
- [25] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市三个功能区空气微生物中值直径及粒径分布特征 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3220-3224.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人