

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对疏自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性

张崇森,袁琳,许鹏程,刘可欣

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院,国家非传统水资源开发利用国际科技合作基地,西北水资源与环境生态教育部重点实验室,西安 710055)

摘要:为阐明喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性,利用大肠杆菌 NK5449 作为试验菌株,通过喷泉喷洒试验,使用安德森六级空气采样器采集喷泉周围空间的细菌气溶胶,研究各级细菌气溶胶的浓度和粒径分布特征和变化规律,并分析其与液滴直径的相关性.结果表明,在高度 0.75 ~ 1.75 m,距离喷头 0.5 ~ 3 m 的范围内,细菌气溶胶总浓度在 $(38 \pm 15) \sim (676 \pm 92)$ CFU·m⁻³ 之间,并随着高度的增加和与喷头之间水平距离的增大而逐渐降低,且与液滴直径呈显著负相关($P < 0.05$);随着与喷头水平距离的增大,粒径大于 4.7 μm 的细菌气溶胶粒子所占比例出现先降后升的变化趋势;而粒径在 2.1 ~ 4.7 μm 之间的粒子所占比例则是先升后降.与喷头水平距离 0.5 m 以外的各点,细菌气溶胶粒子的粒径大都集中在 1.1 ~ 4.7 μm 范围内.距离喷泉较远处的人吸入小粒径细菌气溶胶的风险不容忽视.

关键词:喷泉;细菌气溶胶;空间分布;粒径;液滴直径

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0911-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201608102

Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain

ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, LIU Ke-xin

(Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education; International Science and Technology Cooperation Center for Urban Alternative Water Resources Development; School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To illuminate the spatial distribution of bacterial aerosols produced by fountain, sprinkler test was conducted in this study. *Escherichia coli* NK5449 was used as the test strain, and bacterial aerosols were sampled by Anderson six-stage air sampler at different sites around the sprinkler. The concentration and particle size distribution of bacterial aerosols and the correlation between droplet diameter and bacterial aerosols concentration were analyzed. The results showed that the concentration of bacterial aerosols ranged from (38 ± 15) CFU·m⁻³ to (676 ± 92) CFU·m⁻³ in the space of 0.75 m to 1.75 m from the ground and 0.5 m to 3 m away from the sprinkler. The bacterial aerosol concentration decreased along with the increase of the height and the distance between the sampling site and the sprinkler, and had significant negative correlation with droplet diameter ($P < 0.05$). With the increase of the distance to sprinkler, the proportion of bacterial aerosol particles with size of larger than 4.7 μm decreased at first and increased subsequently; while the proportion of bacterial aerosol particles with size between 2.1 and 4.7 μm increased firstly and then decreased. The bacterial aerosol particles mainly existed in the part with size between 1.1 and 4.7 μm at sampling sites more than 0.5 m away from the sprinkler. It indicated that bacterial aerosols with small size may be inhaled by people far away from the fountain, and the risk should not be ignored.

Key words: fountain; bacterial aerosols; spatial distribution; particle size; droplet diameter

近年来,为了提升城市形象和人居环境品质,城市水景观营造方兴未艾.喷泉是最常见的一种水景观形式,能够湿润空气、减少尘埃,在城市中有广泛地应用.随着污水资源化的不断发展,再生水景观回用越来越受到重视^[1,2].使用再生水制造喷泉,对人体健康造成的风险是人们最为关注的问题.有研究发现,经过深度处理后的再生水中的微生物数量仍然较高^[3~5],其中不乏沙门氏菌^[6]和耐药性大肠杆菌^[7].通过喷泉的喷洒和雾化作用,黏附在细小液滴或固体颗粒上的病原菌进入空间形成气溶胶,从而在空间中广泛散播^[8,9],对附近人们的健康构

成威胁^[10~12].

目前,有关细菌气溶胶的研究主要集中在两个方面:不同地区的大气中细菌气溶胶的种群多样性和季节变化规律^[13~15];特定区域(污水处理厂、畜禽养殖场)中的细菌气溶胶分布特征和影响因素^[16~21],而鲜有与喷泉相关的细菌气溶胶研究报

收稿日期: 2016-08-15; 修订日期: 2016-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578441); 陕西省自然科学研究专项项目(15JK1442); 国家科技支撑计划项目(2014BAC13B06); 陕西省污水处理与资源化重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

作者简介: 张崇森(1978~),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为再生水回用的风险控制, E-mail: zhangchongmiao@163.com

道. 喷泉周围的细菌气溶胶浓度可能与空间位置^[22]、液滴尺寸等因素有关^[23],这些都亟待通过研究揭示其规律.

本研究使用喷泉装置进行喷洒试验,通过测定不同空间位置处的细菌气溶胶和液滴直径,分析细菌气溶胶浓度和粒径的空间分布特征以及与液滴直径的关系,以期为再生水景观回用的标准制定和风险评估提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验菌株和喷洒用水

为了保证检测的准确性和灵敏度,使用对利福平和萘利得酸耐药的大肠杆菌 NK5449 作为试验菌株. 在 LB 肉汤中, 37℃、145 r·min⁻¹ 振荡培养 14 h 活化菌种得到浓度约为 10⁹ CFU·mL⁻¹ 的菌液. 向总容量为 300 L 的水箱中加入 150 mL 菌液,使水箱中的最终菌液浓度为 10⁵ CFU·mL⁻¹. (在试验过程中喷洒用水的菌浓度稳定在 3.1 × 10⁵ ~ 5.4 × 10⁵ CFU·mL⁻¹ 范围内).

1.2 喷泉装置和喷洒试验

在室内无风条件下进行喷洒试验,屋顶高度 3.5 m. 使用 WZW20-8 型子弹头喷头,喷头距地面高度为 1 m,最大喷洒半径为 3.4 m,控制流量为 7.5 L·min⁻¹,工作压力 0.1 MPa,试验装置如图 1 所示.

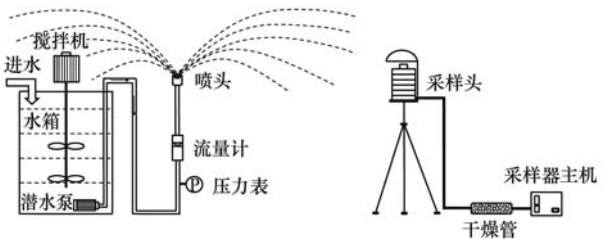


图 1 喷洒试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of sprinkler test

1.3 液滴直径测量

将曙红和滑石粉按 1:10 混匀涂抹于直径为 15 cm 的中速定性滤纸上(杭州特种纸业有限公司)制成色斑纸. 测定由 6 种不同型号针管滴出的水滴重量,根据球体积公式计算出每个液滴直径,并用每种针管分别滴 20 滴水在色斑纸上,测量产生的色斑直径的平均值. 利用回归分析得出使用该色斑纸时液滴直径 d 与色斑直径 D 间的回归公式^[24].

将色斑纸置于抽拉盒中,在距离地面 0.75、1、1.25、1.5、1.75 m 处,距离喷头 0.5、1、1.5、2、2.5、3 m 远处迅速收集液滴. 每个采样点做 3 个平行样,随机选取 20 个色斑测量直径,计算各采样点处对应的液滴直径,取平均值.

1.4 气溶胶采集与细菌培养

本试验采用安德森六级空气采样器(陕西鑫昌实验设备有限公司,FA-I 型),各级参数如表 1 所示. 采样时空气流量为 28.3 L·min⁻¹.

表 1 安德森六级空气采样器各级特征

Table 1 Characteristics of each level of Anderson six-stage air sampler

级数	孔径/ μm	采集粒子粒径/ μm	有效截留粒径/ μm	进入最深层对应人体呼吸器官
第 1 级	1.18	≥ 7.0	7.0	鼻
第 2 级	0.91	4.7 ~ 7.0	4.7	咽
第 3 级	0.71	3.3 ~ 4.7	3.3	气管、一级支气管
第 4 级	0.53	2.1 ~ 3.3	2.1	二级支气管
第 5 级	0.34	1.1 ~ 2.1	1.1	三级支气管
第 6 级	0.25	0.65 ~ 1.1	0.65	肺部

将 50 mg·mL⁻¹ 利福平(合肥博美生物科技有限公司)和 10 mg·mL⁻¹ 萘利得酸(北京索莱宝科技有限公司)加入灭菌后的营养琼脂中,制成终浓度为利福平 300 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ + 萘利得酸 100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的抗性平板. 将制备好的抗性平板置于气溶胶采样器的各级采样头中,在 1.3 节中的相对应点处采集细菌气溶胶,每次采集 45 min,做 3 组平行. 采样结束后,将抗性平板在无菌条件下取出并加盖,在 37℃ 下倒置培养 24 h.

1.5 细菌气溶胶浓度和粒径分析

在采样过程中,气溶胶粒子在平皿内着落时存在重叠,需采用 Positive-hole 法^[25]对菌落数进行纠正:

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

式中, P_r 为校正后的细菌数量; N 为各级采样孔数; r 为实测菌落数.

根据校正后的细菌数量 P_r 、采样空气流量 Q 和采样时间 t 来计算空气中细菌气溶胶浓度。

$$c = \frac{P_r \times 1\,000}{t \times Q} \quad (2)$$

式中, c 为细菌气溶胶浓度 ($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$); Q 为采样空气流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为采样时间 (min)。

根据第 1~6 级的细菌气溶胶粒子数, 统计各级粒子数的累计百分比, 得出各级有效截留粒径与累计百分比之间的直线回归方程, 当累计百分比为 50% 时对应的粒径即为该采样点的细菌气溶胶粒子的中值粒径^[26]。

1.6 数据统计分析

使用 SPSS Version 13.0 软件, 对细菌气溶胶浓度、粒径分布差异显著性、液滴直径差异的显著性进行 t 检验分析, 对细菌气溶胶浓度与液滴直径进行 Spearman 相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 喷泉周围液滴直径分布

经计算, 使用该型号色斑纸时, 液滴直径 d 与色斑直径 D 间的回归公式为:

$$d = 0.377D^{0.711} \quad (R^2 = 0.995)$$

根据该公式计算出的不同位置的液滴直径分布如图 2 所示。

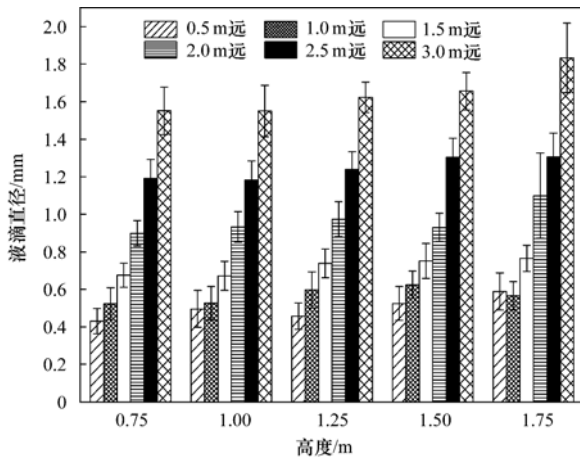


图 2 各采样点处的液滴直径

Fig. 2 Diameter of droplet at different sampling points

采集点距离喷头 2 m 以内的液滴直径大都处于 0.3~1 mm 之间, 属中等大小液滴, 在 2 m 以外液滴直径均大于 1 mm, 属较大液滴^[27]。当高度相同时, 在采集范围内, 距喷头越远, 液滴直径越大。经 t 检验分析可知, 高度 1 m 时, 0.5 m 远与 1 m 远处的液滴直径无显著差异 ($P > 0.05$), 高度 1.75 m 时, 0.5 m 远与 1 m 远处的液滴直径也无显著差异 ($P >$

0.05), 其余高度相同但水平距离相差 0.5 m 以上的两点间, 液滴直径均有显著差异 ($P < 0.05$)。而当采集点与喷头间距离相同时, 随着高度的增加液滴直径并没有明显的变化趋势, 以往有关雾化水滴和洒水水滴的研究也得到了类似的结果^[28,29]。

2.2 细菌气溶胶的浓度分布

喷泉周围空间内的细菌气溶胶总浓度在 $(38 \pm 15) \sim (676 \pm 92) \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 采样点的高度以及喷头水平距离对细菌气溶胶浓度有显著影响 (图 3)。当与喷头的距离一定时, 在 0.75~1.75 m 的高度范围内, 细菌气溶胶浓度随高度增加而降低。在 0.75 m 高度处的细菌气溶胶浓度大都显著大于其余高度处 ($P < 0.05$)。当采样点高度相同时, 距喷头越远, 细菌气溶胶浓度越小, 这与液滴直径的变化趋势相反。经 Spearman 相关性分析发现, 在 0.75~1.75 m 的范围内, 当高度相同时, 细菌气溶胶浓度均与液滴直径呈显著负相关 ($P < 0.05$), 说明液滴直径越大, 雾化程度越低, 微生物气溶胶浓度越小。另外, 有研究表明: 温湿度、太阳辐射及风速对于微生物气溶胶浓度的影响较大, 微生物气溶胶浓度会随湿度和温度的增加而增大^[30]; 而当风速增大时, 由于气流扩散作用, 则会使微生物气溶胶浓度降低^[31,32], 并且太阳辐射强度增大时, 紫外杀菌作用也会导致微生物气溶胶浓度的降低^[32]。因此, 当喷泉处于室外空间时, 湿度会略低于喷泉工作时的室内湿度, 再加上风速和辐射强度也会相应增大, 所以在喷泉周围的微生物气溶胶浓度相比室内会有所降低。值得注意的是, 风力虽然会稀释喷泉周围的微生物气溶胶, 但是同时会增大其扩散范围, 这无疑会增大对距离喷泉较远处人群的潜在威胁。

此外, 研究发现随水平距离的增加, 细菌气溶胶浓

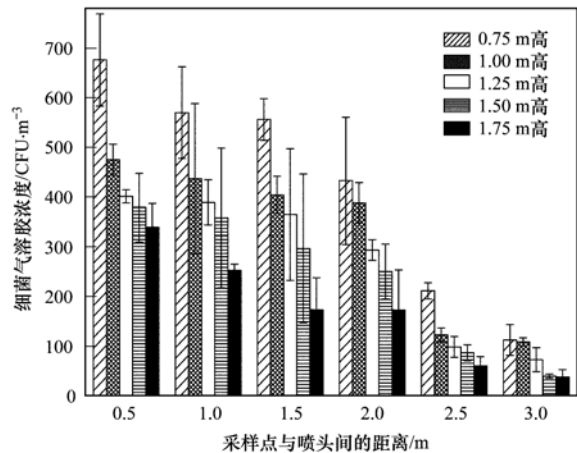


图 3 各采样点处细菌气溶胶总浓度

Fig. 3 Concentration of bacterial aerosols at different sites

度在单位距离上的降低率有所不同(表2). 水平距离相差 0.5 m 时,同一高度处的细菌气溶胶浓度降低幅度相差很大,最大的降低率出现在 2~2.5 m 处,降低率均在 50% 以上. 在高度为 1 m 时,从 388 CFU·m⁻³降至 123 CFU·m⁻³,降低率最大,高达 68.3%.

表 2 细菌气溶胶浓度的降低率/%

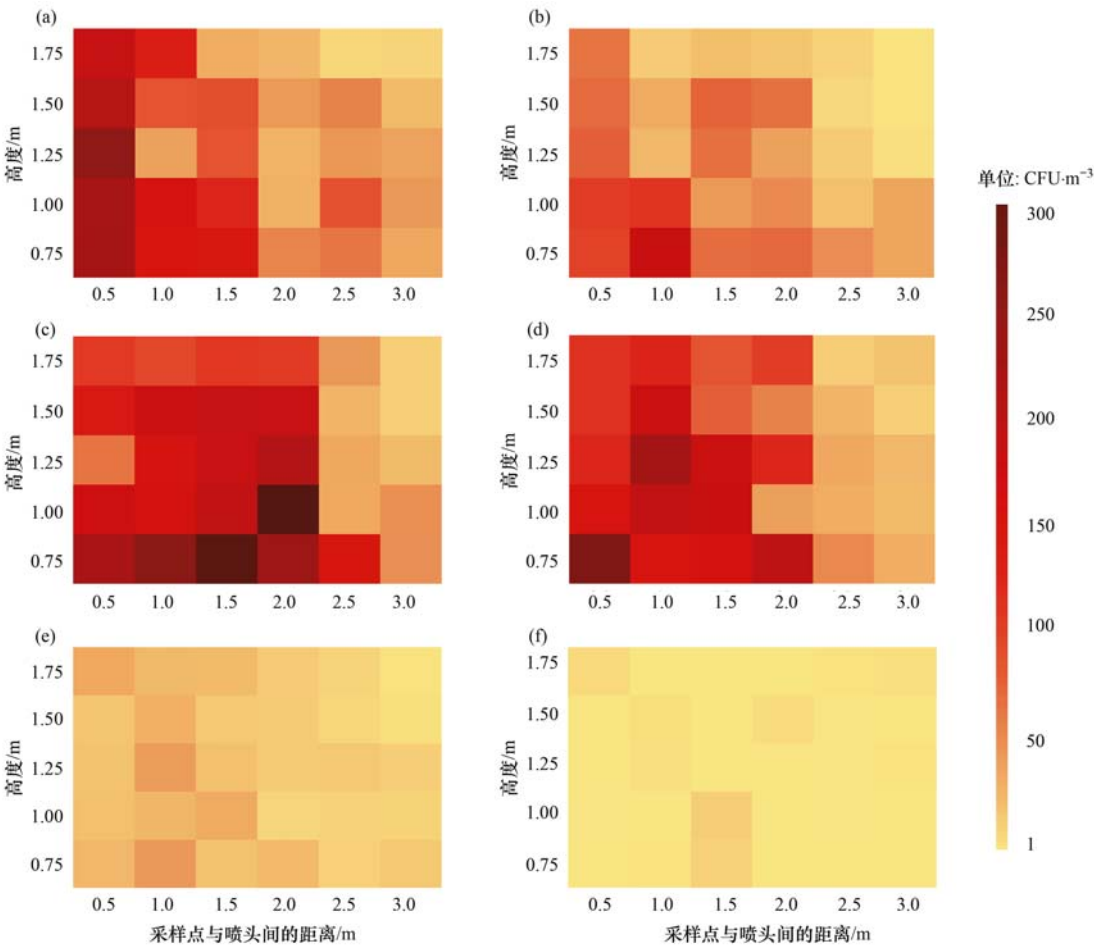
Table 2 Decreasing rate of bacterial aerosols concentration/%					
高度/m	0.5~1 m	1~1.5 m	1.5~2 m	2~2.5 m	2.5~3 m
0.75	15.7	2.5	22.1	51.0	46.7
1.00	8.0	7.6	4.0	68.3	11.4
1.25	3.0	6.2	19.5	66.3	26.3
1.50	5.5	17.0	15.5	65.3	54.0
1.75	25.4	31.2	0.6	64.7	37.1

各级细菌气溶胶浓度在 30 个采样点上的空间分布如图 4 所示. 第 1 级(粒径 >7.0 μm)、第 2 级(粒径 4.7~7.0 μm)、第 3 级(粒径 3.3~4.7 μm)、第 4 级(粒径 2.1~3.3 μm)、第 5 级(粒径 1.1~2.1 μm)和第 6 级(粒径 0.6~1.1 μm)细菌

气溶胶浓度的平均值分别为 64、33、100、72、13 和 2 CFU·m⁻³. 从整体上来看,第 3 级和第 4 级的浓度较高,第 1 级和第 2 级次之,第 5 级和第 6 级浓度最低. 在距离喷头较近的位置,大粒径的细菌气溶胶浓度明显高于其他各级. 例如与喷头水平距离 0.5 m 的各个高度处,第 1 级细菌气溶胶浓度甚至高于第 3 级和第 4 级. 与喷头水平距离 2 m 以外,细菌气溶胶浓度明显下降,这在浓度最高的第 3 级上体现明显.

2.3 细菌气溶胶的粒径分布

不同位置处的细菌气溶胶粒径分布如图 5 所示. 从 30 个采样点的整体情况来看,第 1 级(粒径 >7.0 μm)、第 2 级(粒径 4.7~7.0 μm)、第 3 级(粒径 3.3~4.7 μm)、第 4 级(粒径 2.1~3.3 μm)、第 5 级(粒径 1.1~2.1 μm)和第 6 级(粒径 0.6~1.1 μm)的细菌气溶胶粒子浓度分别为 7~181 CFU·m⁻³、2~126 CFU·m⁻³、9~300 CFU·m⁻³、9~239 CFU·m⁻³、2~28 CFU·m⁻³、1~



(a) >7.0 μm; (b) 4.7~7.0 μm; (c) 3.3~4.7 μm; (d) 2.1~3.3 μm; (e) 1.1~2.1 μm; (f) 0.6~1.1 μm

图 4 各级细菌气溶胶浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of bacterial aerosols concentration with different particle size

9 CFU·m⁻³，所占比例分别为 5.1% ~ 53.9%、4.2% ~ 22.6%、10.7% ~ 77.5%、6.96% ~ 36.5%、2.4% ~ 13.9%、0.2% ~ 13.5%。

随着与喷头水平距离的增大,第 1 级和第 2 级的细菌气溶胶粒子所占比例出现先降后升的变化趋势;而第 3 级和第 4 级的粒子所占比例则是先升后降。从采样高度 0.75 ~ 1.75 m,都存在这种变化规律。值得注意的是,升降变化的转折点都出现在水平距离 2 m 的位置,此处也是细菌气溶胶总浓度快速降低的折点,这与喷头自身参数有关,当喷头最大喷洒半径为 3.4 m 时,浓度变化的折点则会出现距离喷头 2 m 远处的地方。第 5 级和第 6 级的细菌气溶胶粒子浓度低,所占比例大都在 10% 以下。但在水平距离 2 ~ 3 m 时,这些小粒径气溶胶粒子的比

例有升高的趋势,例如在 1.75 m 高度,2、2.5 和 3 m 远处的 0.65 ~ 1.1 μm 粒子比例分别为 0.3%、4%、13.5%。

根据肺气体动力学研究结果,粒径在 1.1 ~ 4.7 μm 之间的粒子可以进入支气管,粒径 0.65 ~ 1.1 μm 的粒子则能深入人的肺部^[16]。图 4 中显示,只有 0.5 m 远处各个高度的细菌气溶胶粒子集中在前两级(>4.7 μm),从 0.75 ~ 1.75 m 高,所占比例为 36.1% ~ 66.2%;而在其余各点处,细菌气溶胶粒子主要集中在第 3 级至第 5 级(1.1 ~ 4.7 μm),所占比例范围为 42.6% ~ 86.2%。由此可见,在喷泉周围空间中,小粒径细菌气溶胶的比例并未随着与喷泉间距离的增大而减小。即使人处于远处,吸入细菌气溶胶的风险依然存在。

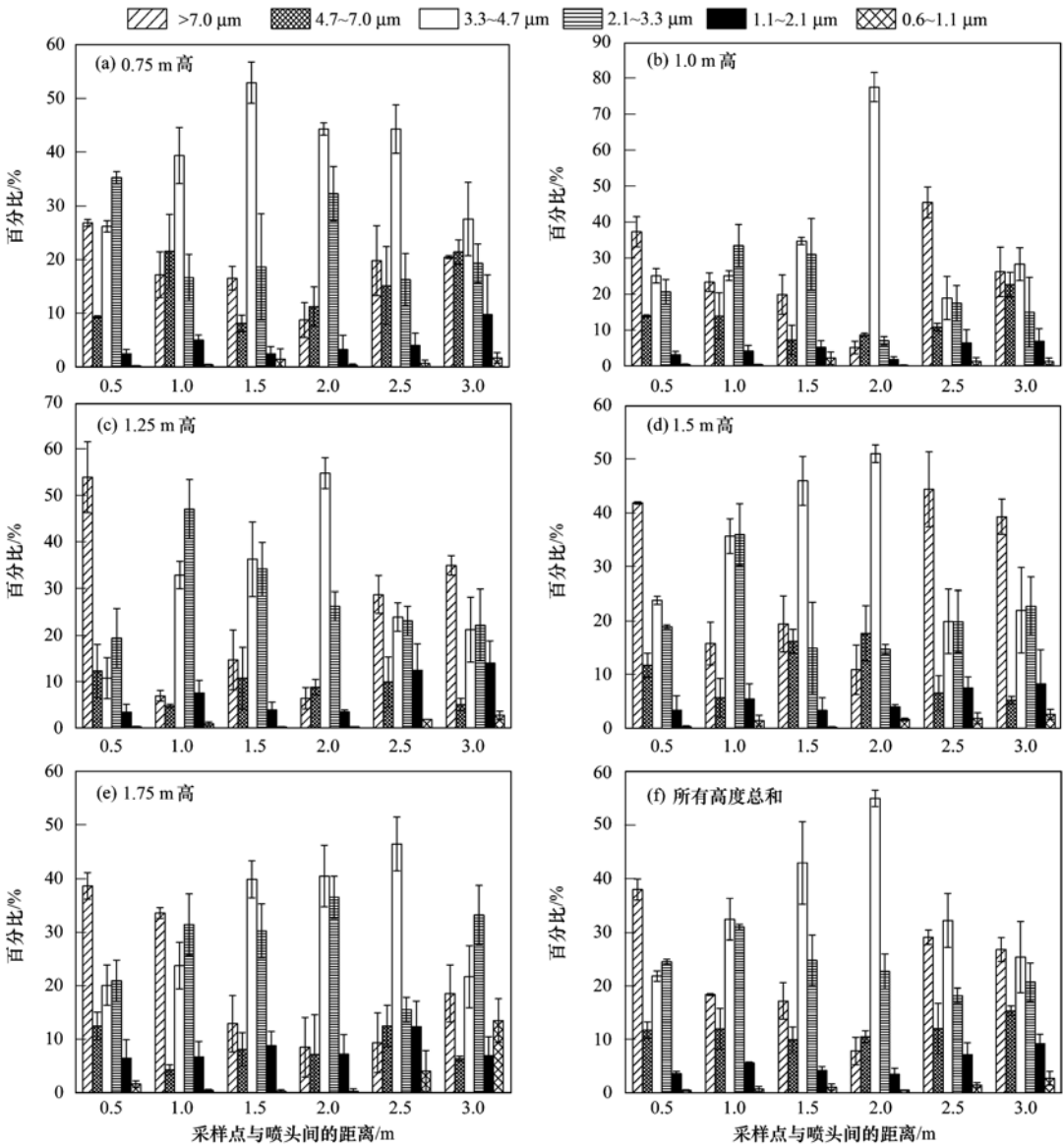


图 5 不同采样点的细菌气溶胶粒径分布

Fig. 5 Size distributions of bacterial aerosols at different sites

各点的中值粒径在 3.0 ~ 4.4 μm 范围内 (表 3)。高度为 1.75 m 时,细菌气溶胶的中值粒径随着采样点与喷头间距离的增大而逐渐降低,从 0.5 ~ 3

m 远处,依次为 3.9、3.7、3.4、3.3、3.3、3.0 μm。这意味着在距离喷头较远处,小粒径细菌气溶胶所占的比例不容忽视。

表 3 不同点处微生物气溶胶的中值粒径/μm

Table 3 Median diameters of bacterial aerosol at different sites/μm

高度/m	0.5 m 远	1 m 远	1.5 m 远	2 m 远	2.5 m 远	3 m 远
0.75	3.7 ± 0.0	3.7 ± 0.1	3.6 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.7 ± 0.3	3.7 ± 0.1
1.00	4.0 ± 0.1	3.6 ± 0.2	3.5 ± 0.3	3.6 ± 0.0	4.1 ± 0.1	3.9 ± 0.1
1.25	4.4 ± 0.5	3.4 ± 0.0	3.5 ± 0.3	3.4 ± 0.1	3.6 ± 0.2	3.7 ± 0.0
1.50	4.1 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.8 ± 0.3	3.6 ± 0.0	4.0 ± 0.5	3.8 ± 0.2
1.75	3.9 ± 0.1	3.7 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.3 ± 0.2	3.3 ± 0.3	3.0 ± 0.4

3 结 论

(1)在距离喷头 0.5 ~ 3 m,高度 0.75 ~ 1.75 m 的范围内,当高度相同时,喷泉产生的液滴直径随采集点与喷头之间的水平距离增加而增大,大部分水平距离相差 0.5 m 以上的两点间液滴直径差异性显著。

(2)喷泉周围空间中的细菌气溶胶浓度与液滴直径呈显著负相关,随高度和与喷头的水平距离的增加而减小,距喷头 2 ~ 2.5 m 处细菌气溶胶浓度下降幅度最大。粒径 3.3 ~ 4.7 μm 的细菌气溶胶平均浓度最高。

(3)随着与喷头水平距离的增大,粒径大于 4.7 μm 的细菌气溶胶粒子所占比例出现先降后升的变化趋势;而粒径 2.1 ~ 4.7 μm 的粒子所占比例则先升后降。与喷头水平距离 0.5 m 以外的各点,细菌气溶胶粒子的粒径都集中在 1.1 ~ 4.7 μm 范围内。

参考文献:

[1] Chang D H, Ma Z. Wastewater reclamation and reuse in Beijing: influence factors and policy implications [J]. Desalination, 2012, **297**: 72-78.

[2] Zhao H J, Wang Y, Yang L L, *et al.* Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water supplemented with reclaimed water [J]. Ecological Indicators, 2015, **58**: 113-121.

[3] Sano D, Amarasiri M, Hata A, *et al.* Risk management of viral infectious diseases in wastewater reclamation and reuse: review [J]. Environment International, 2016, **91**: 220-229.

[4] Zhang S W, Bai R, Feng R, *et al.* Detection and evolutionary analysis of picobirnaviruses in treated wastewater [J]. Microbial Biotechnology, 2015, **8**(3): 474-482.

[5] Beaudequin D, Harden F, Roiko A, *et al.* Modelling microbial health risk of wastewater reuse: a systems perspective [J]. Environment International, 2015, **84**: 131-141.

[6] Odjadjare E C, Olaniran A O. Prevalence of antimicrobial resistant and virulent *Salmonella* spp. in treated effluent and receiving aquatic milieu of wastewater treatment plants in Durban, South Africa [J]. International Journal of Environmental

Research and Public Health, 2015, **12**(8): 9692-9713.

[7] Rosas I, Salinas E, Martínez L, *et al.* Characterization of *Escherichia coli* isolates from an Urban Lake receiving water from a wastewater treatment plant in Mexico City: fecal pollution and antibiotic resistance [J]. Current Microbiology, 2015, **71**(4): 490-495.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Grisoli P, Rodolfi M, Villani S, *et al.* Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and a wastewater treatment plant [J]. Environmental Research, 2009, **109**(2): 135-142.

[11] Heinonen-Tanski H, Reponen T, Koivunen J. Airborne enteric coliphages and bacteria in sewage treatment plants [J]. Water Research, 2009, **43**(9): 2558-2566.

[12] Chandran A, Varghese S, Kandeler E, *et al.* An assessment of potential public health risk associated with the extended survival of indicator and pathogenic bacteria in freshwater lake sediments [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2011, **214**(3): 258-264.

[13] 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 等. 北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒径特征 [J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3144-3149.

Hu L F, Zhang K, Wang H B, *et al.* Concentration and particle size distribution of microbiological aerosol during haze days in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3144-3149.

[14] Lee B U, Lee G, Heo K J. Concentration of culturable bioaerosols during winter [J]. Journal of Aerosol Science, 2016, **94**: 1-8.

[15] 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.

[16] Wéry N. Bioaerosols from composting facilities—a review [J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2014, **4**: 42.

[17] Niazi S, Hassanvand M S, Mahvi A H, *et al.* Assessment of bioaerosol contamination (bacteria and fungi) in the largest urban wastewater treatment plant in the Middle East [J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(20): 16014-16021.
- [18] Li L, Han Y P, Liu J X. Assessing genetic structure, diversity of bacterial aerosol from aeration system in an oxidation ditch wastewater treatment plant by culture methods and bio-molecular tools[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(1): 603-613.
- [19] Kaźmierczuk M, Bojanowicz-Bablok A. Bioaerosol concentration in the air surrounding municipal solid waste landfill[J]. Ochrona Środowiskai Zasobów Naturalnych-Environmental Protection and Natural Resources, 2014, **25**(2): 17-25.
- [20] Frączek K, Różycki H, Ropek D. Statistical analyses of bioaerosol concentration at municipal landfill site[J]. Ecological Chemistry and Engineering S, 2014, **21**(2): 229-243.
- [21] Jerez S B, Cheng Y, Bray J. Exposure of workers to dust and bioaerosol on a poultry farm[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2014, **23**(1): 7-14.
- [22] Jahne M A, Rogers S W, Holsen T M, *et al.* Emission and dispersion of bioaerosols from dairy manure application sites: human health risk assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(16): 9842-9849.
- [23] Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review[J]. Science of the Total Environment, 2004, **326**(1-3): 151-180.
- [24] Huang Y J, Huang Y Y. Research on filter paper splash procedure of raindrop diameter [J]. Advanced Materials Research, 2013, **772**: 461-466.
- [25] Andersen A A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles [J]. Journal of Bacteriology, 1958, **76**(5): 471-484.
- [26] 张婧, 夏立江, 杜文利, 等. 垃圾填埋场微生物气溶胶粒径分布研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(9): 1620-1624. Zhang J, Xia L J, Du W L, *et al.* An investigation on microbe aerosol size distribution in a waste sanitary landfill site [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(9): 1620-1624.
- [27] 张宇, 牛生杰, 贾星灿. 雨滴下落过程谱分布演变的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2013, **36**(6): 699-707. Zhang Y, Niu S J, Jia X C. Spectrum evolution in the raindrop falling process: numerical simulation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, **36**(6): 699-707.
- [28] 巩兴晖, 朱德兰, 张林, 等. 基于2DVD的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律[J]. 农业机械学报, 2014, **45**(8): 128-133, 148. Gong X H, Zhu D L, Zhang L, *et al.* Drop size distribution of fixed spray-plate sprinklers with two-dimensional video disdrometer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, **45**(8): 128-133, 148.
- [29] 徐红, 龚时宏, 贾瑞卿, 等. 新型ZY系列摇臂旋转式喷头水滴直径分布规律的试验研究[J]. 水利学报, 2010, **41**(12): 1416-1422. Xu H, Gong S H, Jia R Q, *et al.* Study on droplet size distribution of ZY sprinkler head [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(12): 1416-1422.
- [30] Jo W K, Kang J H. Workplace exposure to bioaerosols in pet shops, pet clinics, and flower gardens[J]. Chemosphere, 2006, **65**(10): 1755-1761.
- [31] Van Leuken J P G, Swart A N, Havelaar A H, *et al.* Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock—a review to inform risk assessment studies[J]. Microbial Risk Analysis, 2016, **1**: 19-39.
- [32] van Leuken J P G, Swart A N, Droogers P, *et al.* Climate change effects on airborne pathogenic bioaerosol concentrations: a scenario analysis[J]. Aerobiologia, 2016: 1-11, doi: 10.1007/s10453-016-9435-5.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)