

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

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

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产气的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布

李婉欣¹, 路瑞¹, 谢铮胜¹, 王金龙¹, 范春兰¹, 刘鹏霞¹, 李彦鹏^{1,2*}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 长安大学旱区水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 利用 Anderson 空气微生物采样器对西安市 2014 年 9 月 ~ 2015 年 1 月间可培养微生物气溶胶进行采样、培养, 分析不同空气质量下其浓度与粒径变化特征, 并对其与颗粒污染物 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})、气象参数 (温度、相对湿度) 和其它气态污染物 (NO_2 、 SO_2 、 O_3) 进行主成分 + 多元线性回归分析. 结果显示, 可培养细菌和真菌气溶胶浓度范围分别为 $97 \sim 1909 CFU \cdot m^{-3}$, $92 \sim 1737 CFU \cdot m^{-3}$. 随空气污染程度加深, 两种微生物气溶胶浓度均呈现增加趋势; 细菌气溶胶粒径分布向粗颗粒偏移; 而真菌气溶胶在低污染时呈正态分布, 高污染时粒径峰值向细颗粒偏移. 主成分分析结果显示, 可培养微生物气溶胶主要与灰霾、太阳辐射和相对湿度有关. 多元线性回归结果表明, 细菌气溶胶与灰霾呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与太阳辐射呈不显著负相关, 与湿度呈不显著正相关; 真菌气溶胶与灰霾、太阳辐射和相对湿度均呈不显著正相关. 研究结果可以为评估微生物气溶胶所引起的环境与健康效应提供基础数据.

关键词: 空气质量; 细菌气溶胶; 真菌气溶胶; 颗粒物; 气态污染物

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4494-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201703072

Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China

LI Wan-xin¹, LU Rui¹, XIE Zheng-sheng¹, WANG Jin-long¹, FAN Chun-lan¹, LIU Peng-xia¹, LI Yan-peng^{1,2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The concentration and size distribution of culturable bacteria and fungi were studied in Xi'an city at various air quality levels. The culturable bioaerosols were collected by an Andersen bioaerosol aerosol sampler between Sept. 2014 and Jan. 2015. Principal component analysis and multiple linear regressions were applied to link the concentrations with meteorological conditions including ambient temperature and relative humidity, as well as the levels of air pollutants such as $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , and O_3 . These measured results showed that the concentration of culturable bacteria and fungi were in the ranges of $97 \sim 1909 CFU \cdot m^{-3}$ and $92 \sim 1737 CFU \cdot m^{-3}$, respectively. The concentrations of culturable bioaerosols increased along with a deterioration in air quality. The size distribution of the bacteria migrated to coarse particles. Fungal aerosols showed a normal distribution at low pollution levels, while for a high levels, they preferred fine particles. Results from the principal component analysis (PCA) indicate that the concentration of culturable bioaerosols is mainly influenced by haze, solar radiation, and relative humidity. Multiple linear regression analysis showed that bacterial aerosol concentrations are positively correlated with haze ($P < 0.05$) and relative humidity, while no significant negative correlations with solar radiation exists. Fungal aerosol concentrations did not have significant positive correlations with haze, solar radiation, or relative humidity. The results of this study will provide basic data for evaluating the effects of bioaerosols on human health and the environment.

Key words: air quality; airborne bacteria; airborne fungi; particulate matter; air pollutants

西安作为中国西北部最大的城市,在过去的 20 年里,伴随着城市化和工业化的快速发展,能源的大量消耗以及交通流的迅速增加导致空气污染物排放显著增加.同时,西安又位于关中盆地中部,其特殊的地理结构以及静风少雨等气象条件使污染物更易聚集,造成西安市灰霾天气频发,空气质量变差.而大气颗粒物,尤其是细颗粒物是导致西安市空气污染的主要原因^[1].微生物气溶胶是大气气溶胶中具有生物活性的微小粒子,包括细菌、真菌、病毒、花粉、孢子、动植物碎片等^[2].作为大气气溶胶的重

要组成部分,微生物气溶胶占大气气溶胶总数的 25% ~ 30%.微生物在空气中传播和扩散,通过皮肤损伤、黏膜、消化道及呼吸道侵入机体,可引起和增加人们的皮肤过敏,呼吸道感染、哮喘气喘、心血管疾病等,对人类健康造成巨大威胁^[3~6].因

收稿日期: 2017-03-08; 修订日期: 2017-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41230314, 51208059); 中央高校基本科研业务费专项 (310829163406, 310829172001)

作者简介: 李婉欣 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究大气气溶胶方向, E-mail: liwanx01@163.com

* 通信作者, E-mail: liyanp01@chd.edu.cn

此,开展大气微生物气溶胶分布特性研究,对于了解大气环境中的微生物组成情况,制定衡量空气污染程度和大气环境质量的生物性指标,评估生物气溶胶的健康及环境效应都具有重要意义。

生物气溶胶对人体健康的影响与气溶胶的浓度水平、粒径分布和微生物组成等特性密切相关。空气微生物的浓度是其输入和衰减动态平衡的结果,存在显著的空间与时间差异。如青岛地区微生物气溶胶浓度春季为 $855 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,明显高于冬季的 $741 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ [7];而在北京,真菌生物气溶胶在夏季和秋季较高,春季和冬季较低,其中夏季最高可达 $3\,975.3 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ [8];陈梅玲等[9]的监测表明,南京市夏季细菌与真菌的平均浓度均低于春季,而在冬季与秋季,微生物气溶胶浓度会随着高度的增加而降低。Li 等[10]在西安对不同天气下的可培养微生物气溶胶进行分类讨论发现,霾天最高,云天、晴天次之,雨天最低。除此之外,空气污染程度也会影响微生物气溶胶的分布特性。王伟等[11]发现西安市秋季灰霾天暴发时,可培养细菌与真菌气溶胶浓度都会显著增加,细菌气溶胶浓度峰值会向细颗粒迁移,而真菌气溶胶则变化不大。Gao 等[12]研究发现可培养细菌气溶胶在不同程度霾天气下的浓度和粒径分布也不同,随着霾水平的增加,其总浓度均值降低,细颗粒百分比减少。还有研究表明空气中的气态污染物也会影响微生物气溶胶的分布特性。韩晨等[13]发现可培养微生物气溶胶的分布不仅受到气象因素的影响,还受到颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10})和气体污染物(NO_2 、 O_3 、 SO_2)的影响。显然,影响生物气溶胶分布的因素众多,学术界对其影响规律的认识尚未统一。且已有的对不同空气质量下微生物气溶胶变化的研究,只讨论了霾天与清洁天的差异,没有涉及不同等级的空气质量状况。

综上所述,本文以中国典型旱区城市——西安作为研究区域,采集不同空气质量下的可培养微生物气溶胶样品,分析西安地区微生物气溶胶浓度、粒径以及气象条件和各种空气质量因子的关系,确定西安市不同空气质量下可培养微生物气溶胶生物分布特性及其主要影响因素,以期评估生物气溶胶的健康及环境效应,制定空气污染防治措施与预防疾病流行提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 采样地点与时间

采样点位于西安市长安大学雁塔校区环工学院

楼顶(34.23°N , 108.96°E , 海拔高度 424 m), 距离地面 27 m, 采样高度为楼顶上 1.5 m 处, 受人为因素影响较少。该采样点位于西安市南二环与三环之间, 周围主要是住宅区和教学区, 无工业污染排放源, 采样点周围 50 m 范围内也没有树木与绿地。采样时间为 2014 年 9 月 ~ 2015 年 1 月, 在每月的上中旬进行采样, 在每天的 07:30 ~ 08:30 和 11:00 ~ 12:00 两个时段分别进行重复两次的采样, 每次采样时间为 10 min, 共计采样天数为 29 d, 具体采样信息如表 1 所示。

表 1 西安市不同程度霾对应采样信息¹⁾

污染程度	AQI($\text{PM}_{2.5}$) 范围	采样天数/d
优	0 ~ 50	3
良	51 ~ 100	4
轻度	101 ~ 150	11
中度	151 ~ 200	6
重度	201 ~ 300	5

1) 共计采样 29 d, 每天早上和中午各一次, 每次设置 2 个平行样, 使用 1 392 个平皿(细菌气溶胶和真菌气溶胶各 696 个)

1.2 采样、培养与计数方法

使用安德森六级撞击式空气采样器(Westech, UK)对空气中可培养生物气溶胶进行采集, 根据粒径大小将其分为六级: I 级($>7.0 \mu\text{m}$); II 级($4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$); III 级($3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$); IV 级($2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$); V 级($1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$); VI 级($0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$)。采样的气体流量为 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间大约为每次 10 min, 并设置平行样。

采用 9 cm 平皿培养, 采样前将平皿进行灭菌处理(121°C , 30 min), 然后加入 30 mL 培养基, 待采样完成后, 迅速取出培养皿、并加盖倒置于培养箱内。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基, 在 37°C 恒温培养箱内培养 48 h; 真菌使用沙氏培养基, 在 28°C 恒温培养箱内培养 72 h。

上述培养完成后进行菌落形态观察并计数[11,14]。计数采用 Positive-hole 法对菌落数进行校正处理。然后根据采样时间和气体流量, 利用公式 (1) 和 (2) 计算生物气溶胶的浓度:

$$c_k = \frac{N_k \times 1\,000}{t \times Q} \quad (1)$$

$$c = \sum_{k=1}^6 c_k \quad (2)$$

式中, c_k 和 c 分别表示 k 级及总生物气溶胶浓度, 以菌落形成单位表示($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$); N_k 表示 k 级菌落数, CFU; t 为采样时间, min; Q 为采样器空气流量,

$L \cdot \text{min}^{-1[13]}$.

1.3 空气质量和气象参数

实时浓度 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 来自西安市环境监测站小寨监测点 (<http://www.xianemc.gov.cn>). 温度、相对湿度数据来自于(<https://www.wunderground.com>). AQI 是定量描述空气质量的无量纲常数,参与空气质量评价的主要污染物有 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 . 在本文中,AQI($\text{PM}_{2.5}$)是由 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值计算得出,与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关,目前被广泛用于表示空气污染程度. 当 AQI($\text{PM}_{2.5}$)值高于 100(空气质量二级标准,中国)时,则认为空气发生灰霾污染^[15,16]. 将 AQI ($\text{PM}_{2.5}$)进行污染等级分类^[17],即优:0~50、良:51~100、轻度污染:101~150、中度污染:151~200、重度污染:201~300、严重污染:>300.

1.4 数据统计分析

使用 Spss 19.0 进行 t 检验、主成分分析、多元线性回归和 Spearman's 相关性分析. 当 P 值小于 0.05 时,表示在 95%的置信区间内具有统计学上的显著差异. 利用 Excel 2010 和 Origin 8.0 统计绘图.

2 结果与讨论

2.1 西安市秋冬季可培养微生物气溶胶浓度分布特征

表 2 是可培养细菌和真菌气溶胶在秋冬季的浓

度特征值. 秋冬季可培养细菌气溶胶浓度分别为 $(834.40 \pm 561.43) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(958.32 \pm 350.55) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$,可培养真菌气溶胶浓度分别为 $(539.62 \pm 514.78) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(357.46 \pm 323.05) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 秋冬两季可培养细菌气溶胶的浓度差异并不明显($P > 0.05$);而可培养真菌气溶胶在秋季明显高于冬季($P < 0.05$),Fang 等^[18]发现北京地区的可培养真菌气溶胶浓度在秋季高于冬季,这与本研究结果类似. 一方面是因为大多数真菌孢子来源于植物^[19,20],而冬季的气候条件使其来源被阻碍;另一方面是因为秋季的温湿度条件比冬季更适合真菌的生长繁殖.

表 2 采样期间可培养生物气溶胶的季节浓度/ $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 2 Seasonal concentration of culturable bioaerosols during the sampling period/ $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$

季节	类型	最大值	最小值	平均值	标准偏差
秋季	细菌	1 763.36	96.88	834.40	561.43
	真菌	1 736.53	137.02	539.62	514.78
冬季	细菌	1 400.88	238.91	958.32	350.55
	真菌	1 001.13	92.27	357.46	323.05

2.2 不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度分布

图 1 是不同空气质量下生物气溶胶浓度水平. 细菌气溶胶浓度均值在空气质量为优、良、轻度、中度、重度污染时的分别是 546、700、761、947、

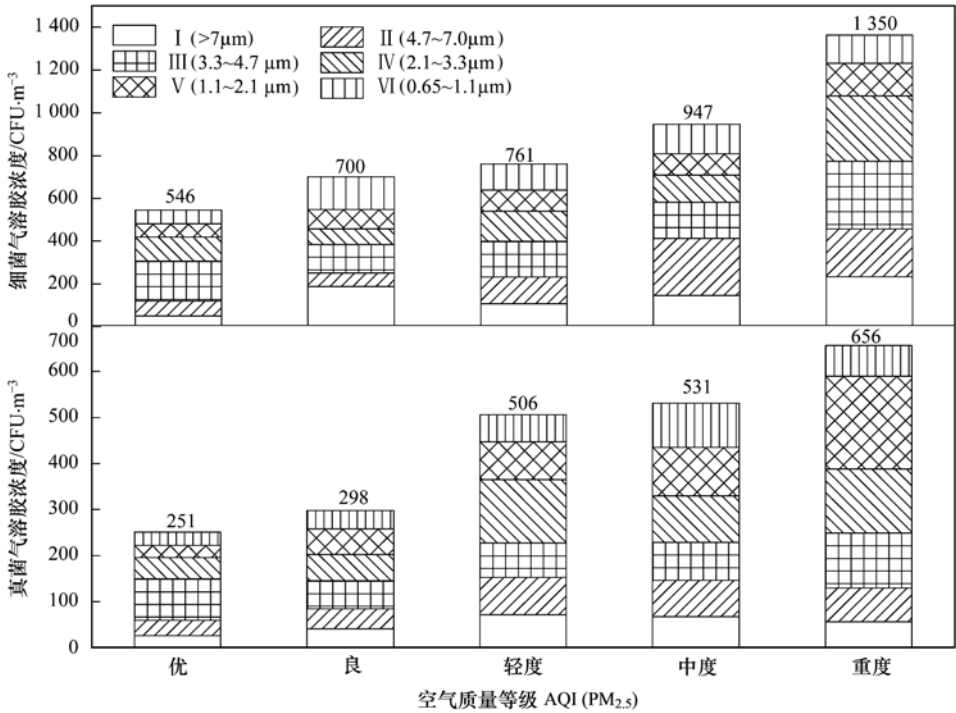


图 1 西安市不同空气质量下细菌和真菌气溶胶在不同粒径的浓度分布

Fig. 1 Concentration and size distribution of airborne bacteria and fungi at various air quality levels in Xi'an

1 350 CFU·m⁻³; 真菌气溶胶浓度均值分别为 251、298、506、531、656 CFU·m⁻³. 细菌气溶胶在优、轻度、中度及重度污染空气质量下存在显著性差异 ($P < 0.05$). 这表明空气中细菌气溶胶浓度随着空气质量指数的升高而明显增加. 对于真菌气溶胶, 虽然不同污染等级下的浓度差异并不明显 ($P > 0.05$), 但浓度也随着污染等级的升高而呈增加趋势. 综上所述, AQI(PM_{2.5}) 可以作为指示可培养生物气溶胶浓度高低的主要指标.

2.3 不同空气质量下可培养微生物气溶胶粒径分布

图 2 为不同空气质量下可培养微生物气溶胶的粒径分布. 从中可知, 在 5 种空气质量下, 可培养细菌气溶胶主要分布在粗粒径范围内 ($> 2.1 \mu\text{m}$), 优 77%、良 66%、轻度 71%、中度 74%、重度 79%. 污染程度较低时, 细菌气溶胶各粒径分布呈偏态分布, 较高粒径浓度百分比为 II 级 ($4.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$) 和 III 级 ($3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$), 较低粒径浓度百分比为 V 级 ($1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$) 和 VI 级 ($0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$); 污染程度较大时, 其粒径分布发生改变. 但总体上随着空气污染等级的增加, 细菌气溶胶粒径分布向粗颗粒迁移, 而细颗粒百分比逐渐减小. 青岛^[13]、北京^[21]等

地的研究也发现同样的粒径分布规律, 原因是细菌气溶胶通常黏附在颗粒物表面, 其浓度会随着颗粒物粒径的增加而增加, 进而呈现出上述趋势.

真菌气溶胶在优、良、轻度、中度和重度污染空气质量下, 其细颗粒粒径百分比分别是 22%、31%、28%、38%、41%. 当空气质量处于优、良和轻度污染时, 真菌生物气溶胶呈正态分布, 粒径峰值集中在 III 和 IV 级 ($2.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$). 但在中度和重度污染情况下, 粒径峰值向细颗粒偏移.

2.4 影响生物气溶胶分布特征的因素探究

为了探究各气象条件(温度、湿度)及环境因子(PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、O₃)对微生物气溶胶的影响. 首先通过主成分分析法, 将这 7 种因素归为 3 个主成分因子, 分别为 F₁ (PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂)、F₂ (温度、臭氧) 和 F₃ (湿度), 它们对原始变量的方差累积贡献率高达 88.83%. 其中, F₁ 受灰霾天影响较大, F₂ 和太阳辐射值有关. 对 3 个主成分与细菌(TB、B-粗、B-细)和真菌(TF、F-粗、F-细)气溶胶分别进行多元线性回归, 结果如表 3 所示. 为确定主成分中各因素对生物气溶胶浓度的影响程度, 使用 Spearman's 相关性分析得到表 4.

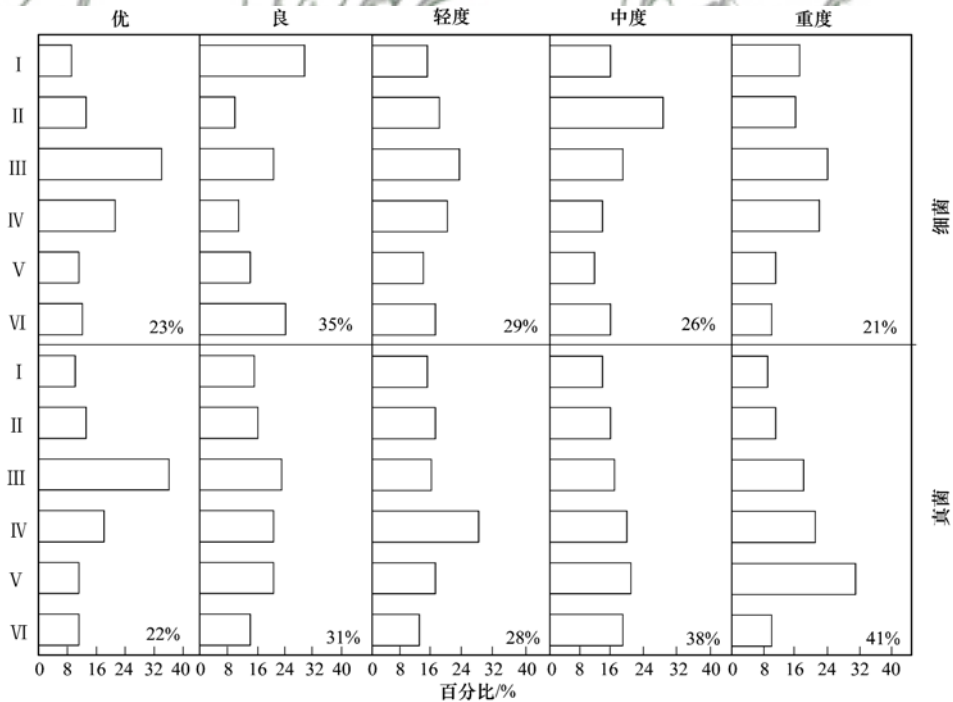


图 2 不同空气质量下生物气溶胶粒径分布及细颗粒百分比

Fig. 2 Size distribution of airborne bacteria and fungi and percentages of culturable bioaerosols at fine particle size distributions at various air quality levels

2.4.1 灰霾天(F₁)对生物气溶胶的影响

由表 3 的主成分回归结果可知, F₁ 与细菌的相关性显著 ($P < 0.05$), 与真菌气溶胶无显著相关, 这

与表 4 对 F₁ 中各因素与可培养生物气溶胶浓度的相关性检验结果基本一致.

在主成分 F₁ 中, 颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与 TB、B-

表 3 采样时段可培养生物气溶胶浓度与因子 F_1 、 F_2 、 F_3 的主成分回归¹⁾

Table 3 Principal components regression of culturable bioaerosol concentration with F_1 , F_2 , and F_3 during the sampling period

因变量	回归方程	Sig. F_1	Sig. F_2	Sig. F_3	R^2_{adj}	回归方程 P
TB	$225.154F_1 - 108.724F_2 + 106.591F_3 + 874.231$	0.015	0.217	0.225	0.207	<0.05
B-粗	$189.133F_1 - 40.145F_2 + 121.368F_3 + 645.298$	0.007	0.541	0.073	0.260	<0.05
B-细	$36.020F_1 - 68.579F_2 - 14.777F_3 + 228.932$	0.231	0.028	0.619	0.135	<0.10
TF	$95.150F_1 + 49.422F_2 + 153.606F_3 + 481.068$	0.283	0.574	0.089	0.059	>0.10
F-粗	$39.240F_1 + 18.700F_2 + 95.550F_3 + 319.984$	0.510	0.753	0.116	0.118	>0.10
F-细	$55.909F_1 + 30.722F_2 + 58.056F_3 + 161.084$	0.129	0.396	0.115	0.097	>0.10

1) $P < 0.05$ 时,相关性是显著的; $P > 0.05$ 时,相关性是不显著的, $n = 29$

表 4 可培养生物气溶胶浓度与气象参数、气体污染物、颗粒物的相关性分析¹⁾

Table 4 Spearman's correlation coefficients between culturable bioaerosols concentrations and meteorological parameters, air pollutants and particulate matter

项目	主成分 F_1				主成分 F_2		主成分 F_3
	$\rho(PM_{2.5})$	$\rho(PM_{10})$	$\rho(NO_2)$	$\rho(SO_2)$	温度	$\rho(O_3)$	相对湿度
TB	0.567**	0.588**	0.141	0.318	-0.209	-0.164	0.275
B-粗	0.610**	0.598**	0.261	0.329	-0.168	-0.121	0.348
B-细	0.377*	0.498**	-0.007	0.454*	-0.436*	-0.347	0.012
TF	0.107	0.042	0.051	-0.109	0.125	0.078	0.435*
F-粗	0.042	-0.014	0.018	-0.163	0.152	0.064	0.394*
F-细	0.253	0.209	0.067	-0.016	0.124	0.024	0.390*

1) ** 表示在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的, * 表示在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的, $n = 29$

粗、B-细均呈显著正相关(表 4),说明空气中的可培养细菌气溶胶浓度随着颗粒物浓度的增加而增加,Haas 等^[22]的研究也发现当灰霾天暴发时,空气中颗粒物浓度急剧上升,为细菌气溶胶的生长和繁殖提供了足够的载体.而颗粒物与真菌气溶胶浓度的相关性均不显著.

表 4 中, $\rho(NO_2)$ 与 TB、B-粗及真菌气溶胶浓度呈不显著正相关,并且真菌相关系数均在 0.07 以下.由此可见, $\rho(NO_2)$ 对真菌气溶胶的影响微乎其微,韩晨等^[13]在青岛市的气溶胶研究中也证实了这一点. $\rho(SO_2)$ 与各细菌气溶胶呈正相关,尤其对 B-细的影响更显著,说明 SO_2 在某种程度上对细颗粒细菌的生长具有促进作用,可能是因为 SO_2 在空气中发生某些化学反应形成细粒径硫酸气溶胶^[23]. $\rho(SO_2)$ 与各真菌气溶胶呈负相关,但相关性并不显著.由于气态污染物对生物气溶胶的生物活性影响极其复杂,其机制尚不明确,因此还需要进一步探讨.

2.4.2 温度和臭氧(F_2)对生物气溶胶的影响

由表 4 知,主成分 F_2 中温度和 O_3 与细菌气溶胶呈负相关,与真菌气溶胶呈正相关,这与表 3 回归方程 F_2 的系数检验结果一致.

环境温度与 TB 及 B-粗的相关性不显著,与 B-细呈显著负相关.高敏等^[16]的研究也发现了与本

文类似的结论.这可能是因为随着温度的升高,在细颗粒物中的细菌气溶胶比例减小.环境温度与真菌气溶胶浓度呈不显著正相关,这与其他研究结果相一致^[21].

由表 4 知, $\rho(O_3)$ 与各细菌气溶胶呈负相关,因为 O_3 本身的毒性会抑制室外空气细菌的生长^[24]. $\rho(O_3)$ 与各真菌气溶胶浓度呈不显著正相关,且相关系数较小,均在 0.08 以下,而 Alghamdi 等^[25]的研究结果与本文一致,原因可能是 O_3 在颗粒物上停留时间较短,或 O_3 与颗粒物上其他物质发生化学反应,减少了对真菌气溶胶的伤害.

2.4.3 湿度对生物气溶胶的影响

由表 4 知,相对湿度与细菌和真菌气溶胶均呈正相关,这与表 3 中主成分 F_3 的回归系数显著性结果一致. Wang 等^[26]也得到类似结论,这是因为相对湿度的增加有利于微生物的生长繁殖,而较低的相对湿度会抑制微生物的新陈代谢和生物活性^[27].对于 B-细,主成分回归和相关性分析的结果存在差异,但均无统计学上的显著意义.

3 结论

(1) 秋冬季可培养细菌气溶胶浓度分别为 (834.40 ± 561.43) CFU $\cdot m^{-3}$ 和 (958.32 ± 350.55) CFU $\cdot m^{-3}$,可培养真菌气溶胶浓度分别为 $(539.62$

± 514.78) $\text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 (357.46 ± 323.05) $\text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$. 秋冬季可培养细菌气溶胶的浓度差异并不明显($P>0.05$); 而可培养真菌气溶胶在秋季明显高于冬季($P<0.05$).

(2) 不同空气质量下, 可培养细菌气溶胶浓度随着空气质量指数的升高而明显增加. 可培养真菌气溶胶在不同污染等级下的浓度差异性并不明显($P>0.05$).

(3) 随着污染等级升高, 细菌粒径向粗颗粒迁移, 而真菌粒径峰值向细颗粒迁移.

(4) 主成分分析结果显示, 可培养微生物气溶胶主要与灰霾、太阳辐射和相对湿度有关. 多元线性回归结果表明, 细菌气溶胶与灰霾呈显著正相关($P<0.05$), 与太阳辐射呈不显著负相关, 与相对湿度呈不显著正相关; 真菌气溶胶与灰霾、太阳辐射和相对湿度均呈不显著正相关.

参考文献:

- [1] Cheng C L, Wang G H, Zhou B H, *et al.* Comparison of dicarboxylic acids and related compounds in aerosol samples collected in Xi'an, China during haze and clean periods [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 443-449.
- [2] Ariya P A, Amyot M. New directions: the role of bioaerosols in atmospheric chemistry and physics [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(8): 1231-1232.
- [3] Walser S M, Gerstner D G, Brenner B, *et al.* Evaluation of exposure-response relationships for health effects of microbial bioaerosols-a systematic review [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2015, **218**(7): 577-589.
- [4] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气微生物粒度分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 1-5.
Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(6): 1-5.
- [5] Shelton B G, Kirkland K H, Flanders W D, *et al.* Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(4): 1743-1753.
- [6] 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.
Zhang X H, Luo Y Q, Zhou Z M. Air micro-organisms and suspended particles pollution evaluation and correlation analysis on campus [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, **27**(4): 71-75.
- [7] 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 等. 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[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 801-809.
Qi J H, Wu L J, Gao D M, *et al.* Concentration and community diversity of microbes in bioaerosols in the Qingdao coastal region [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 801-809.
- [8] Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Culturable airborne fungi in outdoor environments in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **350**(1-3): 47-58.
- [9] 陈梅玲, 胡庆轩, 徐秀芝, 等. 南京市大气微生物污染情况调查[J]. *中国公共卫生*, 2000, **16**(6): 504-505.
Chen M L, Hu Q X, Xu X Z, *et al.* Investigation of atmospheric microbial contamination in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2000, **16**(6): 504-505.
- [10] Li Y P, Lu R, Li W X, *et al.* Concentrations and size distributions of viable bioaerosols under various weather conditions in a typical semi-arid city of Northwest China [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2017, **106**: 83-92.
- [11] 王伟, 付红蕾, 王廷路, 等. 西安市秋季灰霾天气微生物气溶胶的特性研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 279-288.
Wang W, Fu H L, Wang T L, *et al.* Characteristics of microbial aerosols on haze days in autumn in Xi'an, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 279-288.
- [12] Gao M, Jia R Z, Qiu T L, *et al.* Seasonal size distribution of airborne culturable bacteria and fungi and preliminary estimation of their deposition in human lungs during non-haze and haze days [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **118**: 203-210.
- [13] 韩晨, 谢绵测, 祁建华, 等. 青岛市不同空气质量下可培养生物气溶胶分布特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(9): 1264-1271.
Han C, Xie M C, Qi J H, *et al.* Size distribution characteristics of culturable bioaerosols in relation to air quality levels in Qingdao [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1264-1271.
- [14] 刘婷, 李露, 张家泉, 等. 梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1256-1263.
Liu T, Li L, Zhang J Q, *et al.* Concentration and size distribution of bioaerosols in indoor environment of university dormitory during the Plum rain period [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1256-1263.
- [15] Li Y P, Fu H L, Wang W, *et al.* Characteristics of bacterial and fungal aerosols during the autumn haze days in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 439-447.
- [16] 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.
Gao M, Qiu T L, Jia R Z, *et al.* Concentration and size distribution of bioaerosols at non-haze and haze days in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4415-4421.
- [17] 潘本锋, 宫正宇, 王帅, 等. 环境空气质量指数在应用中存在的问题及建议[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(1): 64-67.
Pan B F, Gong Z Y, Wang S, *et al.* Defects and revising suggestions of the application of ambient air quality index [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(1): 64-67.
- [18] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Concentration and size distribution of culturable airborne microorganisms in outdoor environments in Beijing, China [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, **42**(5): 325-334.
- [19] 方治国, 欧阳志云. 城市室内外空气真菌群落及影响因素研究进展[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(1): 386-393.
Fang Z G, Ouyang Z Y. Advance of airborne fungal community and the influencing factors in indoor and outdoor environments in urban ecosystem [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(1): 386-393.
- [20] Awad A H A. Vegetation: a source of air fungal bio-contaminant [J]. *Aerobiologia*, 2005, **21**(1): 53-61.

- [21] Xu Z Q, Yao M S. Monitoring of bioaerosol inhalation risks in different environments using a six-stage Andersen sampler and the PCR-DGGE method [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(5): 3993-4003.
- [22] 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.
- [23] 刘臻, 祁建华, 王琳, 等. 青岛大气气溶胶水溶性无机离子的粒径分布特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1422-1432.
- Liu Z, Qi J H, Wang L, *et al.* Particle size distribution of water-soluble inorganic ions of atmospheric aerosol in Qingdao [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(8): 1422-1432.
- [24] Tiedemann A V, Firsching K H. Interactive effects of elevated ozone and carbon dioxide on growth and yield of leaf rust-infected versus non-infected wheat[J]. Environmental Pollution, 2000, **108**(3): 357-363.
- [25] Alghamdi M A, Shamy M, Redal M A, *et al.* Microorganisms associated particulate matter: a preliminary study[J]. Science of the Total Environment, 2014, **479-480**: 109-116.
- [26] Wang Z, Reponen T, Grinshpun S A, *et al.* Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection[J]. Journal of Aerosol Science, 2001, **32**(5): 661-674.
- [27] Zhong X, Qi J H, Li H T, *et al.* Seasonal distribution of microbial activity in bioaerosols in the outdoor environment of the Qingdao coastal region [J]. Atmospheric Environment, 2016, **140**: 506-513.



CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)