

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究

龚婵娟¹, 许晶¹, 方治国^{1*}, 楼秀芹², 欧阳志云³

(1. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012; 2. 杭州市疾病预防控制中心微生物检验科, 杭州 310021; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 利用 Biolog 技术, 研究了杭州市 4 个样点, 即延安路商业街 (Yan'an Road Business Street, YRBS)、天目山路与教工路口 (Tianmushan Jiaogong Cross Road, TJCR)、浙江工商大学教工路校区 (Zhejiang Gongshang University Jiaogong Campus, ZJGSUJC)、西湖曲院风荷 (Breeze-ruffled Lotus at Qu Yuan Garden, BLQG) 空气微生物群落碳代谢特征。结果表明, 不同样点空气微生物样品平均颜色变化率 (Average Well Color Development, AWCD) 在培养 240 h 后达到稳定, 并且 4 个样点的 AWCD 值即对单一碳源的利用能力具有显著差异, $YRBS > TJCR \approx ZJGSUJC > BLQG$; YRBS、TJCR、ZJGSUJC 和 BLQG 空气中微生物物种的多样性和丰富度依次减少; 不同样点空气微生物对糖类和氨基酸类碳源利用程度较高, 对其它碳源利用程度较低, 且同一样点对不同单一碳源的利用程度也存在显著差异, YRBS 对糖类碳源的利用程度最高, 对聚合物类碳源利用程度最低, BLQG 对糖类碳源的利用程度最高, 对胺类碳源利用程度最低; 不同样点空气微生物群落碳代谢基质主成分 1 (PC_1) 贡献度为 43.8%, 主成分 2 (PC_2) 贡献度 23.4%, YRBS、BLQG 和 TJCR 的空气微生物群落差异较大, 碳代谢功能差异显著, 而 TJCR 与 ZJGSUJC 碳代谢功能无显著差异。

关键词: 空气微生物; 碳代谢特征; 单一碳源利用; 平均颜色变化率; 主成分分析

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0753-06

Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou

GONG Chan-juan¹, XU Jing¹, FANG Zhi-guo¹, LOU Xiu-qin², OUYANG Zhi-yun³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China; 2. Microbiology Laboratory, Hangzhou Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou 310021, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Carbon metabolic characteristics in four sampling sites including Yan'an Road Business Street (YRBS), Tianmushan Jiaogong Cross Road (TJCR), Zhejiang Gongshang University Jiaogong Campus (ZJGSUJC) and Breeze-ruffled Lotus at Qu Yuan Garden (BLQG) in Hangzhou were analyzed using Biolog technology in this study. Results showed that average well color development (AWCD) values were at stationary phase after 240 h cultivation in all four selected sampling sites. Significant differences in sole carbon utilization characterized as AWCD value were found among the four sampling sites, and the highest carbon utilization capacity was observed at YRBS, followed by TJCR and ZJGSUJC, and the lowest at BLQG. The species abundance and diversity of airborne microbes decreased in the order of YRBS, TJCR, ZJGSUJC, and BLQG. In addition, sugar and amino acid utilization capacity of airborne microbes was significantly higher than other carbon sources in all four sampling sites. Significant differences in different sole carbon utilization of airborne microbes in the same sampling site were found. The sugar utilization capacity was the highest, and polymer utilization capacity was the lowest at YRBS. At BLQG, highest sugar and lowest amine utilization capacity was detected. Principal component analysis showed that the contribution of PC_1 and PC_2 was 43.8% and 23.4%, respectively, in different sampling sites. Significant differences in carbon metabolic characteristics of microbial community in the air were found among YRBS, BLQG and TJCR, and no differences were observed between TJCR and ZJGSUJC.

Key words: airborne microbes; carbon metabolic characteristic; sole carbon utilization; average well color development; principal component analysis

微生物是空气生态系统中重要的生物组成部分, 微生物在空气中的存在与分布一般以人类活动为中心^[1], 没有固定的种类, 主要通过土壤尘埃、地面水、植物、动物和人类活动等方式被带入空气, 以液态和固态粒子的形式存在, 在适宜条件下可以直接在空气中繁殖或在沉降基质上繁殖^[2]。空气中广泛分布的细菌、真菌孢子、放线菌和病毒等生物粒子不仅与空气环境质量、空气污染和人体健康密

切相关, 还具有极其重要的生态系统功能^[3, 4]。空气微生物是生物圈重要的成员, 它与自然生态平衡及许多生命现象直接相关, 在播种、授粉和自然界

收稿日期: 2013-06-17; 修订日期: 2013-07-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41005085); 教育部留学回国人员科研启动基金项目; 浙江工商大学研究生科研创新项目

作者简介: 龚婵娟 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空气环境微生物污染, E-mail: raingcj5308778@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: zhgfang77@zjgsu.edu.cn

的物质循环以及食物链中起着重要的作用^[5]。由生物粒子组成的气溶胶,可间接作为云凝结核和冰核,导致云滴和冰晶的形成,在雨雪的形成过程中发挥着非常重要的功能,并且可通过直接散射或吸收太阳能辐射在全球气候变化中起着至关重要的作用^[6,7]。到目前为止,空气微生物学的主要研究内容包括微生物空气污染、空气中微生物群落结构及影响因子、空气微生物与人们健康之间的关系^[8~13],而城市空气微生物功能多样性及碳代谢特征等方面的研究报道很少^[14]。

Biolog 技术可以用于不同环境微生物功能多样性的研究,其主要是利用以群落水平(而不是单一物种)碳源利用类型为基础的 Biolog 氧化还原技术来表述环境样品微生物群落特征,运用主成分分析(principal component analysis, PCA)或相似类型的多变量统计分析方法展示不同微生物群落产生的不同代谢多样性类型^[15~17]。Biolog 技术用于土壤、水体及根际微生物功能多样性的研究工作较多^[18~21],而用于空气微生物碳代谢特征的研究工作非常少^[22]。杭州市是浙江省省会和经济、文化科教中心,长江三角洲中心城市之一,国家历史文化名城和

南方典型的风景旅游城市。作为全球闻名的旅游城市 and “生活品质之城”,有关杭州市空气微生物群落结构多样性和功能多样性的研究工作近为空白。本研究利用 Biolog 技术系统探讨了杭州市空气微生物碳代谢功能群落结构,针对 4 个典型样点进行了空气微生物功能多样性差异研究,分析了不同样点空气微生物的碳代谢特征,这对维持空气微生物在城市生态系统中的结构和功能具有重要的理论和实际意义。

1 材料与方法

1.1 研究样点概况

在杭州市 4 个功能区即商业区、交通干线、文教区、旅游风景区各选取 1 个观测点,分别选在延安路商业街(Yan'an Road Business Street, YRBS)、天目山路与教工路口(Tianmushan Jiaogong Cross Road, TJCR)、浙江工商大学教工路校区(Zhejiang Gongshang University Jiaogong Campus, ZJGSUJC)、西湖曲院风荷(Breeze-ruffled Lotus at Quyuan Garden, BLQG),于 2013 年 4 月进行空气微生物取样工作,4 个样点的基本情况如表 1 所示。

表 1 取样点基本概况

Table 1 Basic information of sampling sites

取样点	功能区类型	周边建筑	车辆及行人	绿化面积
延安路商业街	商业区	商贸城,店铺,中国工商银行等	人员流动非常多及车流量较多	基本无绿化
天目山路与教工路口	交通干线	写字楼,交通干道,居住楼	人员流动一般,车辆非常多	小于 5%
浙江工商大学教工路校区	文教区	办公楼,实验楼,寝室楼	上课时间学生流动一般,下课时间流动较多,车流量较少	约 50%
西湖曲院风荷	旅游风景区	周边无建筑	人员流动较少,无车辆通行	大于 95%

1.2 空气微生物取样器及取样方法

采用法国 Bertin * Coriolis μ 空气生物采样器进行取样,Coriolis μ 采用全新的气旋式采样技术,空气流速最高可达 $300 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Coriolis μ 能够高效收集空气中的生物样品,样品的采集形式为液体样品,样品后续处理高度灵活,样品可进行稀释和浓缩,以获得更大范围更精确的生物样品信息,用于包括琼脂平板培养在内的多种检测技术。该取样技术与传统的 Andersen 法(用琼脂平板收集样品的撞击式空气采样技术)完全不同,样品的收集效果远远优于 Andersen 法。

空气微生物取样在 4 个观测点同时进行,每个样点连续取样 3 d,每天分别在 09:00、13:00 和 17:00 取样 3 次,每次取样持续时间为 1.5 h,采样高度为人呼吸带,距离地面约 1.5 m 处,取样流量设置

为 $250 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。空气取样时间每次设定为 10 min,取样液为 0.9% 已灭菌的生理盐水,每次 15 mL,10 min 一次采样结束后将取样液补充至 15 mL 进行下一次采样,直至 1 次取样结束。采集的样品迅速带回实验室,放入 4°C 冰箱内保存并尽快开展实验研究。

1.3 基于 Biolog GN₂ 的微平板操作

选用 Biolog GN₂ 进行杭州市不同功能区空气微生物碳代谢特征的研究。将每个样点每天取样的样品充分混合后接种至 Biolog GN₂ 微平板中,每孔接种量为 150 μL 样品,放入 30°C 培养箱培养,每隔 24 h 用 Biolog 读数器于波长为 590 nm 处测定光吸收值,直至光密度值稳定为止,总共培养时间为 336 h,选取 240 h 的 Biolog 平均光密度吸收值进行后续数据的处理。

1.4 计算方法

1.4.1 AWCD 值计算

对 Biolog 所测的吸光度数据进行平均颜色变化率(average well color development,AWCD)计算,即:
 $AWCD = \sum (C - R)/n$, 式中, C 是每个孔(光密度测量)的光密度值, R 是对照孔的光密度值, n 是底

物数量, GN_2 板中 n 值为 95,然后绘制 AWCD 随时间变化的曲线.

1.4.2 空气微生物多样性指数计算

空气微生物多样性指数是从不同方面表现空气微生物群落代谢功能的多样性,Biolog 研究中常见的多样性指数如表 2.

表 2 Biolog 分析中的多样性指数¹⁾
Table 2 Biodiversity index in biolog analysis

多样性指数	用途	公式
Shannon 指数	评估丰富度和均匀度	$H' = - \sum p_i \ln p_i$
Shannon 均匀度	通过 Shannon 指数计算出的精度	$E = H'/\ln S$
Simpson 指数	评估某些最常见种的优势度指数	$D = \sum \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$
McIntosh 指数	基于群落物种多维空间上的 Euclidian 距离多样性指数	$D = \sqrt{\sum n_i^2}$
McIntosh 均匀度	由 McIntosh 指数计算得出的均匀度	$E = \frac{N - U}{N - N\sqrt{S}}$

1) p_i 为第 i 孔相对吸光度值($C - R$)与整个平板相对吸光度值总和的比率, S 为颜色变化的孔的数目, n_i 是第 i 孔的相对吸光值($C - R$), N 是相对吸光度值的总和,Simpson 指数用 $1/D$ 值表示;采用培养 240 h 后的 Biolog GN_2 板吸光度数据计算,其中在计算 Simpson 指数过程中,数据扩大了1 000倍以防止出现负数^[23]

1.4.3 空气微生物碳源利用率计算

研究空气微生物对碳源利用能力的差异能够了解微生物群落的结构组成.对照 Biolog GN_2 板碳源类型分布表,确定板中每个孔的碳源类型,其可分为 6 大类,即糖类(30 种)、氨基酸类(20 种)、羧酸类(24 种)、聚合物类(5 种)、胺类(6 种)、其它类(10 种).根据孔变色情况,确定空气微生物是否对碳源加以利用,每类碳源的利用数目的总和与此类碳源总数的比率即空气微生物碳源利用率.

1.5 统计方法

数据统计和绘图采用 Microsoft Excel 2010 进行,主成分分析采用 SPSS 19.0 进行.

2 结果与分析

2.1 碳源平均颜色变化率(AWCD)

AWCD 值是从功能代谢水平反映空气微生物群落结构多样性的,是用来衡量空气微生物对单一碳源的利用能力,表现微生物活性的重要指标.由图 1 可知,空气微生物活性随培养时间的延长而有所升高,不同样点 AWCD 值在 24 h 以内差异很小,48 h 后 AWCD 值开始升高,72 h 后进入指数期,240 h 后进入稳定期.对比不同取样点空气微生物 AWCD 值发现,不同样点空气中微生物对碳源的利用存在较大差异,其对单一碳源的利用能力大小顺序为:YRBS > TJCR ≈ ZJGSUJC > BLQG ($P < 0.01$).

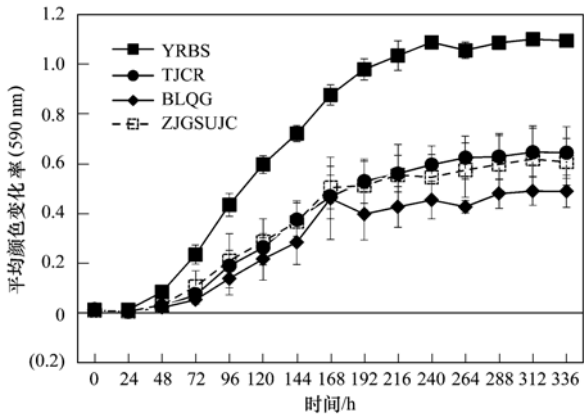


图 1 不同样点空气微生物 AWCD 值变化
Fig. 1 AWCD variation of airborne microbe in different sampling sites

2.2 空气微生物群落功能多样性分析

空气微生物群落功能多样性分析包括 Shannon 指数、Shannon 均匀度、Simpson 指数、McIntosh 指数、McIntosh 均匀度. Shannon 指数是用来估算群落多样性高低的一个指标,它可以评估群落中物种的丰富度; Shannon 均匀度是通过 Shannon 指数计算出的均度,它可以评估物种中个体的相对丰富度,它可以评估物种中个体的相对丰富度; Simpson 指数是评估某些最常见种的优势度指数,值越大,表示优势度物种越小,亦表示奇异度越高; McIntosh 指数是评价物种多样性的指标之一,与物种丰富度有关; McIntosh 均匀度是通

过 McIntosh 指数计算出的均度. 它受物种丰富度的影响较大,也是可以评价物种多样性的指标之一. 由表 2 可知,杭州市 4 个样点 Shannon 指数、Shannon 均匀度、Simpson 指数、McIntosh 指数、

McIntosh 均匀度的大小顺序均为 YRBS > TJCR > ZJGSUJC > BLQG. 由此可知, YRBS、TJCR、ZJGSUJC、BLQG 空气中微生物物种的多样性和丰富度依次减少.

表 3 不同样点空气微生物群落功能多样性

Table 3 Diversity and evenness indices for airborne microbial community in different sampling sites

功能区	Shannon 指数	Shannon 均度	Simpson 指数	McIntosh 指数	McIntosh 均度
YRBS	4.257 ± 0.002	0.957 ± 0.001	62.598 ± 0.767	13.064 ± 0.239	0.979 ± 0.000
TJCR	4.122 ± 0.006	0.953 ± 0.008	51.094 ± 1.887	8.080 ± 1.116	0.972 ± 0.003
ZJGSUJC	4.103 ± 0.070	0.937 ± 0.023	49.417 ± 3.777	8.033 ± 2.284	0.966 ± 0.007
BLQG	3.958 ± 0.029	0.922 ± 0.068	43.420 ± 1.340	6.057 ± 1.114	0.959 ± 0.021

2.3 空气微生物对不同种类碳源利用分析

Biolog GN₂ 微平板含有 95 种碳源,根据官能团不同可将碳源分为 6 大类:糖类 30 种,羧酸类 24 种,聚合物类 5 种,氨基酸类 20 种,胺类 6 种,其它类 10 种. 由图 2 可知,空气中微生物对糖类和氨基酸类代谢具有优势,杭州市 4 个取样点对糖类和氨基酸类碳源利用程度较高,对其它类碳源利用程度较低. 不同样点空气微生物对糖类碳源的利用程度没有显著差异,YRBS、TJCR、ZJGSUJC 和 BLQG 的糖类利用率分别为 94.5%、95.5%、94.4% 和 90.0%,对胺类碳源的利用程度有显著差异,YRBS、TJCR、ZJGSUJC 和 BLQG 的胺类利用率分别为 94.4%、83.3%、72.2% 和 55.6%. 同一样点对不同单一碳源的利用程度也存在显著差异. YRBS 对糖类碳源的利用程度最高,相对利用率为 94.5%,对对聚合物类碳源利用程度最低,相对利用率为 80.0%; BLQG 对糖类碳源的利用程度最高,相对利用率为 90.0%,对胺类碳源利用程度最低,相对利用率为 55.6%.

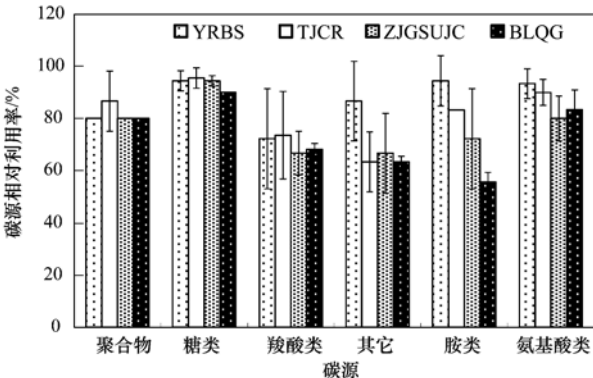


图 2 不同样点空气微生物对 6 类碳源的相对利用率

Fig. 2 Relative utilization ratio of six groups of carbon sources by airborne microbe

2.4 空气微生物群落代谢功能主成分分析(PCA)
不同样点空气微生物群落碳代谢基质主成分

1(PC₁) 贡献度为 43.8%,主成分 2(PC₂) 贡献度 23.4%(图 3). 主成分 1 荷载大于 0.55 的基质有 51 种,荷载大于 0.85 的基质有 17 种(糖类 4 种,羧酸类 5 种,氨基酸类 8 种);主成分 2 荷载大于 0.55 的基质只有 11 种. 因此,不同样点空气微生物碳代谢功能群落结构的差异性主要取决于主成分 1 中荷载值较高的基质. 由图 3 可知,TJCR 与 ZJGSUJC 的类群散点接近,说明两个样点空气微生物群落相近,碳代谢功能无显著差异,而 YRBS、BLQG 和 TJCR 的类群散点距离较大,说明三者的空气微生物群落差异性较大,碳代谢功能差异显著.

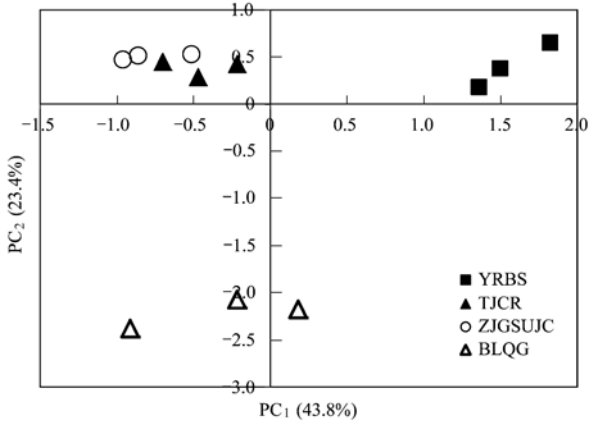


图 3 不同样点空气微生物对 Biolog 板中底物
碳源代谢主成分分析

Fig. 3 Patterns of microbial communities in different sampling sites as revealed by Principal component analysis (PCA) of Biolog plate data profiles

3 讨论

空气环境中营养条件贫瘠,严重缺乏微生物生存的基质和营养. 与土壤、根际和水体微生物相比,空气中微生物的种类、数量和浓度低很多. 因此,需要利用先进的空气生物粒子取样器来提升单位时间的取样流量,且增加取样时间,这样更能有效

的测定空气中微生物的生理活性及碳代谢特征. 本研究利用法国的 Bertin* Coriolis μ 空气生物采样器, 取样流量最高可达 $300 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 能够较好满足空气中微生物生理活性的测定要求. 试验设置取样流量为 $250 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 每次总取样时间为 1.5 h , 每次取样空气总量为 22.5 m^3 , 4 个样点 AWCD 值在 72 h 后进入指数期, 且有明显的指数期特征, 240 h 后进入稳定期, 进入稳定期后 YRBS、TJCR、ZJGSUJC 和 BLQG 的 AWCD 值分别约为 1.1 、 0.6 、 0.6 和 0.4 . 段魏魏等^[22]利用液体撞击式取样器(取样时间 15 min , 流量 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 空气总流量 0.15 m^3)研究塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落代谢特征时发现, 5 个样点 AWCD 值 120 h 后进入指数期, 且没有明显的指数期特征, 240 h 还未达到稳定期, 进入稳定期后 AWCD 值在 $0.1 \sim 0.24$ 值. 此研究中用于表征空气中微生物群落碳代谢能力和生理活性的 AWCD 值进入指数期和稳定期所需的培养时间比本研究多, 且最终的 AWCD 值明显低于本研究, 这与取样的空气总流量及样品的微生物数量密切相关. 然而, 土壤样品的 AWCD 值在 $24 \sim 72 \text{ h}$ 呈现明显的指数期, 192 h 样品的 AWCD 值基本接近饱和 ($\text{AWCD} \geq 1$), 其 AWCD 值进入指数期和稳定期所需的时间比本研究少, 且最终的 AWCD 值明显高于本研究^[22, 24, 25]. 这主要是由于空气中微生物的种类、数量和浓度明显低于土壤环境, 从而导致空气微生物样品的碳源利用能力低下.

不同样点空气微生物的 AWCD 值大小顺序为 $\text{YRBS} > \text{TJCR} \approx \text{ZJGSUJC} > \text{BLQG}$, 空气微生物群落功能多样性指数的大小顺序为 $\text{YRBS} > \text{TJCR} > \text{ZJGSUJC} > \text{BLQG}$. 室外空气中微生物的浓度、生理活性及碳源利用能力与车流量、人员流动及植被覆盖密切相关, 车流量和人员流动较多的环境微生物浓度和活性较高, 而植物挥发性分泌物对空气中的细菌具有灭杀作用^[11, 26, 27]. YRBS 人员流动非常多, 车流量较多, 而基本没有植被覆盖, 这些环境条件使得 YRBS 空气细菌浓度及活性最高; TJCR 车流量非常多, 人员流动一般, 有极少量植被覆盖, ZJGSUJC 学生流动较多, 车流量较小, 有约 50% 的植被覆盖率, 因此, TJCR 和 ZJGSUJC 空气细菌浓度和活性较高; 而 BLQG 人员流动较少, 没有车流量, 并且植被覆盖率达到 95% 及以上, 是个相对洁净的环境, 缺少细菌气溶胶粘附的载体, 不利于空气细菌的繁殖和生长, 同时, 大面积的绿地和不同种类的植物对空气细菌也有滤除作用, 这些环境条件使得

BLQG 空气细菌的浓度和活性在 4 个样点中最低.

TJCR 与 ZJGSUJC 两个样点空气微生物群落相近, 碳代谢功能无显著差异, 而 YRBS、BLQG 和 TJCR 空气微生物群落差异较大, 碳代谢功能差异显著. TJCR 是交通干线, ZJGSUJC 是文教区, 空气中微生物浓度增加的主要原因均是由于人类活动引起的地面扰动, 使得近地面的灰尘粒子浓度增加, 从而导致空气中微生物数量增加, 两者空气微生物的来源基本相同, 因此空气微生物的群落结构, 对碳源的利用特征基本相似; YRBS 是商业区, 空气微生物浓度增加的主要原因一方面是人类活动引起的近地面灰尘粒子浓度增加, 另一方面是由于人员流量非常大, 人们在喷嚏、咳嗽、说话时有口、鼻喷出的飞沫, 附于飞沫中的细菌及人们皮肤和头发表面微生物的释放也是其空气微生物的来源, 因此 YRBS 与 TJCR、ZJGSUJC 空气中微生物的群落结构不相同; BLQG 是旅游风景区, 平时人员流量较小, 其空气微生物浓度较低的主要原因是较高的植被覆盖率使得空气中的充满着植物挥发性分泌物, 而植物挥发性分泌物具有灭杀细菌的作用, 因此部分细菌被灭杀而导致空气中微生物群落结构与 YRBS、TJCR 不相同^[27].

4 结论

(1) YRBS 空气中微生物群落的碳代谢能力最强, 主要表现为具有较高的 AWCD 值和功能多样性指数, 其次为 TJCR 和 ZJGSUJC, 空气中微生物碳代谢能力最弱是 BLQG.

(2) 不同样点空气中微生物群落对糖类和氨基酸类碳源的利用率明显高于羧酸类、聚合物类、胺类以及其它类型的碳源.

(3) 空气中微生物代谢基质主成分 1 贡献度为 43.8% , 主成分 2 为 23.4% , 主成分 1 荷载 0.55 以上基质有 51 种, 主成分 2 只有 11 种, 从碳代谢特征来看, TJCR 与 ZJGSUJC 空气微生物群落结构基本相似, 而 YRBS、BLQG、TJCR 空气微生物群落特征完全不同.

参考文献:

- [1] Lighthart B, Shaffer B T, Frisch A S, *et al.* Atmospheric culturable associated with meteorological conditions at a summer-time site in the mid-Willamette Valley, Oregon [J]. *Aerobiologia*, 2009, **25**(4): 285-295.
- [2] Mancinelli R, Shulls W. Airborne bacteria in an urban environment [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **35**(6): 1095-1101.

- [3] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 城市生态系统空气微生物群落研究进展[J]. 生态学报, 2004, **24**(2): 315-322.
- [4] Lee J H, Jo W K. Exposure to airborne fungi and bacteria while commuting in passenger cars and public buses [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(38): 7342-7350.
- [5] 车凤翔. 空气生物学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1-41.
- [6] Christner B C, Morris C E, Foreman C M, *et al.* Ubiquity of biological ice nucleators in snowfall [J]. Science, 2008, **319**(5867): 1214.
- [7] Christner B C, Cai R, Morris C E, *et al.* Geographic, Seasonal, and precipitation chemistry influence on the abundance and activity of biological ice nucleators in rain and snow [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(48): 18854-18859.
- [8] Shelton B G, Kirkland K H, Flander W, *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.
- [9] Douwes J, Thorne P, Pearce N, *et al.* Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects [J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2003, **47**(3): 187-200.
- [10] 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.
- [11] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China [J]. Microbial Ecology, 2007, **54**(3): 487-496.
- [12] Brodie E L, DeSantis T Z, Moberg Parker J P, *et al.* Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, **104**(1): 299-304.
- [13] 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.
- [14] 凌琪, 包金梅, 李瑞, 等. Biolog-Eco 解析黄山风景区空气微生物碳代谢多样性特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, **20**(1): 56-63.
- [15] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community level sole carbon source utilization [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, **57**(8): 2351-2359.
- [16] Haack S K, Garchow H, Klug M J, *et al.* Analysis of factors affecting the accuracy, reproducibility and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, **61**(4): 1458-1468.
- [17] 郑华, 欧阳志云, 方治国, 等. BIOLOG 在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2004, **41**(3): 457-461.
- [18] Xue D, Yao H Y, Ge D Y, *et al.* Soil microbial community structure in diverse land use systems; a comparative study using Biolog, DGGE, and PLFA Analyses [J]. Pedosphere, 2008, **18**(5): 653-663.
- [19] Choi K H, Dobbs F C. Comparison of two kinds of Biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities [J]. Journal of Microbiology Methods, 1999, **36**(3): 203-213.
- [20] Schutter M, Dick R. Shift in substrate utilization potential and structure of soil microbial communities in response to carbon substrates [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(11): 1481-1491.
- [21] Guckert J B, Carr G J, Johnson T D, *et al.* Community analysis by Biolog: curve integration for statistical analysis of activated sludge microbial habitats [J]. Journal of Microbiological Methods, 1996, **27**(2-3): 183-197.
- [22] 段魏魏, 娄恺, 曾军, 等. 塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 26-31.
- [23] 杨永华, 姚健, 华晓梅. 农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 微生物学杂志, 2000, **20**(2): 23-25, 47.
- [24] Deng H H, Ge L Y, Xu T, *et al.* Analysis of the metabolic utilization of carbon sources and potential functional diversity of the bacterial community in lab-scale horizontal subsurface-flow constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Quality, 2011, **40**(6): 1730-1736.
- [25] Bossio D A, Girvan M S, Verchot L, *et al.* Soil microbial community response to land use change in an agricultural landscape of Western Kenya [J]. Microbial Ecology, 2005, **49**(1): 50-62.
- [26] 巨天珍, 索安宁, 田玉军, 等. 兰州市空气微生物分析[J]. 工业安全与环保, 2003, **29**(3): 17-19.
- [27] 谢慧玲, 李树人, 袁秀云, 等. 植物挥发性分泌物对空气微生物杀灭作用的研究[J]. 河南农业大学学报, 1999, **33**(2): 127-133.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行