

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁英的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析

葛峰^{1,2}, 郭坤¹, 周广灿¹, 张会娟¹, 刘济宁², 戴亦军*

(1. 江苏省微生物与功能基因组学实验室, 江苏省微生物资源产业化工程技术研究中心, 南京师范大学生命科学学院, 南京 210046; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 通过 16S rDNA 序列分析对南京 CN、CE、JN 和 JM 这 4 个污水处理厂的活性污泥中分离的细菌进行鉴定, 采用 Kirby-Bauer 纸片琼脂扩散法分析细菌的抗生素耐药性, 目的是阐明该地区污水处理厂活性污泥中细菌抗生素耐药性现状, 探索污水及污泥的潜在环境风险。4 个污水处理厂分别分离到 7、9、8 和 11 株菌落形态不同的细菌, 上述 35 株细菌分属 25 个种, 17 个属。抗生素耐药性分析显示, 97.1% 的菌株具有抗生素耐药性, 80% 菌株具有多重耐药性。分离菌株对氨苄西林、卡那霉素、氯霉素、链霉素、庆大霉素、四环素、红霉素和大观霉素的耐药率分别为 71.4%、37.1%、37.1%、57.1%、34.3%、68.6%、94.3% 和 65.7%。结果表明活性污泥中细菌耐药性严重; 不同菌株间的耐药性分析显示, 危害水产养殖业的病原菌气单胞菌具有严重的多重耐药性, 所有芽孢杆菌对氯霉素、链霉素和庆大霉素敏感; 污水处理厂应加强出水的消杀工作, 避免二次污染。

关键词: 活性污泥; 菌种鉴定; 抗生素耐药性; 气单胞菌; 芽孢杆菌

中图分类号: X172; X501 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1646-06

Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis

GE Feng^{1,2}, GUO Kun¹, ZHOU Guang-can¹, ZHANG Hui-juan¹, LIU Ji-ning², DAI Yi-jun¹

(1. Jiangsu Key Laboratory for Microbes and Functional Genomics, Jiangsu Engineering and Technology Research Center for Industrialization of Microbial Resources, College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China)

Abstract: Bacteria were isolated from the activated sludge of CN, CE, JN and JM Sewage Treatment Plants (STPs) in Nanjing city and identified by 16S rDNA sequence analysis. The antibiotic resistance analysis of the isolated bacteria was conducted by Kirby-Bauer Disc Agar Diffusion Method. The objective of this study is to clarify the current state of bacteria antibiotic resistance from the four STPs and analyze the potential environmental risk of the produced waste water and the sludge. The 7, 9, 8 and 11 bacterial strains with different morphology were respectively isolated from the above four sample sites, which belonged to 25 species and 17 genera. Antibiotic resistance analysis indicated that 97.1% of isolates had antibiotic resistance and 80% of isolates had multi-antibiotic resistance. The drug resistance rates were 71.4%, 37.1%, 37.1%, 57.1%, 34.3%, 68.6%, 94.3% and 65.7% of ampicillin (AM), kanamycin (KAN), chloramphenicol (CHL), streptomycin (STR), gentamicin (GEN), tetracycline (TET), erythromycin (EM) and spectinomycin (SPE), respectively. It indicated that the activated sludge from the four STPs had high antibiotic resistance. The drug resistance analysis between different bacteria indicated that the genus *Aeromonas*, an aquacultural pathogen, had multi-antibiotic resistance, while all of *Bacillus* were sensitive to CHL, STR and GEN. The STPs should enhance the sterilization of effluent water to avoid the second pollutions.

Key words: activated sludge; bacterial identification; antibiotic resistance; *Aeromonas*; *Bacillus*

医疗、畜牧和水产养殖行业中大量使用抗生素后, 未被完全代谢的抗生素通过医院污水、城市生活污水、畜禽粪便等多种途径进入水环境造成污染, 导致水环境中的微生物群落产生抗生素耐药性。目前国外一些研究表明, 污水处理厂的进水、出水及活性污泥中均含有抗生素耐药菌株^[1]。由于畜牧水产养殖业和医药卫生行业滥用抗生素, 我国已成为抗生素耐药性发展最快的国家之一。虽然我国对水环境中的抗生素耐药性和耐药菌株研究较少, 但现有的报道显示水环境中抗生素耐药情况非常严重。有研

究表明从重庆市医院污水污染的地表水和农业流域地表水中分离的耐热大肠菌群中 98.1% 菌株具多重耐药性^[2,3]。张新英等^[4]的调查显示南宁市生活污水中大肠菌群对青霉素、红霉素和氨苄西林具有不同程度的耐药性。

活性污泥法是处理生活污水和工业废水最常用

收稿日期: 2011-07-05; 修订日期: 2011-08-10

基金项目: 环境保护部环保公益性行业科研专项(200809092)

作者简介: 葛峰(1981~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为环境生物, E-mail: gefeng@nies.org

* 通讯联系人, E-mail: daiyijun@njnu.edu.cn

方法之一,污泥中的细菌是主要生物类群^[5].含抗生素的污水很容易造成持续的抗生素选择性压力并导致活性污泥中的细菌产生耐药性,同时污水进水中的耐药菌株的耐药基因传递给活性污泥中的细菌,因而可能导致活性污泥变成一个巨大的耐药菌株和耐药基因储存库^[1,6,7].随着我国城市化的快速发展和污水处理厂的增加,污水处理后的剩余污泥量有较大幅度的增长,剩余污泥处置压力也随之增大,如南京市污水处理厂每天需要处置的总污泥量达到了893 t^[8].污泥处置方式主要是混合填埋、焚烧和资源化再利用^[9].因节能减排和发展循环经济,我国污泥资源化再利用受到了高度关注^[10].由于活性污泥可能是一个巨大的耐药菌株和耐药基因储存库,因此在污泥回用于土壤过程中,不仅要求重金属和病原菌不得超标,还需要对活性污泥中的微生物及其耐药性状况进行分析,研究污泥中耐药菌和耐药基因是否会造成土壤环境的二次传播和污染.

近年来,对各类水体中微生物对抗生素的耐药性开展了部分研究工作,然而有关污水处理厂活性污泥中的微生物的耐药性鲜见报道.本研究开展了南京市CN、CE、JN和JM这4个污水处理厂的活性污泥中的细菌检测及8种抗生素的抗药性分析和比较分析,了解活性污泥中细菌及其耐药情况的严重程度,以期对活性污泥的综合处理、污泥资源化再利用的风险评估及控制技术提供参考.

1 材料与方法

1.1 材料

活性污泥样品分别采集于南京市的CN、CE、JN和JM这4个污水处理厂,采样时间为2010年11月.4个污水处理厂的污水处理量和处理工艺见表1^[9].

表1 南京市4个污水处理厂的基本情况

污水处理厂	污水处理量 /万 m ³ ·d ⁻¹	处理工艺 ¹⁾
CN	12	Unitanks
CE	10	A ² /O
JN	8	三沟式氧化沟
JM	64	A/O(一期)、A ² /O(二期)

1) Unitanks: 交替式生物处理池工艺; A²/O: Anaerobic-Anoxic-Oxic, 生物脱氮除磷; A/O: Anoxic/Oxic, 厌氧好氧

抗生素氨苄西林(Ampicillin, AMP),卡那霉素(Kanamycin, KAN),氯霉素(Chloromycetin, CHL),

链霉素(Streptomycin, STR),庆大霉素(Gentamicin, GEN),四环素(Tetracycline, TET),红霉素(Erythromycin, EM),大观霉素(Spectinomycin, SPE)购于上海生工生物工程公司.

抗生素敏感性测定用Mueller Hinton(M-H)培养基(g·L⁻¹):酸水解酪蛋白17.5,可溶性淀粉1.5,牛肉膏20.0,琼脂17.0,pH 7.4.

细菌培养用Luria-Bertani(LB)培养基(g·L⁻¹):酵母粉5.0,蛋白胨10.0,NaCl 10.0,琼脂20.0,pH 7.2.

1.2 菌落总数测定

活性污泥中的菌落总数的测定按照GB/T 4789.2-2010《中华人民共和国国家标准 食品卫生微生物学检验 菌落总数测定》和SN 0168-92《中华人民共和国进出口商品检验行业标准 出口食品菌落计数》的标准进行.菌落计数以菌落形成单位(colony-forming units, CFU)计数.

1.3 活性污泥中可培养细菌鉴定

从上述细菌生长的LB平板上挑取菌落形态和颜色等有明显差异的菌株,重新划线纯化后,采用16S rDNA序列分析进行菌种鉴定.从平板上挑取单菌落,加入20.0 μL无菌水,100℃加热10 min.轻微离心后,取5.0 μL作为菌落PCR扩增的模板.对菌落PCR未扩增出条带的细菌样品提取基因组作为扩增模板.基因组DNA的提取和16S rDNA片段的扩增按照文献[11]的方法进行,采用的一对通用引物K1(5'-AACTGAAGAGTTTGATCCTGGCTC-3')和K2(5'-TACGGTTACCTTGTTACGACTT-3'),分别对应于大肠杆菌16S rDNA的2~25 nt和1479~1500 nt^[9].PCR扩增体系为:10×Taq聚合酶反应缓冲液5.0 μL, MgCl₂(25.0 mmol·L⁻¹)5.0 μL, dNTP(2.5 mmol·L⁻¹)5.0 μL,引物K1(20.0 μmol·L⁻¹)1.0 μL,引物K2(20.0 μmol·L⁻¹)1.0 μL,模板5.0 μL, Taq DNA聚合酶(5.0 U·μL⁻¹)0.5 μL,灭菌双蒸水27.5 μL.反应体系的体积共50.0 μL. PCR扩增程序为:95℃预变性120 s,95℃ 60 s,55℃ 90 s,72℃ 120 s,共29个循环,72℃ 10 min,4℃保温. PCR产物经琼脂糖凝胶电泳验证后,送由上海生工生物工程公司测序.测得16S rDNA序列通过Internet在美国生物技术信息中心(NCBI)核酸数据库中进行Blastn搜索.系统发育树采用Mega 5.0软件进行构建,用Neighbor-Joining法构建系统发生树,1000次随机抽样,计算自引导值(Bootstrap)以评估系统发生树的置信度.

1.4 抗生素敏感性试验

药物敏感性采用 Kirby-Bauer 纸片琼脂扩散法, 选择 8 种常用的抗生素进行敏感性试验. 抗生素浓度 ($\mu\text{g}/\text{片}$) 分别为: AMP 10.0, KAN 30.0, CHL 30.0, STR 10.0, GEN 10.0, TET 30.0, EM 15.0, SPE 100.0. 革兰氏阳性细菌的质控菌株采用金黄色葡萄球菌 ATCC 25923, 革兰氏阴性细菌的质控菌株为大肠埃希氏菌 ATCC 29522. 结果判定按 NCCL2003 版执行. 耐药性分为三层次: 敏感(S)、中介(I)、耐药(R). 为便于统计, 耐药性处于中介(I)并入耐药(R)计算^[12].

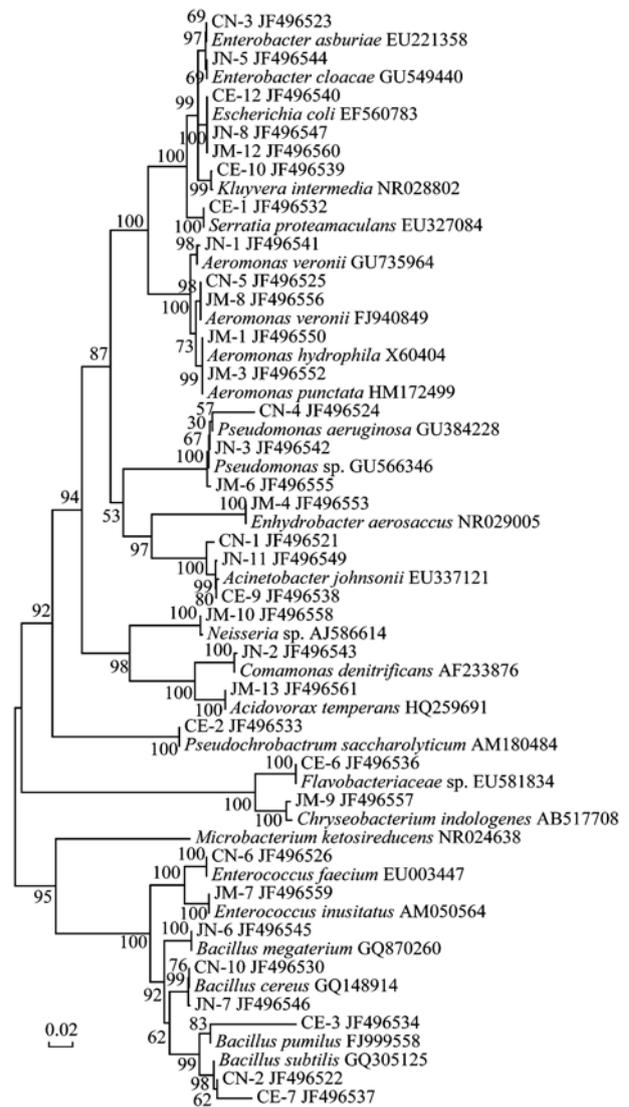
2 结果与分析

2.1 4 个污水处理厂活性污泥中细菌总数

活性污泥的净化污水功能主要取决于栖息在活性污泥上的微生物. 活性污泥上的微生物以好氧细菌为主^[4]. 采自 CN、CE、JN 和 JM 这 4 个污水处理厂的活性污泥中的细菌总数(以湿污泥计)分别为 3.8×10^7 、 4.2×10^7 、 6.3×10^7 和 1.5×10^8 $\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$. 4 个污水处理厂的活性污泥中的细菌数量上的差异可能与各个污水处理厂所采用的处理工艺和污泥泥龄不同有关.

2.2 菌种鉴定

来自于 CN、CE、JN 和 JM 污水处理厂的活性污泥中分别分离到 7、9、8 和 11 株形态各异的细菌, 共计 35 株. 将测得的 35 株细菌的 16S rDNA 序列在 NCBI 核酸数据中进行 Blastn 比对并构建系统发育树. 结果见图 1. 这 35 株细菌分属 17 个属, 25 个种, 其中革兰氏阳性菌 11 株, 革兰氏阴性菌 24 株. 活性污泥中最常见的假单胞菌(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、不动杆菌(*Acinetobacter*)、黄杆菌(*Flavobacteriaceae*)、丛毛单胞菌(*Comamonas*)、气单胞菌(*Aeromonas*) 和大肠埃希氏菌(*Escherichia*) 等属的菌株均可从 4 个污水处理厂的活性污泥中分离到^[10]; 奈瑟氏菌(*Neisseria*) 和肠球菌(*Enterococcus*) 等医学病原菌也能分离到. JM 的污泥中还分离到了气单胞菌属的嗜水气单胞菌(*A. hydrophila*)、点状产气单胞菌(*A. punctata*) 和维氏气单胞菌(*A. veronii*) 以及气囊水栖菌(*E. Aerosaccus*) (图 1), 嗜水气单胞菌和气囊水栖菌是水产养殖业中常见的病原体^[13,14]. 由于 JM 污水处理厂濒临长江, 承担了南京市 60% 的城市污水处理量. 其出水量大并且利用长江水体稀释自净能力进行深水排放^[9]. 气单胞菌和气囊水栖菌有可能随污水处理后的出水进入长



分支处数值为1 000次抽样分析支持的百分值, 菌株拉丁名后字符串为选取菌株的 16S rDNA 序列在 GenBank 数据库中的登录号; CE-11 和 JM-5 这 2 个菌株只测得了 600 多碱基的 rDNA 序列, 未与其他菌株的 1 400 多碱基的 16S rDNA 序列一起构建系统发育树; 这 2 个菌株的 16S rDNA 序列比对结果分别与微杆菌 *M. ketosireducens* 和枯草芽孢杆菌 *B. subtilis* 的相似性达到 98% 以上并且处于系统发育树的同一个分支上

图 1 4 种活性污泥中的细菌 16S rDNA 系统发育树

Fig. 1 Phylogenetic tree based on 16S rDNA sequences of selected strains in four active sludge

江, 污染长江下游水质以及对长江中的鱼类生态和养殖产生影响.

2.3 活性污泥中细菌的多重耐药性分析

对来自于 4 个污水处理厂的活性污泥中分离到的 35 株细菌进行 8 种抗生素耐药性检测(表 2). 结果表明 4 个污水处理厂的活性污泥中普遍存在耐药性. 多重耐药统计结果如表 3 所示, 除短小芽孢杆菌 *B. pumilus* CE-3 对所有测试抗生素敏感外, 其他菌

表 2 4 个污水处理厂活性污泥中细菌对 8 种抗生素的耐药性测试结果

Table 2 Results of 8 kinds of antibiotic resistance test based on bacteria from activated sludge of four sewage treatment plants

菌株	菌种	抗生素							
		AMP	KAN	CHL	STR	GEN	TET	EM	SPE
CN-1	约氏不动杆菌 <i>A. johnsonii</i>	R	I	S	I	I	R	R	I
CN-2	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	S	S	S	S	S	R	I	I
CN-3	阿氏肠杆菌 <i>E. asburiae</i>	I	S	S	R	S	I	R	I
CN-4	产碱假单胞菌 <i>P. alcaligenes</i>	R	S	R	I	S	S	I	S
CN-5	维氏气单胞菌 <i>A. veronii</i>	R	I	S	R	R	S	R	S
CN-6	粪肠球菌 <i>E. faecium</i>	R	S	S	R	R	R	R	S
CN-10	蜡状芽孢杆菌 <i>B. cereus</i>	R	I	S	S	S	S	I	I
CE-1	变形斑沙雷菌 <i>S. proteamaculans</i>	R	S	I	S	S	R	R	R
CE-2	不解糖假苍白杆菌 <i>P. saccharolyticum</i>	R	R	R	R	S	I	R	I
CE-3	短小芽孢杆菌 <i>B. pumilus</i>	S	S	S	S	S	S	S	S
CE-6	黄杆菌属 <i>Flavobacteriaceae</i> sp.	I	S	S	I	S	I	R	S
CE-7	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	S	S	S	S	S	R	I	I
CE-9	约氏不动杆菌 <i>A. johnsonii</i>	S	S	I	S	S	R	R	I
CE-10	中间克鲁瓦氏菌 <i>K. intermedia</i>	R	I	I	I	S	I	R	I
CE-11	微杆菌 <i>M. ketosireducens</i>	R	R	R	R	R	I	R	R
CE-12	大肠杆菌 <i>E. coli</i>	I	I	S	R	S	I	R	I
JN-1	维氏气单胞菌 <i>A. veronii</i>	R	R	I	R	R	R	R	R
JN-2	脱氮丛毛单胞菌 <i>C. denitrificans</i>	R	S	S	R	S	I	R	R
JN-3	铜绿假单胞菌 <i>P. aeruginosa</i>	R	S	I	S	S	S	R	S
JN-5	阴沟肠杆菌 <i>E. cloacae</i>	R	S	I	I	R	R	R	R
JN-6	巨大芽孢杆菌 <i>B. megaterium</i>	S	S	S	S	S	S	I	I
JN-7	蜡状芽孢杆菌 <i>B. cereus</i>	R	S	S	S	S	R	I	R
JN-8	大肠杆菌 <i>E. coli</i>	S	S	S	I	S	S	I	S
JN-11	约氏不动杆菌 <i>A. johnsonii</i>	R	I	S	I	I	R	R	I
JM-1	嗜水气单胞菌 <i>A. hydrophila</i>	R	R	I	R	R	S	R	R
JM-3	点状产气单胞菌 <i>A. punctata</i>	R	S	S	I	S	R	I	R
JM-4	气囊水栖菌 <i>E. aerosaccus</i>	I	S	I	S	S	I	I	I
JM-5	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	S	S	S	S	S	S	I	I
JM-6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i> sp.	R	S	I	S	S	S	R	S
JM-7	肠球菌 <i>E. inusitatus</i>	S	S	S	S	S	S	R	S
JM-8	维氏气单胞菌 <i>A. veronii</i>	R	I	S	R	I	I	R	S
JM-9	产吡啶金黄杆菌 <i>C. indologenes</i>	R	R	R	R	R	R	I	I
JM-10	奈瑟氏菌 <i>Neisseria</i> sp.	S	S	S	S	I	S	I	S
JM-12	大肠杆菌 <i>E. coli</i>	R	I	S	R	R	R	R	S
JM-13	中等食酸菌 <i>A. temperans</i>	S	S	S	S	S	S	S	I

表 3 菌株的多重耐药性统计结果

Table 3 Multiresistance statistical results of strains

项目	抗性数/种				合计
	0	1	2	≥3	
菌株数/个	1	2	4	28	35
百分比/%	2.9	5.7	11.4	80.0	100.0

株均具有不同程度的抗生素耐药性,比例高达 97.1%。具有多重耐药性(3 个和 3 个以上)的菌株的比例达到了 80%。甚至微杆菌 *M. ketosireducens* CE-11、维氏气单胞菌 *A. veronii* JN-1 和产吡啶金黄杆菌 *C. indologenes* JM-9 对 8 种抗生素均具有耐药性。

2.4 分离菌对不同抗生素的耐药率分析

35 个菌株对 8 种抗生素的耐药率的统计结果见表 4。对 AMP、KAN、CHL、STR、GEN、TET、EM 和 SPE 的耐药率分别为 71.4、37.1、37.1、57.1、34.3、68.6、94.3 和 65.7。其中 EM 的耐药率高达 94.3%。只有短小芽孢杆菌 *B. pumilus* CE-3 和中等食酸菌 *A. Temperans* JM-13 对 EM 没有耐药性。刘小云等^[3]报道取样于重庆市不同水环境中的耐热大肠杆菌对 EM 的耐药率高达 99.1%；本次 35 株分离菌对 AMP 的耐药率为 71.4%，与刘小云报道的重庆市不同水体分离菌的 AMP 耐药率为 68% 的结果基本一致。张新英等^[4]报道南宁市生活污水中的大肠菌群对 EM 和 AMP 具有耐药性。上述 3 个不同地区的细菌的耐药性检测结果表明,我国水环

表 4 抗生素耐药率统计结果

Table 4 Statistical results of antibiotic resistance rates

采样地	菌株数/种	耐药菌株数/个							
		AMP	KAN	CHL	STR	GET	TET	EM	SPE
CN	7	6	3	1	5	3	4	7	4
CE	9	6	4	5	5	1	8	8	7
JN	8	6	2	3	5	3	7	8	6
JM	11	7	4	4	5	5	5	10	6
总数	35	25	13	13	20	12	24	33	23
耐药率/%		71.4	37.1	37.1	57.1	34.3	68.6	94.3	65.7

环境中细菌的 EM 和 AMP 的耐药性已经非常严重. TET、SPE 和 STR 是畜牧和水产养殖业中广泛使用的四环素类和氨基糖苷类抗生素,然而这 3 种抗生素在活性污泥分离菌中的耐药率分别达到 68.6%、65.7% 和 57.1%.

2.5 不同细菌种类对抗生素的耐药率分析

35 株细菌中,芽孢杆菌属有 7 株,气单胞菌属有 5 株. 耐药性分析结果见表 5. 气单胞菌的所有 5

个菌株对 AMP、STR 和 SPE 均具有耐药性;每个菌株的多重耐药的抗生素种类至少为 5 种,显示该菌具有严重的多重耐药性. 芽孢杆菌属中抗生素的耐药性主要是 EM 和 SPE,7 株菌中均有 6 株具有耐药性,但绝大多数耐药性为中介(I)水平. 7 株菌中只有两株蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)对 AMP 具有耐药性(R),其他 5 株均为敏感(S);所有菌株对 CHL、STR 和 GET 均为敏感(S).

表 5 气单胞菌和芽孢杆菌的耐药性分析

Table 5 Antibiotic resistance analysis of *Aeromonas* and *Bacillus*

属名	菌株数/个	耐药菌株数/个							
		AMP	KAN	CHL	STR	GET	TET	EM	SPE
气单胞菌 <i>Aeromonas</i>	5	5	4	2	5	4	3	5	3
芽孢杆菌 <i>Bacillus</i>	7	2	1	0	0	0	3	6	6

3 讨论

CN、CE、JN 和 JM 这 4 家污水处理厂的活性污泥中的细菌总数分别为 3.8×10^7 、 4.2×10^7 、 6.3×10^7 和 1.5×10^8 CFU·g⁻¹,结果表明 4 个污水处理厂的活性污泥均为正常的成熟的污泥. 同时从 4 个污水处理厂活性污泥中分别分离到 7、9、8 和 11 株形态各异的细菌,共计 35 株. 这 35 株细菌分属 17 个属,25 个种,其中革兰氏阳性菌 11 株,革兰氏阴性菌 24 株,活性污泥中常用降解菌种均有检出. 活性污泥中分离菌株的耐药率达 97.1%,多重耐药率达 80%. 对 8 种抗生素的耐药率最低的庆大霉素也达到了 34.3%,最高的红霉素的耐药率则达到了 94.3%. 上述结果说明活性污泥中分离细菌菌株的耐药性非常严重,其耐药基因库,将为进入水环境中的致病菌或条件致病菌提供获得大量耐药基因的机会. 国内外一些学者建议将抗生素耐药基因列入新型环境污染物的[7,15].

气单胞菌广泛分布于自然界的各种水体. 嗜水气单胞菌是其模式菌株,是我国淡水养殖鱼类暴发性传染病的主要病原菌[15]. 早期研究显示嗜水气单

胞菌对 STR、KAN、CHL 和 GEN 等抗生素敏感[16],但本次分离的 5 株气单胞菌均对 AMP、STR 和 EM 具有耐药性,其中维氏气单胞菌 *A. veronii* JN-1 对所有 8 种测试抗生素均具有耐药性;嗜水气单胞菌 JM-1 菌株除对 CHL 敏感外,对其他 7 种抗生素均具耐药性.

我国城镇污水处理厂排放出的污泥以每年 20% 的速度递增,产生的污泥面临着巨大的处置压力. 污泥农用被认为是适合中国国情的污泥处置方式之一[10]. 污泥农用前需进行厌氧、好氧消化或好氧堆肥等稳定化处理,其中污泥堆肥是主要方法,通过高温以及微生物的拮抗作用来达到使病原菌快速死亡的目标[10],但其中抗生素耐药性状况及迁移规律尚不清楚,需要开展更深入的研究.

4 结论

(1)南京市 4 个主要污水处理厂的活性污泥中分离出 17 个属 25 个种共 35 株细菌,活性污泥中常用降解菌种均有检出,表明 4 家污水处理厂的活性污泥具有较好的生物降解能力.

(2)活性污泥中分离出的菌株耐药性严重,耐

药率达 97.1%,多重耐药率达 80%,表明污水处理厂的污泥及出水存在潜在的生态风险和健康风险。建议加强对污水处理厂出水及污泥中抗生素耐药性及耐药基因的检测并评估其生态影响。

参考文献:

- [1] Zhang Y L, Marrs C F, Simon C, *et al.* Wastewater treatment contributes to selective increase of antibiotic resistance among *Acinetobacter* spp. [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(12): 3702-3706.
- [2] 陈永山, 章海波, 骆永明, 等. 苕溪流域典型断面底泥 14 种抗生素污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 667-672.
- [3] 刘小云, 舒为群, 邱志群, 等. 水环境中耐热大肠菌群的抗生素耐药性与质粒谱研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, **12**(1): 118-121.
- [4] 张新英, 胡波, 莫莉萍, 等. 南宁市生活污水中大肠菌群对抗生素的耐药性评价[J]. *中华医学研究杂志*, 2007, **7**(5): 388-390.
- [5] 洪安安, 刘德华, 刘灿明. 活性污泥的主要微生物菌群及研究方法[J]. *工业水处理*, 2009, **29**(2): 10-14.
- [6] 李志华, 刘芳, 郭强, 等. 选择性抑制技术测定活性污泥细菌、真菌活性分布的适用性分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1561-1565.
- [7] Pruden A, Pei R T, Storteboom H, *et al.* Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: Studies in Northern Colorado [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(23): 7445-7450.
- [8] 王瑞慧, 宋永忠, 任兰, 等. 南京市污水处理厂污泥处理处置现状[J]. *环境监测管理与技术*, 2010, **22**(4): 4-6.
- [9] 张强. 南京江心洲污水处理厂污泥处置比较分析[J]. *科技资讯*, 2009, (12): 141.
- [10] 陈同斌, 郑国砥, 高定, 等. 城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(9): 104-108.
- [11] Hurek T, Wagner B, Reinhold-Hurek B. Identification of N₂-fixing plant- and fungus-associated *Azoarcus* species by PCR-based genomic fingerprints [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(11): 4331-4339.
- [12] Reinthaler F F, Posch J, Feierl G, *et al.* Antibiotic resistance of *E. coli* in sewage and sludge [J]. *Water Research*, 2003, **37**(8): 1685-1690.
- [13] Mehandjiyska L. Microbiological analysis of activated sludge in municipal wastewater treatment plant at "Kremikovtzi" holding [J]. *Journal of Culture Collections*, 1995, **1**: 18-22.
- [14] 马志宏, 陈慧英, 丁文. 北京地区鲤科鱼暴发性传染病的病原研究[J]. *生物多样性*, 1998, **6**(1): 31-36.
- [15] 王丽梅, 罗义, 毛大庆, 等. 抗生素抗性基因在环境中的传播扩散及抗性研究方法[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(4): 1063-1069.
- [16] 王增福, 谢红梅, 张静. 水产动物嗜水气单胞菌病研究进展[J]. *水利渔业*, 2002, **22**(2): 18-19.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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