

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H_2O_2 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O_3 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响

吴艳阳¹, 吴群河^{1*}, 黄珊², 叶嘉欣¹, 张恒军³, 张仁铎¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, Princeton, NJ, 08544, USA; 3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 研究了沉积物中 PAHs 对特定反硝化功能基因垂直分布的影响, 以建立反硝化条件下 PAHs 和各阶段反硝化反应之间的关系。2011 年 3 月, 对珠江广州河段珠江大桥、黄沙码头和二沙岛三处具有代表性的区域沉积物进行采集, 对沉积物 PAHs 污染和特定反硝化功能基因(*narG*、*nirS*、*nosZ* 和 *nrfA*) 的垂直分布特征进行了研究, 并通过多变量技术建立了反硝化条件下 PAHs 和特定反硝化功能基因之间的关系。典范对应分析(CCA)表明, 硝酸盐异化还原反应和高环 PAHs 之间联系密切。PAHs 对 *nosZ* 编码基因影响最为明显, 即对反硝化作用氧化亚氮还原阶段抑制作用最强。除氧化亚氮还原阶段外, 其他各阶段反硝化细菌普遍体现出对高环 PAHs 的适应性, 特别是含有异化亚硝酸盐还原酶编码基因(*nrfA*) 的微生物可能具有潜在的高环 PAHs 厌氧降解能力。亚硝态氮还原酶编码基因(*nirS*) 表现出特异性, 需要进一步深入研究。

关键词: 沉积物; 反硝化功能基因; 多环芳烃; 垂直分布; 典范对应分析

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3592-06

Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments

WU Yan-yang¹, WU Qun-he¹, HUANG Shan², YE Jia-xin¹, ZHANG Heng-jun³, ZHANG Ren-duo¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, Princeton, NJ, 08544, USA; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Guangzhou 510655, China)

Abstract: To establish the relationship between polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and various stages of denitrification under denitrifying conditions in sediments, we examined the impact of PAHs on the vertical distribution of special denitrifying genes. In March of 2011, sediment samples were collected from three representative locations along the Pearl River. The characteristics of vertical distribution of PAHs as well as denitrifying genes in the sediment samples were analyzed. Based on these vertical characteristics, relationships between PAHs and special denitrifying genes (*narG*, *nirS*, *nosZ* and *nrfA*) were established using the multivariate method. Results of canonical correspondence analysis (CCA) showed a close correlation between high ring PAHs and dissimilatory nitrate reduction. The impact of PAHs on *nosZ* was the most significant, namely PAHs imposed strong inhibition on the nitrite reduction stage. Except for the nitrite reduction stage, denitrifying bacteria from other stages of denitrification acclimatized themselves to the high ring PAHs. Especially, bacteria containing *nrfA* may have the potential to anaerobically degrade high ring PAHs. Besides this, the special role of *nirS* remains to be studied further.

Key words: sediments; denitrifying genes; polycyclic aromatic hydrocarbons; vertical distribution; canonical correspondence analysis

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类广泛分布于环境中的由两个或两个以上苯环以线状、角状或簇状排列的稠环化合物, 具有潜在的三致 (致畸、致癌、致突变) 作用^[1,2]。一般来讲, 在自然条件下多环芳烃很难降解, 而且抗降解能力随着分子中苯环数和分子量的增加而增强^[3]。在多环芳烃从自然环境中消除的各种途径中, 微生物降解起到了主导作用, 同时也是最主要的 PAHs 降解途径^[1]。

有氧条件下的 PAHs 微生物降解已经研究了多年, 但由于氧在水中的溶解能力有限, 在饱和和多孔介质 (如土壤和沉积物) 中的传递效率低, 氧的可利用能力常常是 PAHs 降解效率的限制因素。因此, 相

比好氧细菌, 厌氧细菌在这过程中起到了更主要的作用, PAHs 的厌氧降解可能是其从自然界中消除的决定机制^[3~5]。在重污染河流中, 溶解性无机氮 (DIN) 经常代替氧作为污染沉积物中 PAHs 降解的最终电子受体。利用 DIN 作为电子受体具有明显的优势, 因为 DIN 的水溶性强, 不易与其他无机物反应, 且反硝化菌产量增长最快, 是缺氧环境中最容易生长的细菌^[6]。PAHs 厌氧微生物降解已被证明能

收稿日期: 2011-11-29; 修订日期: 2012-04-24

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07211-002-01); 国家自然科学基金项目 (51039007, 51179212)

作者简介: 吴艳阳 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土环境污染修复, E-mail: sysuwy@ yahoo. cn

* 通讯联系人, E-mail: eeswqh@ mail. sysu. edu. cn

在硝酸盐还原条件下进行,即所谓多环芳烃厌氧微生物降解耦合脱氮^[4, 7-9]. 这一现象的证实给人们提供了一个极有研究潜力的污染修复策略,因其连接了人类关心的两大环境问题——POP_s 和富营养化问题,展现出极为广泛的应用前景^[10].

水体沉积物是分层栖息地,各层电子受体的垂直分布次序大体按照能量新陈代谢效率由上至下递减排列,这种生物地球化学特性的垂直梯度为不同新陈代谢类型的微生物提供了合适的生境^[11]. 在沉积物各层广泛分布着大量不同类型的反硝化细菌,在生物地球化学循环里,没有一个无机生物转化可以像反硝化作用一样被如此分布广泛、多样的生物体来完成^[6]. 因为存在巨大的多样性,使得通过常规的基于 16S rRNA 测序的方法来研究反硝化菌存在着极大的困难,即脱氮显型不能通过系统发育进行推断,因此需要利用编码反硝化酶的功能基因来作为分子标记对反硝化菌进行研究^[6, 12]. 利用分子生物学技术对传统的反硝化反应进行研究表明,反硝化反应分为 4 个步骤,涉及 4 种反硝化功能基因,分别是编码硝酸盐还原酶的 *narG* 基因,编码亚硝酸盐还原酶的 *nirS* 基因和编码异化亚硝酸盐还原酶的 *nrfA* 基因以及编码一氧化二氮(氧化亚氮)还原酶的 *nosZ* 基因^[13, 14]. 不同形态的 DIN 具有不同的接受电子能力,且参与每一步反硝化反应的细菌种类分布也不同,各种微生物群落对 PAHs 表现出截然不同的适应和转化能力. 但是,迄今为止几乎没有研究涉及 PAHs 厌氧降解与反硝化功能基因之间的关系. 本研究选取 16 种 US EPA 优控多环芳烃和 4 种反硝化功能基因(*narG*、*nirS*、*nosZ* 和 *nrfA*)作为研究对象,调查珠江广州段沉积物中 PAHs 和反硝化功能基因的垂直分布,并采用多变量分析技术对 PAHs 影响特定反硝化功能基因的分布进行分析,建立了反硝化条件下 PAHs 和特定反硝化功能基因之间的关系,以期为进一步研究反硝化条件下 PAHs 厌氧降解提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2011 年 3 月,在受到感潮作用影响的珠江广州河段的 3 个位置各设置一个采样点,采样点布设如下:珠江大桥(ZB)(113°13'17.4"E,23°7'25.5"N)、黄沙码头(H)(113°14'4"E,23°6'33.9"N)、二沙岛(E)(113°17'2.6"E,23°6'50"N). 采样点的选取是根据各区域不同的污染程度并综合考虑珠江广州段

水文水质特点、河道走向和弯道、支流和障碍物的位置、沿程污染源分布以及河道中污染物的回荡等因素的基础上确定的. 其中,珠江大桥靠近废弃物处理站,黄沙码头靠近小型化工厂,二沙岛靠近住宅密集区. 珠江大桥采样点沉积物的砂质含量高,而有机质含量低,受污染程度最低;黄沙码头采样点区域沉积物受生活和工业双重污染严重,泥黑且有分层现象,有机质及营养元素含量高;二沙岛采样点靠近居民生活区,主要受生活污水排放的影响,沉积物黏粒含量高,表层含杂质较多,受人为扰动少,在整个剖面上性质较均一. 采样时断面位置采用 GPS 定位系统进行定位. 在每个采样点采集沉积物柱,柱状样深度 > 30 cm. 采样后现场对沉积物内核切割分层,每 5 cm 分层,0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm、15 ~ 20 cm、20 ~ 25 cm,共分 5 层. 沉积柱分层后迅速用铝箔包好放入聚乙烯封口袋,现场用冰块保存,运回实验后于 -20℃ 冷冻保存.

1.2 总有机碳及无机氮测定

总有机碳(TOC)利用重铬酸钾容量法-外加热法测定;氨态氮、亚硝态氮和硝态氮分别采用靛酚蓝分光光度法、双波长紫外分光光度法和萘乙二胺分光光度法测定^[15, 16].

1.3 多环芳烃含量分析

参照曹启民等^[17]的方法对沉积物样进行处理. 沉积物经过冻干机干燥后研磨过 100 目筛. 称取 5 g 沉积物样品和 5 g 活化后的铜粉,充分混合均匀,避光静置平衡过夜. 按梯度分 3 次加入共 80 mL 提取剂(二氯甲烷:丙酮 = 1:1,体积比),超声水浴 40℃ 萃取 3 次,每次 30 min. 萃取液旋蒸至约 1 mL,过装有 1 cm 石英砂 + 12 cm 活化硅胶 + 6 cm 中性氧化铝 + 1 cm 无水硫酸钠的层析柱净化,以 15 mL 农残级正己烷预洗,70 mL 二氯甲烷:正己烷(3:7,体积比)溶液洗脱,收集洗脱液旋蒸浓缩,用正己烷定容到 0.2 mL. 浓缩净化完毕的水体和沉积物样品用含有 TR-5 ms 石英毛细管柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm)的 Thermo 气相色谱-质谱(GC-MS)进行检测.

1.4 反硝化功能基因测定

采用实时定量 PCR 法对整个 PCR 反应扩增过程进行实时监测,随着反应进行,根据 PCR 反应进入指数期的时间推断模板最初的含量. 本研究中的定量方法是标准曲线的绝对定量法,用含有相关功能基因的标准菌株 M13 的 DNA 进行克隆纯化扩增后,测定其吸光度,计算拷贝数后,稀释成一系列标准品,通过

绘制标准曲线后与各个样品的测定值进行比对,实现样品的绝对定量. 根据相关文献和已有研究成果,选取被广泛应用于沉积物和土壤样品的引物作为本研究中各功能基因的扩增引物(表 1)^[18~22].

表 1 相关功能基因扩增引物

Table 1 Real-time PCR primers used for the amplification of denitrifying genes			
引物	目标基因	序列 (5'-3')	退火温度 /℃
<i>narG</i> 328F	<i>narG</i>	GACAAACTTCGCAGCGG	61
<i>narG</i> 497R	<i>narG</i>	TCACCCAGGACGCTGTTC	61
<i>nirS</i> 3F	<i>nirS</i>	CCTA (C/T) TGGCCGCC (A/G) CA (A/G) T	57
<i>nirS</i> 5R	<i>nirS</i>	GCCGCCGTC (A/G) TG (A/C/G) AGGAA	57
<i>nos</i> 1527F	<i>nosZ</i>	CGCTGTTCHTCGACAGYCA	57
<i>nos</i> 1773R	<i>nosZ</i>	ATRTCGATCARCTGBTCGTT	57
<i>nrfA</i> -2F	<i>nrfA</i>	CACGACAGCAAGACTGCCG	60
<i>nrfA</i> -2R	<i>nrfA</i>	CCGGCACTTTCGAGCCC	60
1055f	16S rDNA	ATGCTGTGCTCAGCT	57
1392r	16S rDNA	ACGGGGCGGTGTGTAC	57

另外为提高荧光定量 PCR 扩增效率和准确度,选取的引物一般不超过 600 bp. 具体操作方法如下:
①将上述已知指定基因拷贝数的扩增产物进行($10^1 \sim 10^7$)梯度稀释,取合适的梯度作为 Real-time Q-PCR 反应的标准,获得标准曲线;②每层沉积物样品基因测定设置 3 个重复样和一个空白对照样;③将 Real-time Q-PCR 反应体系加入 384 孔板,简短离心使其混合均匀并排出所有气泡,反应体系如下:SYBR Premix Ex *Taq*TM II (2 ×) 5μL, 无菌水 1.0 μL, 前引物 (10 nmol·L⁻¹) 0.4 μL, 后引物 (10 nmol·L⁻¹) 0.4 μL, DNA 模板 1.0 μL;④将 384 孔板放入实时定量 PCR 仪 (ABI 7000 Sequence Detection System, Applied Biosystems, USA), 设定 PCR 反应条件为:预变性 94℃ 30 s; PCR 扩增 94℃ 5 s、55℃ 30 s、72℃ 30 s 下进行 40 个循环,溶解曲线分析 95℃ 15 s、65℃ 15 s、95℃ continue;⑤用实时定量 PCR 仪随机软件 7000 System Software (Applied Biosystems, USA) 对实验结果进行分析,获得基因拷贝数;⑥根据每个基因组一般含有一个功能基因计算各个沉积物采样点中指定功能基因的数量.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中总有机碳和无机氮含量分布

采样区域沉积物样品中的 TOC 和无机氮含量见表 2. 总体来看,3 处采样区域 TOC 与氮营养盐含量分布的梯度差异与各自的污染程度相对应.

表 2 沉积物样品中总有机碳和无机氮含量

Table 2 Concentration of TOC and inorganic nitrogen in sediment samples

样品	TOC /%	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹
Za ¹⁾	0.72	27.93	0.37	5.28
Zb	0.32	32.27	0.19	2.81
Zc	0.44	33.53	0.63	18.65
Zd	0.55	32.88	0.09	4.68
Ze	1.11	27.19	0.21	4.45
Ha	3.96	56.42	0.89	18.22
Hb	3.92	65.39	0.43	22.73
Hc	3.17	70.12	0.40	30.12
Hd	2.73	81.90	0.53	31.07
He	4.23	44.04	0.22	24.23
Ea	2.65	25.79	0.42	21.51
Eb	1.49	34.88	0.15	10.85
Ec	2.02	30.60	0.11	7.70
Ed	2.59	36.38	0.24	5.63
Ee	3.11	32.88	0.03	11.16

1) Za 表示珠江大桥 0~5 cm 层沉积物样品,依此类推,每 5 cm 一层

2.2 沉积物中 PAHs 分布特征

各采样点沉积物样品中 16 种优控 PAHs 含量分布如图 1 所示.

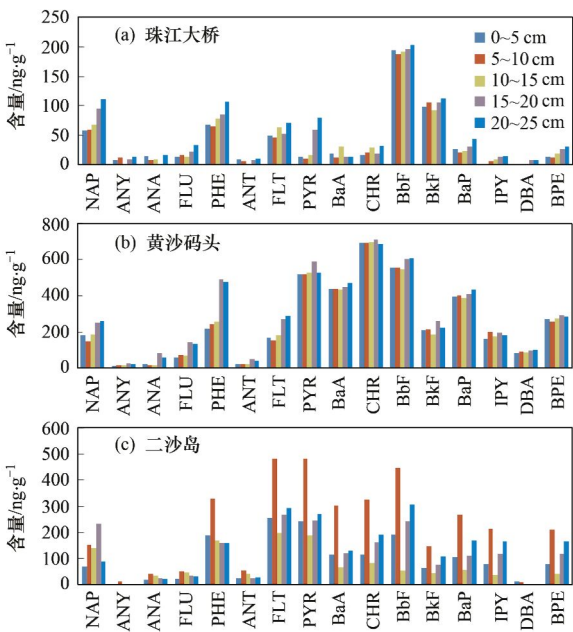


图 1 沉积物样品中 16 种优控 PAHs 含量

Fig. 1 Concentration of PAHs in sediment samples

由图 1 中可以看出,在 2~3 环(低环)PAHs 单体中,各采样点最高检出值均为菲,说明在低环 PAHs 中,各采样区域沉积物均呈现以菲为代表的污染特征;黄沙码头和二沙岛沉积物中含量最低的 PAHs 单体为芴烯,珠江大桥采样区域芴烯和蒽含量也很小,但以蒽为最低. 珠江大桥和二沙岛沉积物 4 环(中环)PAHs 中均以荧蒽含量最高,而黄沙

码头区域 4 环 PAHs 中却以荧蒽含量为最低. 5~6 环(高环)PAHs 单体中,其中苯并(b)荧蒽在 3 个采样区域沉积物中含量均较高;除珠江大桥外,苯并(a)芘、茚并(1,2,3-c,d)芘和苯并(g,h,i)芘在另外两处采样区域沉积物中检出值均很高. 整体上,珠江广州段各采样区域沉积物 PAHs 以 4 环、5 环 PAHs 为主,4 环以上的高分子 PAHs 比 2~3 环的低分子 PAHs 占优势,说明珠江广州段研究区域呈现以高环 PAHs 为主的污染特征. 总体来看,以黄沙码头 PAHs 污染最重,而珠江大桥 PAHs 污染最轻,和 3 处采样区域总体污染程度一致.

2.3 反硝化功能基因分布

用 16S rRNA 基因的数量来代表总细菌数量,采用 16S rRNA 定量扩增灵敏度高,所得的细菌数量通常较高. 各点 16S rRNA 基因数量测定结果如图 2 所示.

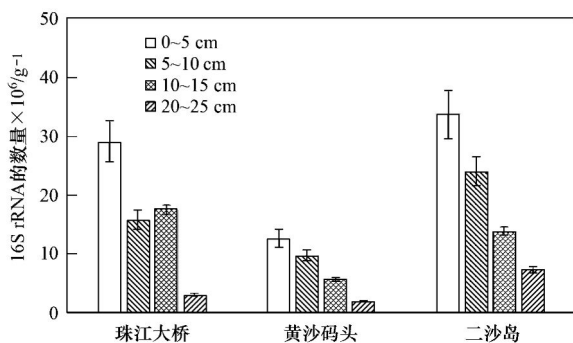


图 2 沉积物样品中 16S rRNA 基因数量分布

Fig. 2 Copy numbers of 16S rRNA genes in sediment samples

本研究同时计算了编码基因与 16S rRNA 基因数量的比值(反硝化功能基因相对比例),编码基因与 16S rRNA 基因的相对比例能一定程度上代表进

行各阶段反硝化反应的细菌占总体细菌的比重.

3 个采样点沉积物中以黄沙码头沉积物 16S rRNA 基因数量最少,而 *narG* 相对比例最大,说明硝态氮还原细菌比例较高,其沉积物环境比较适合反硝化反应的进行. *nirS* 基因都集中在沉积物表层,其相对比例在沉积物中垂向变化明显,说明亚硝酸盐还原反应区域集中在沉积物表层. 亚硝酸盐还原酶基因(*nirS*)以及一氧化二氮还原酶基因(*nosZ*)都主要分布在沉积物 0~15 cm,说明了该深度范围是沉积物中完整反硝化反应过程活跃的区域,是氮气生成的主要环境. 随着沉积物深度增加,*nrfA* 基因相对比例逐渐增加,表明 *nrfA* 能较好地适应深层沉积物环境.

2.4 典范对应分析

多变量技术,例如主成分分析(PCA)、多维尺度分析(MDS)和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)已经被证明在研究细菌群落组成和环境因子之间关系方面比单变量方法更有效^[11, 23]. CCA 在阐述细菌群落如何随着环境变量梯度变化方面非常有效,尤其在淡水和海洋生态系统中的浮游细菌群落动力学研究中已被普遍采用,但针对沉积物细菌群落和环境变量之间的关系还鲜见研究^[23~26]. 本研究基于物种响应环境梯度模型对沉积物中环境因子和 PAHs 进行约束性排序,选用单峰模型对反硝化编码基因和低环(LMW)、高环(HMW)PAHs 以及总 PAHs(TPAHs)进行典范对应分析,结果如图 4(a)所示. 编号 Z、H、E 分别代表珠江大桥(Z)、黄沙码头(H)和二沙岛(E)沉积物样本. CCA 轴线(CCA₁ 和 CCA₂)覆盖了 63.7% 的物种数据和 96.7% 的 PAHs-反硝化基

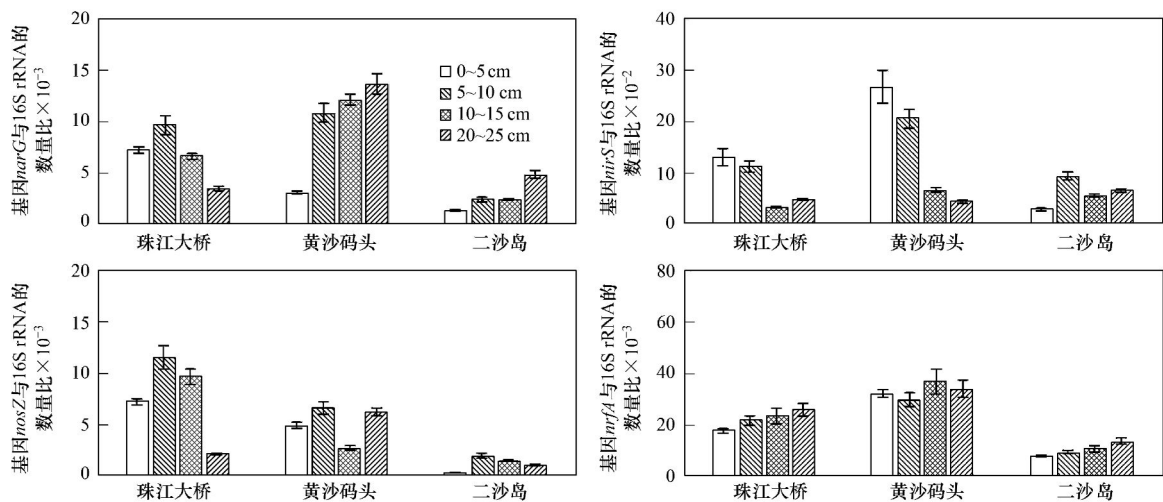


图 3 沉积物样品中反硝化功能基因与 16S rRNA 基因相对比例分布

Fig. 3 Ratio of denitrifying genes/16S rRNA genes in sediment samples

因之间关联的累计变量,表明 CCA_1 和 CCA_2 包含了 PAHs 和反硝化基因的绝大多数信息,能很好地解释这两者之间的关系. CCA_1 代表了沉积物中的氮营养盐水平, CCA_2 代表了沉积物中的 PAHs 和 TOC 含量水平. 从排序图可以看出,珠江大桥(Z)区域沉积物 PAHs 含量最低,处于 CCA_2 轴的下半部象限;黄沙码头和二沙岛区域沉积物中 PAHs 含量较高. TOC 矢量箭头与原点的连线很长,由 CCA 理论可知,箭头连线的长度代表着某个环境因子与研究对象分布相关程度的大小,连线越长,代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大,说明 TOC 和反硝化基因的相关程度均较高,沉积物中的有机质水平对反硝化细菌分布影响较大.

为说明反硝化各反应阶段细菌相对于各 PAHs 变量的适应性,将反硝化基因垂直投影于各 PAHs 矢量箭头延长线上,根据垂直投影点的位置

进行物种最适性判别. 可以看到,在 2~3 环 PAHs 环境含量较高时,以 *nrfA*、*narG* 具有最大的环境最适值,而 *nosZ* 相对低环 PAHs 的最适值则最低,说明执行反硝化作用硝酸盐还原阶段和异化亚硝酸盐还原阶段的细菌对低分子 PAHs 具有较高的适应性, *narG* 和 *nrfA* 对低环 PAHs 可能具有潜在的高降解效率,而 *nirS*、*nosZ* 则对低分子 PAHs 适应性较差;对于高分子 PAHs,则以 *nrfA*、*nirS* 具有最好的适应性, *narG*、*nosZ* 适应程度较低. 综合来看, *nrfA* 和 *narG* 对低分子量 PAHs 体现出适应性, *nirS* 和 *nrfA* 对高分子量 PAHs 体现出适应性,而高、低环 PAHs 均对 *nosZ* 表现出毒害效应. *nrfA* 整体上对 PAHs 适应性最高,推测含有这个基因的反硝化细菌具有较高的 PAHs 适应能力,特别是对高环 PAHs 适应性较好,因而具有潜在的高环 PAHs 降解能力.

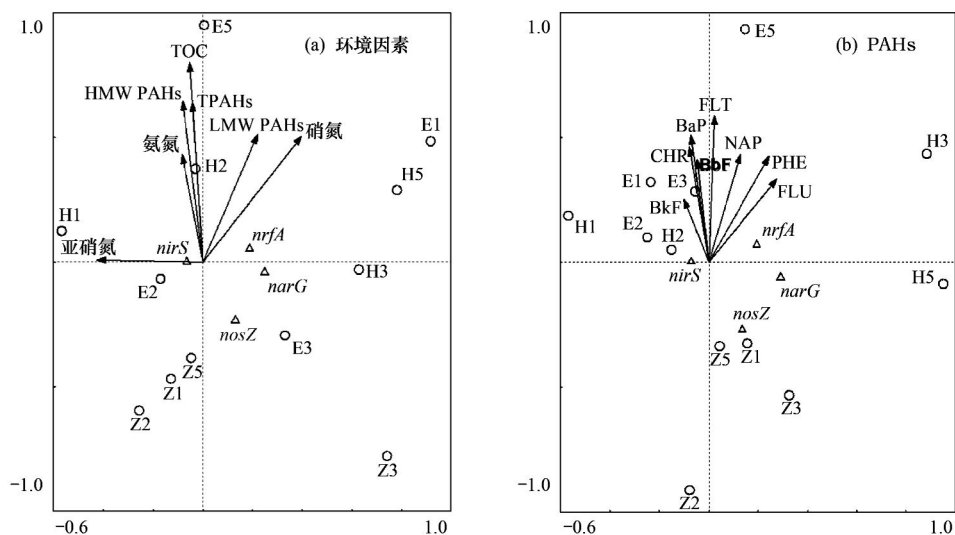


图 4 珠江沉积物中环境因素、PAHs 与反硝化基因的典范对应分析

Fig. 4 CCA for the first two dimensions of the relationships between environmental factors and PAHs vs. denitrifying genes in the Pearl River sediments

为了排除其他环境因素的影响,以进一步探讨 PAHs 对反硝化基因分布的影响,从 2~3 环、4 环、5~6 环各组 PAHs 中挑选有代表性的 PAHs 单体,共计 8 种,对这 8 种 PAHs 和反硝化基因进行典范对应分析,结果如图 4(b) 所示. 从中可以明显看出,按逆时针方向, *nrfA* 和 *narG* 对 PAHs 的适应性逐渐降低,以 FLU 最高, BkF 最低;值得注意的是, *nirS* 在 4 种研究的反硝化编码基因中比较特殊,对高环 PAHs 体现出较好的适应性,而对低环 PAHs 适应度较低. 据此,笔者推测,含有 *nirS* 编码的反硝化作用酶的微生物在高环 PAHs 降解耦合反硝化作用

途径中起重要作用,体现出一定的特异性,需在后续的实验中进行进一步观察验证;同样地, *nosZ* 显示出对 PAHs 的不适应性. 总体来看,以荧蒽 (FLT) 对反硝化编码基因分布影响程度最大,苯并[k]荧蒽 (BkF) 影响程度最低. 含有 *nrfA* 基因的反硝化细菌对所有 PAHs 体现出良好的耐受性,可能在 PAHs 降解反应中起重要作用.

3 结论

典范对应分析 (CCA) 表明,硝酸盐异化还原反应和高环 PAHs 之间联系密切. PAHs 对 *nosZ* 编码

基因影响最为明显,即对反硝化反应的氧化亚氮还原阶段抑制作用最强;除氧化亚氮还原阶段外,其它各阶段反硝化细菌普遍体现出对高环 PAHs 的适应性;异化亚硝酸盐还原酶编码基因(*nrfA*)对研究的所有 PAHs 单体特别是高环 PAHs 体现出较好的适应性,含有 *nrfA* 基因的反硝化细菌可能具有潜在的高环 PAHs 厌氧降解能力;*nirS* 基因在研究中体现出一定的特异性,推测含有 *nirS* 基因的微生物可能在高环 PAHs 降解耦合反硝化作用中起特殊作用,需继续深入研究。

参考文献:

- [1] Cerniglia C E. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1993, **4** (3): 331-338.
- [2] U. S. EPA. Provisional guidance for quantitative risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons[S]. 1993, EPA/600/R-93/089.
- [3] Bamforth S M, Singleton I. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: current knowledge and future directions [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2005, **80**(7): 723-736.
- [4] Dou J F, Liu X, Ding A Z. Anaerobic degradation of naphthalene by the mixed bacteria under nitrate reducing conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165** (1-3): 325-331.
- [5] Li C H, Zhou H W, Wong Y S, *et al.* Vertical distribution and anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in mangrove sediments in Hong Kong, South China[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(21): 5772-5779.
- [6] 方芳, 陈少华. 功能基因在反硝化菌群生态学研究中的应用[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(9): 1836-1845.
- [7] Rockne K J, Chee-Sanford J C, Sanford R A, *et al.* Anaerobic naphthalene degradation by microbial pure cultures under nitrate-reducing conditions [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(4): 1595-1601.
- [8] Coates J D, Chakraborty R, Lack J G, *et al.* Anaerobic benzene oxidation coupled to nitrate reduction in pure culture by two strains of *Dechloromonas*[J]. Nature, 2001, **411**(6841): 1039-1043.
- [9] Martínez-Hernández S, Olguín E J, Gómez J, *et al.* Acetate enhances the specific consumption rate of toluene under denitrifying conditions [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **57**(4): 679-687.
- [10] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **169**(1-3): 1-15.
- [11] Zeng J, Yang L Y, Li J Y, *et al.* Vertical distribution of bacterial community structure in the sediments of two eutrophic lakes revealed by denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) and multivariate analysis techniques [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2009, **25**(2): 225-233.
- [12] 梁丽华, 左剑恶. 反硝化功能基因——检测反硝化菌种群结构的分子标记[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(4): 627-633.
- [13] Braker G, Zhou J, Wu L, *et al.* Nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) as functional markers to investigate diversity of denitrifying bacteria in Pacific northwest marine sediment communities [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(5): 2096-2104.
- [14] Krishnani K K. Detection and diversity of nitrifying and denitrifying functional genes in coastal aquaculture [J]. Aquaculture, 2010, **302**(1-2): 57-70.
- [15] GB 17378.5-2007, 海洋监测规范[S].
- [16] HJ/T 346-2007, 中华人民共和国环境保护行业标准[S].
- [17] 曹启民, 陈桂珠, 缪绅裕. 多环芳烃的分布特征及其与有机碳和黑碳的相关性研究——以汕头国际湿地示范区三种红树林湿地表层沉积物为例[J]. 环境科学学报, 2009, **29** (4): 861-868.
- [18] Reyna L, Wunderlin D A, Genti-Raimondi S. Identification and quantification of a novel nitrate-reducing community in sediments of Suquia River basin along a nitrate gradient[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1608-1614.
- [19] Braker G, Fesefeldt A, Witzel K P. Development of PCR primer systems for amplification of nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) to detect denitrifying bacteria in environmental samples [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(10): 3769-3775.
- [20] Scala D J, Kerkhof L J. Nitrous oxide reductase (*nosZ*) gene-specific PCR primers for detection of denitrifiers and three *nosZ* genes from marine sediments[J]. FEMS Microbiology Letters, 1998, **162**(1): 61-68.
- [21] Smith C J, Nedwell D B, Dong L F, *et al.* Diversity and abundance of nitrate reductase genes (*narG* and *napA*), nitrite reductase genes (*nirS* and *nrfA*), and their transcripts in estuarine sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(11): 3612-3622.
- [22] Casamayor E O, Massana R, Benlloch S, *et al.* Changes in archaeal, bacterial and eukaryal assemblages along a salinity gradient by comparison of genetic fingerprinting methods in a multipond solar saltern[J]. Environmental Microbiology, 2002, **4**(6): 338-348.
- [23] Salles J F, Van Veen J A, Van Elsas J D. Multivariate analyses of Burkholderia Species in soil: effect of crop and land use history [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(7): 4012-4020.
- [24] Rooney-Varga J N, Giewat M W, Savin M C, *et al.* Links between phytoplankton and bacterial community dynamics in a coastal marine environment [J]. Microbial Ecology, 2005, **49** (1): 163-175.
- [25] Haukka K, Kolmonen E, Hyder R, *et al.* Effect of nutrient loading on bacterioplankton community composition in Lake Mesocosms[J]. Microbial Ecology, 2006, **51**(2): 137-146.
- [26] Sapp M, Wichels A, Wiltshire K H, *et al.* Bacterial community dynamics during the winter-spring transition in the North Sea[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2007, **59**(3): 622-637.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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