

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

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

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫酸脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锐, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究

佟娟¹, 王元月¹, 魏源送^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 江西省科学院能源研究所, 南昌 330096)

摘要: 城市污泥中含有大量的耐药菌, 具有向环境传播耐药菌与抗性基因的潜在危险, 但目前缺乏对城市污泥厌氧消化过程中耐药菌的研究. 为此对某城市污水处理厂卵形消化池污泥进行了为期 1 a 的调查研究, 考察了中温厌氧消化过程中四环素类与 β -内酰胺类抗生素厌氧耐药菌的污染特征与去除效果, 并分析了耐药菌的季节性变化规律. 结果表明, 厌氧进泥中四环素类耐药菌浓度与耐药率均低于 β -内酰胺类. 中温厌氧消化过程可以去除 1.48 ~ 1.64 log 单位的耐药菌 ($P < 0.05$), 但经过厌氧消化后氨苄西林与头孢噻吩耐药率有显著增长 (分别增加了 12.0% 与 14.3%, $P < 0.05$). 厌氧进泥中耐药菌分布有明显的季节特征, 除金霉素耐药菌外, 其它耐药菌的浓度均为寒冷季显著高于温暖季 ($P < 0.05$).

关键词: 耐药菌; 城市污泥; 中温厌氧消化; 四环素类抗生素; β -内酰胺类抗生素

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3814-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.025

Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge

TONG Juan¹, WANG Yuan-yue¹, WEI Yuan-song^{1,2}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Institute of Energy, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: Sewage sludge is one of the major sources that releasing antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistant genes (ARG) into the environment since it contains large amount of ARB, but there is little information about the fate of the anaerobic ARB in the anaerobic digestion of sewage sludge. Therefore, the distribution, removal and seasonal changes of tetracycline and β -lactam antibiotics resistant bacteria in the mesophilic egg-shaped digesters of a municipal wastewater treatment plant were investigated for one year in this study. Results showed that there were higher amounts of ARB and higher resistance rate of β -lactam antibiotics than that of tetracycline antibiotics in the sewage sludge. All ARB could be significantly reduced during the mesophilic anaerobic digestion process by 1.48-1.64 log unit ($P < 0.05$). Notably, the ampicillin and cephalothin resistance rates were significantly increased after anaerobic digestion by 12.0% and 14.3%, respectively ($P < 0.05$). The distribution of ARB in the sewage sludge had seasonal change characteristics. Except for chlorotetracycline resistant bacteria, there were more ARB in the sewage sludge in cold season than in warm season ($P < 0.05$).

Key words: antibiotic resistant bacteria (ARB); sewage sludge; mesophilic anaerobic digestion; tetracyclines; β -lactam antibiotics

由于抗生素长期被应用于人与动物的疾病治疗及在养殖业中促进动物生长, 导致环境微生物耐药性逐渐增强, 并严重威胁到人类健康^[1, 2]. 城市污水处理厂是耐药菌与抗性基因的重要储存库^[3~7], 其中城市污泥传播抗性的潜在危险性高于污水. 例如, Munir 等^[8]的研究表明, 城市污水处理厂的活性污泥中的耐药菌 ($3.17 \times 10^4 \sim 1.85 \times 10^9$ CFU $\cdot$ g⁻¹; colony-forming unit, CFU) 远高于出水中的耐药菌 ($5.00 \sim 6.10 \times 10^3$ CFU $\cdot$ mL⁻¹). 葛峰等^[9]发现在南京 4 个城市污水处理厂的活性污泥中分离出的 35 株细菌中, 97.1% 的细菌具有不同程度的耐药性, 80% 的菌株具有多重耐药性. 刘冲等^[10]发现在上海 2 个城市污水处理厂的外排污泥中 3 种四环素类耐药菌的浓度均高于进水. 此外, 研究表明城市污泥的土地

利用很有可能造成抗性污染传播^[11, 12]. 由此可知, 如果城市污泥处理不当, 则会有传播耐药菌与抗生素抗性基因的巨大风险; 另一方面, 城市污泥的合理处理也是控制耐药菌传播的重要工艺过程.

然而, 目前已有研究大多是针对城市污水处理过程中耐药的好氧菌群^[8, 13], 或某特定菌如大肠菌群 (Coliforms)^[14, 15]、肠球菌 (*Enterococci*)^[16]、不动

收稿日期: 2014-03-20; 修订日期: 2014-04-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2009AA063901); 国家自然科学基金项目 (21207147); 中国博士后科学基金项目 (2012M510575); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07202-005); 江西省科学院省院协同创新团队建设 (2014SYXTCX02)

作者简介: 佟娟 (1977 ~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为污水/污泥处理与资源化利用, E-mail: hjtj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yswci@cees.ac.cn

杆菌 (*Acinetobacter*)^[14, 17]、大肠杆菌 (*Escherichia coli*)^[18, 19]、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*)^[20]等的分布特征进行研究,缺乏对城市污泥典型处理工艺,即厌氧消化过程中耐药菌、尤其是厌氧耐药菌的分布规律与去除特征的研究,污泥中耐药菌的去除及其影响因素和控制方法都有待深入探讨^[21]。因此,本研究以北京某城市污水处理厂中温厌氧卵形消化池的进泥与出泥为对象,通过为期 1 a 的调查研究,重点考察应用最广泛的兽用/人类医用抗生素四环素类及 β -内酰胺类的厌氧耐药菌在城市污泥中温厌氧消化过程中的分布特征与去除效果,以期今后城市污泥处理过程中耐药菌传播污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

自 2012 年 9 月~2013 年 8 月,定期采集北京某城市污水处理厂卵形消化池的进泥和出泥。该污水处理厂服务人口 300 余万,初沉污泥采用中温卵形消化池 (35~38℃) 处理,日处理规模为 2 200~2 600 m³ 浓缩污泥 (含水率 96.5%~97.5%),污泥停留时间为 24~28 d。将现场所取得的污泥样品置于已灭菌的聚乙烯瓶 (1 L),立刻放于冰上冷藏、运输到实验室于 4℃ 冷藏保存。所取污泥样品先经 1 mm 筛网去除大颗粒杂质后用于污泥 TS 等各项指标的检测。污泥样品在取样后 48 h 内进行总厌氧菌与耐药菌的培养试验。

1.2 厌氧培养基的配制

根据文献[22~24]推荐的厌氧耐药菌培养方法对卵形消化池进/出污泥中厌氧耐药菌进行培养,重点考察 6 种抗生素耐药菌在厌氧污泥中的分布情况,分别是 3 种四环素类抗生素:土霉素 (oxytetracycline, OTC)、金霉素 (chlorotetracycline, CTC)、四环素 (tetracycline, TC) 和 3 种 β -内酰胺类抗生素:氨苄西林 (青霉素类, ampicillin, AMP)、头孢噻吩 (I 代头孢菌素, cephalothin, CEP)、头孢噻肟 (III 代头孢菌素, cefotaxime, CFT)。

分别取抗生素纯品 163.27 mg 土霉素 (纯度 $\geq$ 98%, LKT Labs, US), 173.13 mg 四环素 (盐酸盐) ($\geq$ 95%, Sigma, US), 229.58 mg 金霉素 (盐酸盐) ($\geq$ 75%, Sigma, US), 168.88 mg 头孢噻吩 (钠盐, 96.0%~101.0%, Sigma, US), 分别加入到 50 mL 的灭菌去离子水 (Milli-Q, US) 中,制备成含抗生素 3.2 g·L⁻¹ 的母液。将氨苄西林 (钠盐, 100

mg·mL⁻¹, Goldbio, US), 头孢噻肟 (钠盐, 100 mg·mL⁻¹, Goldbio, US) 用灭菌去离子水稀释 10 倍,制备成 10 g·L⁻¹ 母液,于 -20℃ 避光保存备用。耐药菌培养采用 Wilkins-chalgren 厌氧琼脂 (Oxoid, U. K.)^[25, 26]作为厌氧菌培养基。配制培养基时取相应剂量的抗生素母液加入到培养基中,配制成含抗生素 32 μ g·mL⁻¹ 的厌氧耐药菌选择性培养基。

1.3 厌氧菌的培养

取 10 mL 厌氧污泥加到含有 90 mL 灭菌 PBS 缓冲液的三角烧瓶内,加入适量灭菌玻璃珠,在恒温摇床内 180 r·min⁻¹ 振荡 1 h,制成均匀的稀释液,即为稀释 10⁻¹ 的菌液。取 1 mL 水样,采用 10 倍梯度稀释法,依此制成 10⁻²~10⁻⁸ 稀释菌液。选择 3 个适宜的稀释梯度,每个稀释度做 3 个平行试验。吸取 0.1 mL 稀释菌液,接种已倒入灭菌厌氧培养琼脂的培养皿中,以涂布棒涂布均匀,立刻倒置于 Anaero Pack 密封厌氧培养罐 (MGC, JP) 中,加入厌氧产气袋 (用于消耗剩余氧气) 以及氧气指示剂后密封,于 37℃ 恒温生化培养箱中避光培养 72 h 后计数。

1.4 数据处理

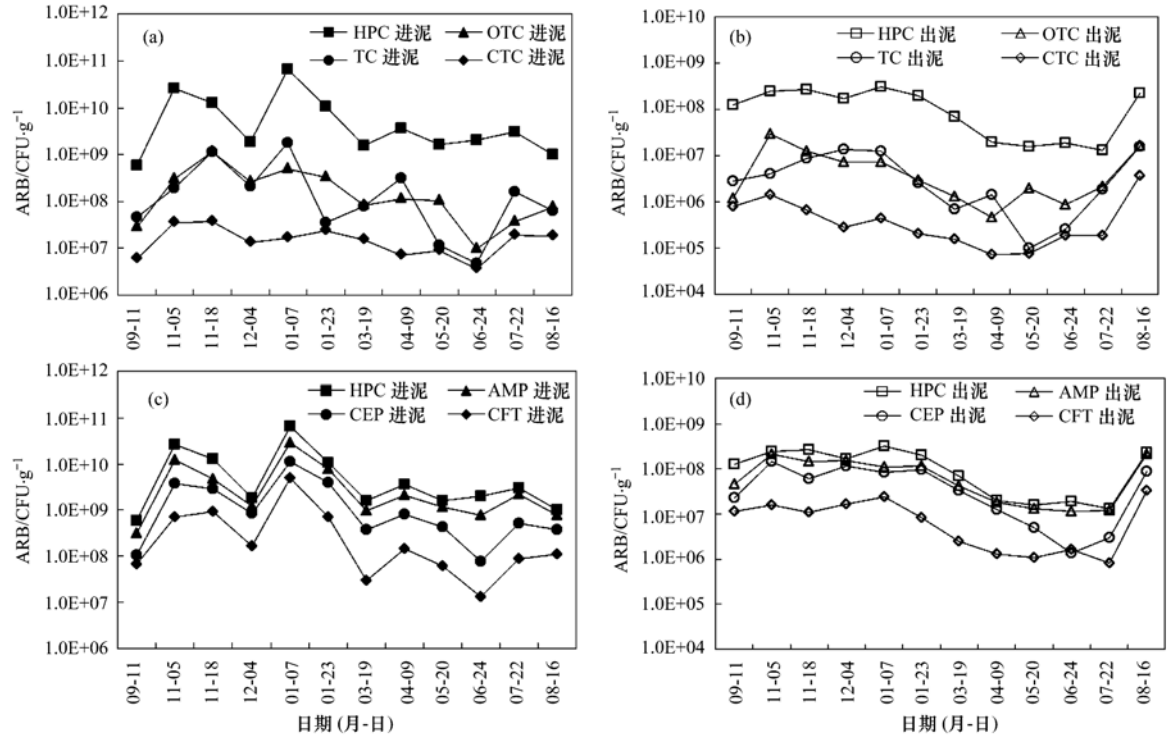
采用 SPSS® 18.0 软件对试验数据进行统计分析。采用的统计方法包括单因素方差分析、配对 *T* 检验、独立样本 *T* 检验等方法。对细菌浓度取 log 值后再进行相应的显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 厌氧耐药菌在厌氧消化过程中的分布特征

厌氧污泥中 6 种抗生素厌氧耐药菌分布情况的全年考察结果见图 1 所示。卵形消化池进泥与出泥中的总异养菌与耐药菌在一年内大多在 2 个数量级之内波动。厌氧进泥中总厌氧菌浓度为 $5.94 \times 10^8 \sim 6.75 \times 10^{10}$ CFU·g⁻¹, 四环素类耐药菌在 $3.57 \times 10^6 \sim 1.77 \times 10^9$ CFU·g⁻¹ 之间, β -内酰胺类耐药菌为 $1.33 \times 10^7 \sim 2.98 \times 10^{10}$ CFU·g⁻¹ 之间。

由图 2 可知,中温厌氧消化污泥中 β -内酰胺类耐药菌量的年均值均高于四环素类耐药菌量。方差分析结果表明,厌氧进泥的耐药菌之间存在显著差异,氨苄西林与头孢噻吩 > 头孢噻肟、土霉素、四环素 > 金霉素 ($P < 0.05$)。已有研究表明,污水生物处理过程,如传统活性污泥法、氧化沟、生物转盘、膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR) 等方法可以去除 0~5 个数量级的耐药菌^[8],但尚未见到污泥厌氧消化过程中厌氧耐药菌变化趋势研究的报道。本研究中,厌氧消化过程可以显著去除 1.68 log



图(a)和(c)为厌氧进泥中耐药菌与总厌氧菌浓度;图(b)和(d)为厌氧出泥中药菌与总厌氧菌浓度;HPC. 总厌氧菌; OTC. 土霉素; TC. 四环素; CTC. 金霉素; AMP. 氨苄西林; CEP. 头孢噻吩; CFT. 头孢噻肟

图 1 厌氧消化进/出泥中耐药菌浓度的全年分布

Fig. 1 ARB concentrations in the anaerobic sludge during one-year survey

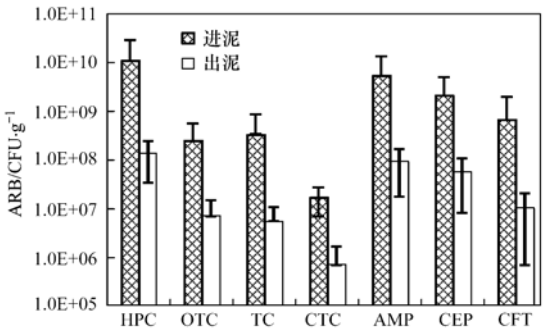


图 2 中温厌氧消化进/出泥中耐药菌浓度的全年平均值

Fig. 2 Average ARB concentrations in the anaerobic sludge during one-year survey

单位总厌氧菌 ($P < 0.05$), 并可显著去除各种耐药菌 (1.48 ~ 1.64 log 单位, $P < 0.05$) (图 2).

2.2 厌氧消化过程中厌氧菌耐药率的变化

对耐药菌在总厌氧菌中的比例进行分析, 可知各种抗生素耐药率在污泥厌氧消化过程中的变化情况. 厌氧进泥与出泥中各种抗生素耐药率的变化见图 3. 厌氧进泥中氨苄西林耐药率最高, 为 58.01%, 显著高于排名第二的头孢噻吩 (23.74%) ($P < 0.05$). 而氨苄西林与头孢噻吩的耐药率均显著高于其它 4 种抗生素 (土霉素: 4.69%; 四环素:

4.81%; 金霉素: 0.56%; 头孢噻肟: 5.66%) ($P < 0.05$). 虽然耐药菌浓度经过厌氧消化被去除 1.48 ~ 1.64 log 单位, 但氨苄西林与头孢噻吩耐药比例却分别从 58.01% 和 23.74% 增加到 69.99% 和 38.02% ($P < 0.05$), 其它 4 种抗生素的耐药比例则无显著变化 ($P > 0.05$). 其他学者在研究污水处理过程中也发现了这种处理后耐药菌浓度降低, 而部分耐药菌的耐药率升高的现象^[16~18], 但人们对此现象目前尚未有确切的解释, 只是推测可能与不同细菌对抗生素敏感程度不同, 即抗生素对细菌具有选

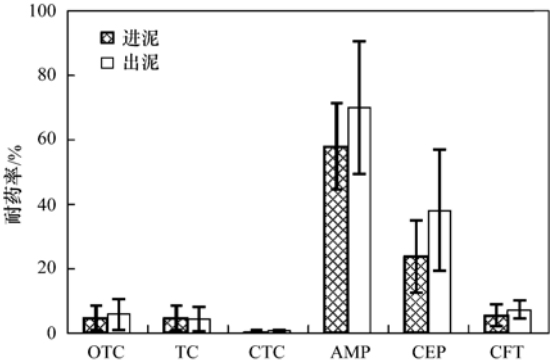


图 3 厌氧消化进/出泥中耐药率的变化

Fig. 3 Variation of resistance rate in the inlet/outlet anaerobic sludge

择性,从而不同细菌在处理过程中的去除比例也有所不同^[16~18]。

本研究的厌氧污泥的厌氧耐药菌中,四环素类耐药率相对较低,为 0.56%~5.82%,青霉素类的氨苄西林和 I 代头孢菌素类的头孢噻吩耐药率相对较高,为 23.74%~69.99%,Ⅲ代头孢菌素类的头孢噻肟耐药率为 5.66%~7.30%,略高于四环素类耐药率。已有文献中采用传统微生物培养方法研究好氧菌在城市污水、污泥中抗生素耐药

率的结果如表 1 所示。从中可知,虽然各研究者所采用的培养基、培养方法、抗生素浓度各有不同,但城市污水、污泥中的耐药菌都具有青霉素类、I 代头孢类抗生素耐药率较高,四环素类抗生素耐药率相对低的特点。而 Kerry 等^[27]发现在大量使用兽用抗生素的环境则有较高的四环素耐药率,在鱼塘使用土霉素治疗的第 3 d 与 24 d,鱼塘沉积物中异养菌对土霉素的耐药率从 9% 迅速增长到 26%。

表 1 文献中总可培养异养菌对各种抗生素的耐药率¹⁾

Table 1 Resistance rate of heterotrophic bacteria in wastewater/sludge in the literature						
样品来源	培养基	培养条件	抗生素	浓度/mg·L ⁻¹	耐药率/%	文献
城市污水厂出水	Nutrient agar	37℃ 培养 24 h	青霉素	16	约 78	[28]
			氨苄西林	32	约 78	
			四环素	16	约 4	
河流沉积物	R2A agar	37℃ 培养 2 d 后, 室温培养 7 d	金霉素	70.55	<10	[29]
			土霉素	45.55	<10	
城市污水厂进出水、污泥	R2A agar, 200 mg·L ⁻¹ cycloheximide	37℃ 培养 2 d 后, 27℃ 培养 5 d	四环素	16	<3	[30]
氧化塘污水	BHI medium	37℃ 培养 3 d	金霉素	32	—	[31]
			四环素	32	—	
城市污水厂进出污水、污泥	R2A agar, 200 mg·L ⁻¹ cyclohexamide	37℃ 培养 2 d 后, 27℃ 培养 5 d	四环素	16	3~4	[8]
城市污水厂生物固体(厌氧 后污泥)	R2A agar, 200 mg·L ⁻¹ cyclohexamide	27℃ 培养 5 d	氨苄西林	32	4.4	[32]
			头孢噻吩	32	21.2	
			四环素	16	1.9	
城市污水厂活性污泥	R2A agar	—	四环素	32	<7	[33]
城市污水厂污水	LB agar	37℃ 培养 24 h	四环素	20	1~4.3	[10]
			土霉素	20		
			金霉素	20		
鱼塘沉积物	2 216 V	—	土霉素	25	9~26	[27]

1) 表中部分耐药率数据为原文图中估算值

目前研究人员对于污水、污泥中抗生素残留量与耐药菌的关系尚未有定论^[29, 34]。例如,有研究表明抗生素残留浓度与耐药菌的浓度呈正相关^[13, 35],也有研究认为二者之间不显著相关^[30]。然而,抗生素的大量使用可以导致耐药菌浓度或耐药水平的增加^[36, 37]。由于城市污水厂接纳的污水主要来自人类生活污水,污水与污泥中耐药菌的分布受到人用抗生素的影响较大。因此笔者考察了医院的抗生素使用量与城市污水厂厌氧污泥中耐药菌之间的关系,并将在今后研究中继续考察抗生素残留量与耐药菌之间的关系。我国医院所使用的抗生素以 β -内酰胺类为主,使用量远高于四环素类抗生素^[38~42]。根据郑利光等^[43]对北京地区 19 家医院 2008 年 6 月~2009 年 5 月的抗菌药物采购数的统计分析,北京地区所使用的人用抗生素中,头孢菌素类与青霉

素类的使用频率[使用频率(DDDs)=购药总量/限定日用剂量]所占比例分别为 31.05% 和 6.37%,排名分别为第 1 和第 4,四环素类抗生素则仅为 0.31%,排名第 15。这可能是城市污水厂厌氧污泥中四环素类耐药率较低的重要原因之一。

2.3 耐药菌与耐药率的季节性变化

北京具有冬夏持续时间较长而春秋较短的气候特点,在 5~9 月,日均最高气温在 26℃ 以上,日均最低气温在 14~22℃;而在 10 月~次年 4 月,日均最高气温为 2~20℃,日均最低气温仅为 -9~8℃ (<http://w.zuzuche.com/weather/c235.html>)。此外,我国人用抗生素使用量有冬季大于夏季的特点^[44, 45],而抗生素使用量的增加常会导致耐药菌浓度与耐药水平的增加^[27, 36]。因此,本研究将 5~9 月和 10 月~次年 4 月分别作为温暖季、寒冷季,对

耐药菌在不同季节的分布情况进行分析. 由于卵形消化池内保持恒温,故本研究不考虑厌氧消化温度对耐药菌的影响.

如图 4 所示,寒冷季的进泥中总厌氧菌量为 $1.78 \times 10^{10} \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于温暖季的 $1.66 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ($P < 0.05$). 进泥中寒冷季各种抗生素耐药菌为 $2.10 \times 10^7 \sim 8.42 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,温暖季为 $1.12 \times 10^7 \sim 1.04 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,除金霉素耐药菌外,总厌氧菌及其它耐药菌均为寒冷季显著高于温暖季 ($P < 0.05$). 对于厌氧出泥,只有头孢噻吩耐药菌在寒冷季显著高于温暖季(寒冷季为 $7.92 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,温暖季为 $2.45 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$) ($P < 0.05$),其它耐药菌则无显著差异,说明一年中厌氧消化过程在总体上对耐药菌起到了很好的去除效果,出泥耐药菌浓度较为稳定.

我国城市污水厂有寒冷季进水 COD 普遍高于温暖季的特点,导致厌氧污泥的有机物浓度寒冷季高于温暖季. 有机负荷的增加会导致耐药菌增长,

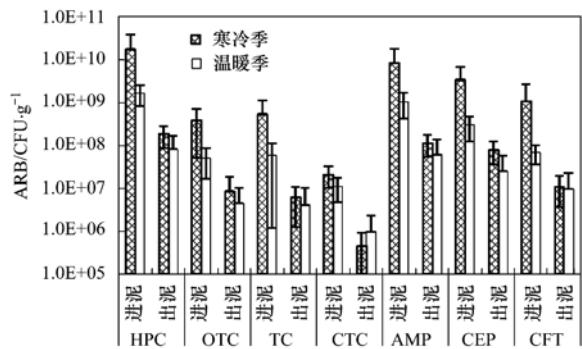


图 4 厌氧污泥中耐药菌在寒冷季与温暖季的分布
Fig. 4 ARB distribution in anaerobic sludge during cold and warm seasons

但对耐药率的影响不显著^[46]. 因此,本研究中,有机负荷、抗生素用量等因素均有利于耐药菌在寒冷季的增长大于温暖季,都是导致本研究中寒冷季耐药菌显著高于温暖季的重要原因.

如图 5 所示,虽然耐药菌去除量在寒冷季均高于温暖季,但独立样本 T 检验分析结果表明,除土霉素耐药菌外(寒冷季去除 1.79 log 单位,温暖季去除 1.21 log 单位) ($P < 0.05$),总厌氧菌及其它耐药菌并无显著差异 ($P > 0.05$).

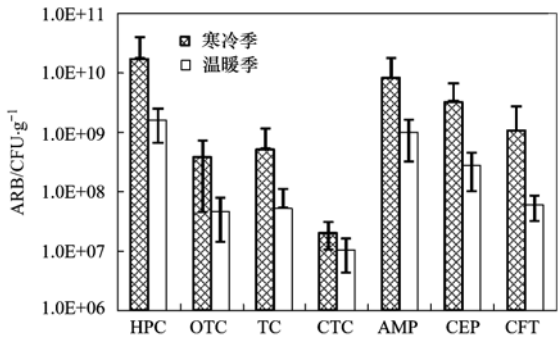


图 5 厌氧污泥中耐药菌在寒冷季与温暖季的去除
Fig. 5 Removal of ARB in anaerobic sludge during cold and warm seasons

独立样本 T 检验分析结果表明(表 2),厌氧进泥中各种抗生素的耐药率在寒冷季与温暖季无显著区别,但厌氧出泥中金霉素耐药率温暖季显著高于寒冷季(温暖季 1.02%; 寒冷季 0.26%),头孢噻吩耐药率寒冷季显著高于温暖季外(温暖季 23.81%; 寒冷季 48.17%),其它抗生素耐药率无显著差异 ($P > 0.05$). 与此不同的是,Novo 等^[47]发现春季与秋季中细菌对阿莫西林、四环素、新诺明的耐药比例有显著不同. 这些研究结果表明,环境微生物的耐药率受到较多因素影响,仍然需要深入探讨.

表 2 不同季节厌氧污泥中抗生素耐药率的变化[均值(标准偏差)]/%

Table 2 Variation of the resistance rate in anaerobic sludge during different seasons [means(S.D.)]/%

项目	厌氧进泥		厌氧出泥	
	寒冷季	温暖季	寒冷季	温暖季
OTC	5.15 (4.41)	4.04(2.76)	4.13(3.38)	8.18(5.37)
TC	5.35(4.00)	4.04(3.03)	3.75(2.62)	5.11(5.11)
CTC	0.36(0.31)	0.83(0.55)	0.26(0.16)	1.02(0.43)
AMP	55.35(12.15)	61.72(13.90)	68.24(20.28)	72.45(20.82)
CEP	26.09(10.48)	20.44(11.11)	48.17(16.61)	23.81(11.00)
CFT	5.50(2.44)	5.89(4.38)	6.00(2.11)	9.12(2.97)

3 结论

(1)厌氧进泥中四环素类耐药菌在 $3.57 \times 10^6 \sim 1.77 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, β -内酰胺类耐药菌为

$1.33 \times 10^7 \sim 2.98 \times 10^{10} \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间;中温厌氧消化可以显著去除所有的耐药菌($1.48 \sim 1.64 \text{ log}$ 单位, $P < 0.05$);但经过中温厌氧消化,氨苄西林与头孢噻吩的耐药率显著增加,分别增加了 12.0% 与

14.3% ($P < 0.05$), 而其它抗生素的耐药率无显著变化。

(2) 厌氧进泥中耐药菌浓度之间存在显著差异, 整体上 β -内酰胺类耐药菌含量高于四环素类耐药菌: 氨苄西林与头孢噻吩 > 头孢噻肟、土霉素、四环素 > 金霉素 ($P < 0.05$); 厌氧污泥中四环素类耐药率低于 β -内酰胺类。

(3) 厌氧进泥中耐药菌分布有明显季节特征: 除金霉素耐药菌外, 总异养菌及其它耐药菌均为寒冷季高于温暖季 ($P < 0.05$); 但厌氧进泥中抗生素耐药率在不同季节无显著区别。

参考文献:

- [1] Davies J. Inactivation of antibiotics and the dissemination of resistance genes[J]. *Science*, 1994, **264**(5157): 375-382.
- [2] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 725-759.
- [3] LaPara T M, Burch T R, McNamara P J, *et al.* Tertiary-treated municipal wastewater is a significant point source of antibiotic resistance genes into Duluth-Superior Harbor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(22): 9543-9549.
- [4] Auerbach E A, Seyfried E E, McMahon K D. Tetracycline resistance genes in activated sludge wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1143-1151.
- [5] Luczkiewicz A, Jankowska K, Fudala-Ksiazek S, *et al.* Antimicrobial resistance of fecal indicators in municipal wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2010, **44**(17): 5089-5097.
- [6] Martins da Costa P, Vaz-Pires P, Bernardo F. Antimicrobial resistance in *Enterococcus* spp. isolated in inflow, effluent and sludge from municipal sewage water treatment plants[J]. *Water Research*, 2006, **40**(8): 1735-1740.
- [7] Koczura R, Mokracka J, Jablonska L, *et al.* Antimicrobial resistance of integron-harboring *Escherichia coli* isolates from clinical samples, wastewater treatment plant and river water[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **414**: 680-685.
- [8] Munir M, Wong K, Xagorarakis I. Release of antibiotic resistant bacteria and genes in the effluent and biosolids of five wastewater utilities in Michigan[J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 681-693.
- [9] 葛峰, 郭坤, 周广灿, 等. 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[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1646-1651.
- [10] 刘冲, 黄满红, 肖斌. 城市污水处理厂污水处理系统中四环素类药物耐药菌的分布特性研究[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(12): 5-8.
- [11] Sahlstrom L, Rehbinder V, Albihi A, *et al.* Vancomycin resistant enterococci (VRE) in Swedish sewage sludge[J]. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2009, **51**: 24.
- [12] Munir M, Xagorarakis I. Levels of antibiotic resistance genes in manure, biosolids, and fertilized soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, **40**(1): 248-255.
- [13] Kim S, Jensen J N, Aga D S, *et al.* Tetracycline as a selector for resistant bacteria in activated sludge[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(9): 1643-1651.
- [14] Guardabassi L, Wong D M A L F, Dalsgaard A. The effects of tertiary wastewater treatment on the prevalence of antimicrobial resistant bacteria[J]. *Water Research*, 2002, **36**(8): 1955-1964.
- [15] Silva J, Castillo G, Callejas L, *et al.* Frequency of transferable multiple antibiotic resistance amongst coliform bacteria isolated from a treated sewage effluent in Antofagasta, Chile [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2006, **9**(5): 533-540.
- [16] Da Silva M F, Tiago I, Verissimo A, *et al.* Antibiotic resistance of enterococci and related bacteria in an urban wastewater treatment plant[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, **55**(2): 322-329.
- [17] 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.
- [18] Mezrioui N, Baleux B. Resistance patterns of *E. coli* strains isolated from domestic sewage before and after treatment in both aerobic lagoon and activated sludge[J]. *Water Research*, 1994, **28**(11): 2399-2406.
- [19] 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.
- [20] Börjesson S, Melin S, Matussek A, *et al.* A seasonal study of the *mecA* gene and *Staphylococcus aureus* including methicillin-resistant *S. aureus* in a municipal wastewater treatment plant[J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 925-932.
- [21] 佟娟, 魏源送. 污水处理厂削减耐药菌与抗性基因的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(11): 2650-2659.
- [22] Zabransky R J, Hauser K J. Stability of antibiotics in Wilkins-Chalgren anaerobic susceptibility testing medium after prolonged storage[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1977, **12**(3): 440-441.
- [23] Castel O, Grollier G, Agius G, *et al.* Evaluation of two media for antibiotic susceptibility testing of anaerobic bacteria using the receiver operating characteristic procedure[J]. *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 1990, **9**(9): 667-671.
- [24] Macfarlane S, Furrie E, Cummings J H, *et al.* Chemotaxonomic analysis of bacterial populations colonizing the rectal mucosa in patients with ulcerative colitis[J]. *Clinical Infectious Diseases*, 2004, **38**(12): 1690-1699.
- [25] Brown W J, Waatt P E. Susceptibility testing of clinically isolated anaerobic bacteria by an agar dilution technique[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1980, **17**(4): 629-635.

- [26] Harmsen H J M, Gibson G R, Elfferich P, *et al.* Comparison of viable cell counts and fluorescence in situ hybridization using specific rRNA-based probes for the quantification of human fecal bacteria[J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, **183**(1): 125-129.
- [27] Kerry J, Hiney M, Coyne R, *et al.* Fish feed as a source of oxytetracycline-resistant bacteria in the sediments under fish farms [J]. Aquaculture, 1995, **131**(1-2): 101-113.
- [28] Huang J J, Hu H Y, Tang F, *et al.* Inactivation and reactivation of antibiotic-resistant bacteria by chlorination in secondary effluents of a municipal wastewater treatment plant[J]. Water Research, 2011, **45**(9): 2775-2781.
- [29] Pei R T, Kim S C, Carlson K H, *et al.* Effect of river landscape on the sediment concentrations of antibiotics and corresponding antibiotic resistance genes (ARG)[J]. Water Research, 2006, **40**(12): 2427-2435.
- [30] Gao P, Munir M, Xagorarakis I. Correlation of tetracycline and sulfonamide antibiotics with corresponding resistance genes and resistant bacteria in a conventional municipal wastewater treatment plant[J]. Science of the Total Environment, 2012, **421-422**: 173-183.
- [31] Macauley J J, Qiang Z M, Adams C D, *et al.* Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone[J]. Water Research, 2006, **40**(10): 2017-2026.
- [32] Brooks J P, Maxwell S L, Rensing C, *et al.* Occurrence of antibiotic-resistant bacteria and endotoxin associated with the land application of biosolids[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2007, **53**(5): 616-622.
- [33] Kim S, Park H, Chandran K. Propensity of activated sludge to amplify or attenuate tetracycline resistance genes and tetracycline resistant bacteria: a mathematical modeling approach [J]. Chemosphere, 2010, **78**(9): 1071-1077.
- [34] Baquero F, Martinez J L, Canton R. Antibiotics and antibiotic resistance in water environments [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2008, **19**(3): 260-265.
- [35] Zheng S L, Qiu X Y, Chen B, *et al.* Antibiotics pollution in Jiulong river estuary: source, distribution and bacterial resistance [J]. Chemosphere, 2011, **84**(11): 1677-1685.
- [36] Nonaka L, Ikeno K, Suzuki S. Distribution of tetracycline resistance gene, *tet* (m), in gram-positive and gram-negative bacteria isolated from sediment and seawater at a coastal aquaculture site in Japan [J]. Microbes and Environments, 2007, **22**(4): 355-364.
- [37] Taubes G. The bacteria fight back [J]. Science, 2008, **321**(5887): 356-361.
- [38] 王毅, 任显华, 张爱武. 2005~2007 年我院抗菌药物用药分析[J]. 中国医院用药评价与分析, 2009, **9**(1): 38-40.
- [39] 陈雪梅, 许东伟. 2005~2008 年我院抗菌药物应用分析[J]. 中国医院用药评价与分析, 2009, **9**(10): 743-746.
- [40] 高文学. 2006~2009 年抗菌药物应用分析[J]. 中国医院用药评价与分析, 2011, **11**(2): 148-150.
- [41] 张晔, 陆赛花, 刘秀凤. 2007~2009 年抗菌药物应用分析[J]. 中国医院用药评价与分析, 2010, **10**(12): 1084-1086.
- [42] 姜红, 吴江民, 高伟. 2007~2010 年我院抗菌药物应用分析[J]. 中国抗生素杂志, 2012, **37**(9): 716-720.
- [43] 郑利光, 牛桂田, 谢来洪. 北京地区 19 家医院 2008 年 6 月~2009 年 5 月抗菌药物利用分析[J]. 中国药房, 2010, **21**(46): 4328-4331.
- [44] 齐新玉, 王鸣. 不同季节抗生素的利用分析[J]. 农垦医学, 2003, **25**(3): 183-184.
- [45] 陈岷, 王谦, 沈宏萍. 我院抗菌药物使用季节变化规律分析[J]. 中国药业, 2012, **21**(1): 52-53.
- [46] Kim S, Jensen J N, Aga D S, *et al.* Fate of tetracycline resistant bacteria as a function of activated sludge process organic loading and growth rate[J]. Water Science and Technology, 2007, **55**(1-2): 291-297.
- [47] Novo A, Andre S, Viana P, *et al.* Antibiotic resistance, antimicrobial residues and bacterial community composition in urban wastewater[J]. Water Research, 2013, **47**(5): 1875-1887.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 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