

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查

闫幸^{1,2}, 余卫娟³, 兰亚琼², 李立², 吕升³, 叶朝霞³, 张永明¹, 刘锐^{2*}, 陈吕军^{2,4}

(1. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234; 2. 浙江省水质科学与技术重点实验室, 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006; 3. 嘉兴市环境保护监测站, 嘉兴 314000; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 建立了适合长三角地区重要生猪养殖基地嘉兴市环境水体中4类(四环素类、磺胺类、大环内酯类、喹诺酮类)共10种常用兽用抗生素同时检测的固相萃取与液相色谱质谱(LC-MS/MS)联用技术, 对该地区10个典型村镇河道断面和21个市区主要河网监控断面开展调查. 结果表明, 村镇河道中抗生素污染严重, 10种抗生素总浓度为65.6~467.0 ng·L⁻¹. 其中, 四环素类和磺胺类浓度分别为40.8~253.0 ng·L⁻¹和未检出~165.0 ng·L⁻¹; 大环内酯类和喹诺酮类浓度分别为3.1~14.68 ng·L⁻¹和未检出~14.54 ng·L⁻¹. 市区河网污染相对较轻, 10种抗生素总浓度为20.1~61.2 ng·L⁻¹, 其中四环素类浓度为未检出~44.0 ng·L⁻¹; 磺胺类、大环内酯类和喹诺酮类浓度则分别低于2.7、6.3和21.6 ng·L⁻¹.

关键词: 兽用抗生素; 四环素类; 大环内酯类; 喹诺酮类; 磺胺类; 地表水; LC-MS/MS

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3368-06

A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing

LÜ Xing^{1,2}, YU Wei-juan³, LAN Ya-qiong², LI Li², LÜ Sheng³, YE Zhao-xia³, ZHANG Yong-ming¹, LIU Rui², CHEN Lü-jun^{2,4}

(1. College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Zhejiang, Jiaxing 314006, China; 3. Jiaxing Environmental Protection Monitoring Station, Jiaxing 314000, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Liquid chromatography and tandem mass (LC-MS/MS) followed with solid-phase extraction (SPE) was developed for simultaneously determining four classes (tetracyclines, quinolones, macrolides and sulfonamides) of ten commonly used veterinary antibiotics in groundwater of Jiaxing city, an important pig breeding base in the Yangtze River Delta region. Samples were taken from 10 typical rural river sections and 21 main urban river sections. Results revealed severe pollution existed in the rural river environment. The total concentration of ten antibiotics was as high as 65.6-467.0 ng·L⁻¹, among which tetracyclines and sulfonamides respectively ranged in 40.8-253.0 ng·L⁻¹ and undetected (nd)-165.0 ng·L⁻¹, macrolides and quinolones respectively ranged in 3.1-14.68 ng·L⁻¹ and nd-14.54 ng·L⁻¹. By comparison, the pollution level in urban rivers was much lower. The total concentration of ten antibiotics ranged in 20.1 ng·L⁻¹ to 61.2 ng·L⁻¹, among with tetracyclines varied from undetected to 44.0 ng·L⁻¹, while sulfonamides, macrolides and quinolones were respectively below 2.7 ng·L⁻¹, 6.3 ng·L⁻¹ and 21.6 ng·L⁻¹.

Key words: veterinary antibiotics; tetracyclines; macrolides; quinolones; sulfonamides; groundwater; LC-MS/MS

兽用抗生素广泛用于预防和治疗动物疾病. 然而, 这些抗生素被生物体利用的较少, 85%以上通过尿液和粪便排出体外进入环境^[1,2]. 环境中抗生素的富集会造造成敏感菌抗药性的增强^[3], 并不断扩展和演化, 威胁生态系统安全和人类健康^[4~6]. 既有研究已揭示, 国内很多水域存在兽用抗生素引起的环境污染和生态安全问题^[7~12].

嘉兴市地处太湖流域最下游, 河网水质受上游工农业影响较大, 加上该市本身就是长三角地区的重要生猪养殖基地, 区域内兽用抗生素的大量使用给环境水体带来沉重负担. 本研究选取规模化养猪场饲料中常用的四大类共10种兽用抗生素, 建立了适合多组分抗生素同时分析的固相萃取(SPE)-液相色谱与串联质谱联用(LC-MS/

MS)技术, 调查分析了该市10个典型村镇河道断面和21个市区河网监控断面受10种抗生素污染的现状, 以为该市生猪养殖业外源化学品的污染防控提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

Waters e2695 型液相色谱仪配 Waters TQ

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-02-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)重大项目(2012AA06A304); 嘉兴市科技计划项目(2012AZ1013); 南湖区重点项目(SM2011AZ3002)

作者简介: 闫幸(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为集约养殖外源化学品污染监测与控制, E-mail: lvxing_2008@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com

Detector 型串联三重四级杆质谱(美国 Waters 科技有限公司);十二孔固相萃取装置(美国 Supelco 公司);HSC-12A 氮吹仪(天津恒奥科技发展有限公司);Oasis HLB 固相萃取柱(3 mL/60 mg, 美国 Waters 科技有限公司);SHZ-III 型循环水式真空泵(上海亚荣生化仪器厂);0.7 μm GF/F 玻璃纤维滤膜(美国 GE Healthcare 公司);0.22 μm 聚四氟乙烯膜 PTFE(上海安谱有限公司)。

四环素(Tetracycline, TC), 土霉素(Oxytetracycline, OTC), 金霉素(Chlortetracycline, CTC), 诺氟沙星(Norfloracin, NOR), 恩诺沙星(Enrofloxacin, ENR), 环丙沙星(Ciprofloxacin, CIP), 泰乐菌素(Tylosin, TYL), 罗红霉素(Roxithromycin, RTM) 标准品购自德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司, 磺胺甲噁唑(Sulfamethoxazole, SMX) 和磺胺二甲嘧啶(Sulfadimidine, SMD) 标准品购自中国药品生物制品检定所。甲醇、乙腈、甲酸为色谱纯; EDTA 钠盐、盐酸等试剂为分析纯; 实验用水为 Milli-Q 水。

1.2 采样点设置及样品采集

嘉兴市南湖区新丰镇和凤桥镇的生猪养殖量占全市 40% 以上。村镇河网水样采集于 2012 年 8 月底, 取自两镇养猪高度密集的 7 个村(横港村、金章村、倪家村、栖凤埭村、凤湾村、竹林村、陈良村)的 10 个河道断面(图 1)。各水样水质受养猪废水污染较为明显, TOC 浓度为 17.8 ~ 25.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,



V1. 横港村金丰桥; V2. 金章村独圩桥; V3. 金章村东木桥; V4. 倪家村中和桥; V5. 栖凤埭村金堂桥; V6. 陈良村南仁桥; V7. 凤湾村鲍家桥; V8. 竹林村赵家埭桥; V9. 竹林村沈家浜桥; V10. 竹林村竹林路口桥

图 1 典型村镇河道断面采样点

Fig. 1 Sampling sites in typical rural river sections

氨氮浓度为 1.2 ~ 8.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

市区河网水样取自当地环保局监测站的 21 个常规监测断面(图 2), 采样时间为 2012 年 9 月初。由于远离乡村, 水质受生猪养殖污染较少, 水样 TOC 浓度为 10.8 ~ 22.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮浓度为 0.07 ~ 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。



1. 红旗塘油车港出口; 2. 三店塘杨庙大桥; 3. 嘉善塘七星; 4. 平湖塘焦山门桥; 5. 新塍塘新塍出口; 6. 新塍塘洛东大桥; 7. 运河干流王江泾; 8. 贯泾港; 9. 石白漾; 10. 南门; 11. 南湖中心; 12. 嘉善塘渡船浜; 13. 平湖塘人中浜; 14. 三店塘湘家荡; 15. 海盐塘倪家汇; 16. 长水塘蚂蝗塘桥; 17. 长水塘王店百乐桥; 18. 运河干流龙凤大桥; 19. 三店塘塘汇; 20. 平湖塘长征桥; 21. 运河干流北运桥

图 2 城区主要河网监控断面

Fig. 2 Sampling sites in main urban river sections

1.3 实验方法

1.3.1 标准溶液的配制

准确称取 10 种抗生素标准品 0.010 g, 加入少量甲醇溶解, 然后转移至 100 mL 棕色容量瓶中, 用甲醇定容, 配制成 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准储备液, 再梯度稀释成不同浓度的标准溶液, 用于制作标准曲线。以上标准储备液可在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下保存一个月, 标准溶液现配现用。

1.3.2 固相萃取(SPE)

固相萃取方法在 Poole^[15] 的方法基础上进行了优化, 操作如下: 500 mL 水样采集至 1 L 棕色玻璃瓶中, 加入 0.2 g EDTA-2Na, 于 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存, 3 日内使用。水样经 0.7 μm GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后用 6 mol 稀盐酸调节 pH 至 3 左右, 用 HLB 小柱固相萃取。HLB 柱使用前先经以下三步反复活化 3 次: ① 甲醇 2 mL; ② 去离子水 2 mL; ③ pH = 3 的 HCl 水溶液 2 mL; 然后通水样 500 mL, 流速为 5

$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,对 HLB 柱抽真空干燥 30 min;再使用 2 mL 5% 甲醇水溶液淋洗,最后用 4 mL 甲醇缓慢洗脱,洗脱液收集至 10 mL 玻璃离心管,氮气吹脱至近干,用甲醇定容至 1 mL,用 PTFE 针式滤器过滤后转移至 2 mL 棕色样品瓶中待测。

1.3.3 LC-MS/MS 分析

在 Kim 等^[16]方法的基础上优化了色谱和质谱分析条件.液相色谱分析使用 Agilent eclipse XDB C18 色谱柱(4.6×150 mm, 5 μm),柱温 30℃,流速 0.3 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量 10 μL ;两相流动相 A 为 0.1% 甲酸,C 为乙腈,线性梯度淋洗条件为:2 min 内保持 10% C、90% A;2~8 min 变化至 40% C、60% A;8~24 min 变化至 90% C、10% A;24~26 min 保持 10% C、90% A,再用 10% C、90% A 重新平衡色谱柱 4 min.质谱分析采用电喷雾电离源

$$\text{加标回收率}(\%) = \frac{\text{加标样品中抗生素浓度} - \text{空白样品中抗生素浓度}}{\text{加标量}} \times 100\% \quad (1)$$

为进行质量控制,每次富集和测试水样的同时,平行测试一个阴性对照(去离子水溶液)样品和一个阳性对照样品(10 种抗生素的混标水溶液,浓度如表 1).将混合标样连续进样 10 次,计算仪器的精密度.把信噪比(S/N)为 3 时的抗生素浓度记为仪器检出限(instrument detection limit, IDL),以信噪比 10 计算仪器定量限(instrument quantity limit, IQL).分析方法的检出限(limit of detection, LOD)和定量限(limit of quantification, LOQ)以富集倍数为 500 的整个 SPE-LC-MS/MS 流程为基础计算。

2 结果与讨论

2.1 SPE-LC-MS/MS 加标回收率

在 SPE 优化过程中测定了抗生素的回收率,结果如表 1 所示.水质差别较大的不同水样之间回收

(ESI+),多反应监测(MRM)方式.毛细管电压 4 kV,离子源温度 120℃,载气温度 350℃,载气流量 550 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$.为使分析方法对 10 种抗生素都有较高的灵敏度,优化了锥孔电压和碰撞电压。

1.3.4 质量控制

由于质谱离子化受基质影响较大,为了确认基质影响所导致的分析误差,选用 TOC 浓度差异较大的金堂桥、南仁桥和独圩桥水样,进行加标回收率实验,且每种地表水都进行了 3 组平行测试.这 3 个水样 TOC 的值分别为 17.8、19.2、25.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

根据文献[17]的规定,加标量控制在水样中本底浓度的 0.5~2 倍.把添加抗生素的样品与未添加抗生素的空白样品同时执行 SPE 及 LC-MS/MS 分析,测试抗生素浓度,用式(1)计算回收率:

率差别不大.3 种地表水的加标回收率为 50%~78%,接近但略低于去离子水的加标回收率(62%~106%)。

地表水中的加标回收率普遍偏低,很可能是由于地表水中有机物的竞争吸附所致.此结果在其它文献中也有报道.谭建华等^[18]发现地表水中多种抗生素的加标回收率为 63%~103%,也低于去离子水的回收率(80%~120%).陈永山等^[19]对地表水中抗生素的加标回收率为 62%~84%,这与本实验结果相似。

2.2 标准曲线

各种抗生素在实验浓度范围内的线性相关系数(r^2)均在 0.99 以上.抗生素混合标样的仪器检出限为 0.03~3.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,仪器定量限为 0.1~11.7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.以富集倍数为 500 的 SPE-LC-MS/MS 测试

表 1 地表水加标回收率

Table 1 Recovery rates of the antibiotics in deionized water and the typical river waters

项目	目标抗生素	加标浓度 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	3 个测试平行样的回收率平均值 \pm RSD/%			
			去离子水	独圩桥	金堂桥	南仁桥
四环素类	TC	100	66.3 \pm 5.3	55.4 \pm 2.3	59.8 \pm 1.3	62.0 \pm 2.1
	OTC	100	94.8 \pm 1.2	78.1 \pm 5.3	60.6 \pm 3.9	57.2 \pm 1.9
	CTC	100	98.1 \pm 2.1	63.1 \pm 0.9	58.2 \pm 0.8	56.0 \pm 1.5
磺胺类	SMD	10	89.9 \pm 4.6	52.1 \pm 0.6	55.3 \pm 7.1	56.1 \pm 3.8
	SMX	10	62.4 \pm 3.0	50.4 \pm 1.6	51.7 \pm 1.6	52.2 \pm 4.3
喹诺酮类	ENR	100	89.4 \pm 0.8	52.9 \pm 1.5	50.7 \pm 6.2	54.1 \pm 3.2
	NOR	100	106.2 \pm 1.4	62.0 \pm 1.5	65.0 \pm 2.9	68.1 \pm 2.6
	CIP	100	78.2 \pm 1.8	55.5 \pm 1.9	56.9 \pm 2.5	57.4 \pm 1.2
大环内酯类	TYL	100	73.2 \pm 2.4	51.5 \pm 2.4	51.4 \pm 0.9	64.3 \pm 4.2
	RTM	100	98.6 \pm 3.1	59.8 \pm 0.3	67.6 \pm 1.1	59.6 \pm 3.7

技术方法检出限和定量限分别为 $0.06 \sim 7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \sim 20.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 水样 3 次平行测试的标准偏差 (RSD) 在 $0.3\% \sim 7.1\%$ 之间。

2.3 典型村镇河道断面的兽用抗生素浓度调查

10 个典型村镇河道断面的兽用抗生素浓度如表 2 所示。各水样中 10 种抗生素的总浓度变化于 $65.6 \sim 471.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。四环素类抗生素占总浓度的 60% 以上, 其中土霉素 OTC ($13.3 \sim 126.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和金霉素 CTC ($17.1 \sim 76.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 的检出量明显高于四环素 ($10.4 \sim 52.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。

磺胺类两种抗生素在 V5 以外的所有采样点均有检出。其中, 磺胺甲噁唑 SMX 检出浓度低, 为 $1.2 \sim 4.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。磺胺二甲嘧啶 SMD 检测浓度随各采

样点变化很大, 其中 V9 点的检出浓度特别高, 达到 $161.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, V5 未检出, V1 微量检出, 其余 7 个位点的检出浓度波动于 $10.7 \sim 47.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

喹诺酮类抗生素中恩诺沙星 ENR 和环丙沙星 CIP 检出频率和浓度均较低。恩诺沙星 ENR 只在 V10 有检出, 浓度为 $1.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 环丙沙星 CIP 只在 V1 和 V9 有检出, 浓度分别为 $1.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。诺氟沙星 NOR 检出频率较高, 除 V2、V4 和 V8 以外均有检出, 浓度范围为 $10.0 \sim 14.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

大环内酯类抗生素在 10 个采样点中均有检出, 其中泰乐菌素 TYL ($6.25 \sim 14.68 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 的检出浓度略高于罗红霉素 RTM ($3.1 \sim 10.24 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。

表 2 村镇河道断面的抗生素浓度¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Antibiotic concentrations in rural river sections/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点	四环素类			磺胺类		喹诺酮类			大环内酯类		总量
	CTC	OTC	TC	SMD	SMX	ENR	NOR	CIP	TYL	RTM	
V1	17.1	13.3	10.4	1.4	1.2	ND	10.2	1.6	6.2	3.9	65.6
V2	39.9	78.3	29.9	47.7	1.3	ND	ND	ND	9.1	6.4	212.8
V3	27.1	56.9	15.2	32.5	2.7	ND	12.7	ND	6.8	5.2	159.2
V4	23.2	42.2	12.0	20.1	2.8	ND	ND	ND	7.5	5.2	113.1
V5	29.3	22.4	13.4	ND	ND	ND	11.9	ND	6.9	4.6	88.5
V6	18.0	78.3	21.0	27.8	2.5	ND	10.1	ND	7.6	3.1	168.5
V7	22.7	32.1	14.9	19.8	3.2	ND	11.6	ND	6.7	4.7	115.8
V8	26.6	25.9	17.2	10.7	2.9	ND	ND	ND	7.4	4.1	95.0
V9	76.1	126	52.1	161.0	4.2	ND	13.0	8.9	14.7	9.9	467.1
V10	17.1	18.7	12.5	13.3	1.5	1.6	14.5	ND	6.9	10.2	96.4

1) “ND”表示未检出

根据 UCS^[20] 的评估, 养猪业中一般大量使用的抗生素有四环素, 大环内酯类和磺胺类等, 金霉素和土霉素是最常用的四环素类抗生素。大环内酯类抗生素中, 泰乐菌素的使用量很大。本研究结果与 UCS 的评估结果吻合。喹诺酮类抗生素主要在家禽养殖中被用来预防和治疗疾病^[21], 因此在养猪密集区的河道水中检测含量相对较低。

V9 中抗生素的检出量 (特别是四环素类和磺胺类抗生素浓度) 显著高于其它采样点, 经调查发现 V9 附近的水产养殖和畜牧养殖场都很多, 使用的抗生素较多; 此外有报道^[22,23] 表明磺胺类和土霉素 OTC 性质稳定, 亲水性强, 不易降解, 被排泄到环境中仍能稳定存在很长时间, 因此药物残余进入水环境导致该河段的抗生素浓度很高。

抗生素在极低浓度下即可诱导产生抗性基因, 引起人类和动物对其产生耐药性。杨颖^[24] 针对北江水环境的研究表明磺胺类抗生素浓度在纳克级时已经诱导产生含量较高的抗性基因。该市农村河道水中抗生素检出浓度很高, 其引起的抗性基因和生

态安全问题需要引起进一步关注。

2.4 市区主要河网监控断面兽用抗生素浓度调查

市区主要河网监控断面兽用抗生素浓度如表 3 所示。四大类抗生素在 21 个河网水样品中均有检出, 但总浓度差别不大, 在 $20 \sim 60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。其中, 29% 的点 (1, 2, 5, 6, 11, 18) 抗生素总浓度低于 $30 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 24% 的点 (3, 7, 10, 19, 21) 抗生素总浓度在 $30 \sim 50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 48% 的点 (4, 8, 9, 12 ~ 17, 20) 抗生素总浓度在 $50 \sim 62 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。

四环素类抗生素约占 39% ~ 95%, 浓度范围为未检出 ~ $44.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 磺胺类抗生素浓度很低, 浓度范围从未检出 ~ $2.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 大环内酯类浓度范围从未检出 ~ $6.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 喹诺酮类浓度范围从未检出 ~ $21.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。陆克祥等^[25] 对黄浦江水中抗生素污染的调查结果显示四环素类浓度为 $13.0 \sim 56.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 与本次研究结果没有很大差异。

乡镇养殖密集区河网断面的抗生素浓度显著高于市区主要河网监控断面, 表明乡镇养殖污染很可能是引起市区水环境中抗生素污染的重要原因。

表 3 市区主要河网监控断面抗生素浓度¹⁾/ng·L⁻¹Table 3 Antibiotic concentrations in main urban river sections/ng·L⁻¹

采样点	四环素类			磺胺类		喹诺酮类			大环内酯类		总量
	CTC	OTC	TC	SMD	SMX	ENR	NOR	CIP	TYL	RTM	
1. 油车港出口	ND	ND	ND	0.1	1.0	ND	8.0	11.8	ND	3.6	24.5
2. 杨庙大桥	ND	12.1	ND	0.1	0.8	2.4	ND	9.5	ND	3.1	28.2
3. 七星	18.5	ND	ND	0.1	0.9	ND	8.7	12.4	6.2	ND	47.1
4. 焦山门桥	21.9	13.6	ND	ND	0.8	ND	9.4	12.0	ND	3.2	61.2
5. 新塍出口	ND	12.1	10.3	0.5	0.5	ND	ND	ND	ND	ND	23.5
6. 洛东大桥	19.2	ND	ND	ND	0.9	ND	ND	ND	ND	ND	20.1
7. 王江泾	19.8	13.6	ND	0.1	1.1	ND	ND	9.6	ND	3.9	48.2
8. 贯泾港	19.0	12.3	ND	0.7	0.7	ND	7.9	12.1	ND	ND	53.0
9. 石白漾	20.5	11.9	ND	0.8	0.9	ND	7.8	10.7	ND	3.4	56.3
10. 南门	ND	11.8	10.5	0.2	0.7	ND	ND	10.5	ND	3.1	37.1
11. 南湖中心	22.2	ND	ND	0.2	0.8	2.6	ND	ND	ND	3.8	29.8
12. 渡船浜	21.2	12.5	10.2	ND	0.8	ND	8.0	ND	ND	3.8	56.7
13. 人中浜	20.0	12.1	ND	0.3	0.8	ND	8.4	12.0	ND	4.9	58.7
14. 湘家荡	21.3	ND	10.5	ND	ND	ND	7.9	13.3	ND	3.1	56.2
15. 倪家汇	20.2	12.1	ND	0.7	0.8	ND	8.0	9.8	ND	3.5	55.4
16. 蚂蝗塘桥	19.2	ND	10.6	0.8	1.8	ND	8.2	9.5	ND	3.2	53.6
17. 百乐桥	23.0	12.7	ND	0.2	0.8	ND	ND	12.3	ND	3.7	52.9
18. 龙凤大桥	18.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	9.7	ND	ND	28.4
19. 塘汇	18.6	12.4	ND	0.2	0.6	ND	ND	ND	ND	4.1	36.2
20. 长征桥	19.4	12.0	ND	0.5	0.8	ND	7.9	11.6	ND	3.5	56.1
21. 北运桥	18.8	ND	ND	0.3	0.8	ND	8.5	10.7	ND	3.3	42.5

1)“ND”表示未检出

3 结论

1)建立了适合嘉兴市地表水中 10 种常见兽用抗生素同步分析检测的 SPE-LC/MS/MS 技术,加标回收率为 50% ~ 78%,随地表水质的差别变化不大;对目标抗生素的检出限为 0.06 ~ 7 ng·L⁻¹。

2)兽用抗生素在嘉兴市区河网断面引起的污染程度与黄浦江类似,但在养猪密集区村镇河道引起的污染程度远高于城区河网断面,引发的区域生态安全问题应引起重视。

参考文献:

- [1] Halling-Sørensen B, Sengel G, Tjørnelund J. Toxicity of tetracyclines and tetracycline degradation products to environmentally relevant bacteria, including selected tetracycline-resistant bacteria[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, **42**(3): 263-271.
- [2] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染[J]. 生态毒理学报, 2007, **2**(3): 243-251.
- [3] Ben W W, Qiang Z M, Adams C, et al. Simultaneous determination of sulfonamides, tetracyclines and tiamulin in swine wastewater by solid-phase extraction and liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2008, **1202**(2): 173-180.
- [4] Esiobu N, Armenta L, Ike J. Antibiotic resistance in soil and water environments[J]. International Journal of Environmental Health Research, 2002, **12**(2): 133-144.
- [5] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall B A, et al. 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.
- [6] Richardson S D, Ternes T A. Water analysis: emerging contaminants and current issues[J]. Analytical Chemistry, 2011, **83**(12): 4614-4648.
- [7] 叶计鹏, 邹世春, 张干, 等. 典型抗生素类药物在珠江三角洲水体中的污染特征[J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 384-388.
- [8] 刘玉春, 徐维海, 余莉莉, 等. 固相萃取液相色谱-质谱/质谱联用测定河水中大环内酯类抗生素[J]. 分析测试学报, 2006, **25**(2): 1-5.
- [9] 徐维海, 张干, 邹世春, 等. 香港维多利亚港和珠江广州河段水体中抗生素的含量特征及其季节变化[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2459-2462.
- [10] Tong L, Li P, Wang Y X, et al. Analysis of veterinary antibiotic residues in swine wastewater and environmental water samples using optimized SPE-LC/MS/MS[J]. Chemosphere, 2009, **74**(8): 1090-1097.
- [11] 刘玉春. 水中典型抗生素测定及其在珠江广州河段的污染现状研究[D]. 广州. 中山大学, 2006. 3-7.
- [12] 徐维海. 典型抗生素类药物在珠江三角洲水环境中的分布、行为与归宿[D]. 广州. 中国科学院研究生院, 2007. 2-3.
- [13] 贾伟伟. 畜禽废水中多种抗生素的同步检测方法 & 深度处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2009.

- 14-15.
- [14] Karthikeyan K G, Meyer M T. Occurrence of antibiotics in wastewater treatment facilities in Wisconsin, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **361**(1-3): 196-207.
- [15] Poole C F. New trends in solid-phase extraction[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, **22**(6): 362-373.
- [16] Kim S, Reichhorn P, James J N, *et al.* Removal of antibiotics in wastewater: Effect of hydraulic and solid retention times on the fate of tetracycline in the activated sludge process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(15): 5816-5823.
- [17] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 49-70.
- [18] 谭建华, 唐才明, 余以义, 等. 高效液相色谱法同时分析城市河水中的多种抗生素[J]. *色谱*, 2007, **25**(4): 546-549.
- [19] 陈永山, 章海波, 骆永明, 等. 典型规模化养猪场废水中兽用抗生素污染特征与去除效率研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2205-2212.
- [20] Mellon M C. UCS (Union of Concerned Scientist). Hogging it: Estimates of antimicrobial abuse in livestock[EB/OL]. http://www.ucsusa.org/food_and_agriculture/science_and_impacts/impacts_industrial_agriculture/hogging-it-estimates-of.html: 2004-07-04/2009-12-10.
- [21] Huang C H, Renew J E, Smeby K L, *et al.* Assessment of potential antibiotic contaminants in water and preliminary occurrence analysis[J]. *Water Research*, 2001, **120**(5): 30-40.
- [22] De Liguoro M, Cibin V, Capolongo F, *et al.* Use of oxytetracycline and tylosin in intensive calf farming: evaluation of transfer to manure and soil[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(1): 203-212.
- [23] Zuccato E, Bagnati R, Fioretti F, *et al.* Environmental loads and detection of pharmaceuticals in Italy [A]. In: Kummerer K (Ed.). *Pharmaceuticals in the Environment: Sources, Fate, Effects and Risks*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [24] 杨颖. 北江水环境中抗生素抗性基因污染分析[D]. 广州: 中山大学, 2010. 40-43.
- [25] 陆克祥, 隋铭皓, 高乃云. 固相萃取-超高压液相色谱-串联质谱测定水中 19 种抗生素[J]. *分析测试学报*, 2010, **29**(12): 1209-1214.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-mei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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