

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

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

2008 ~2010年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O₃ 生成潜势 曹函玉,潘月鹏,王辉,谭吉华,王跃思(2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,周敏,王红丽,周振,乔利平,黄成,李梅,李莉,王倩,黄海英,邹兰军(2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析 张林静,张秀英,江洪,张清新(2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征 刘鲁宁,申雨璇,辛金元,吉东生,王跃思(2089)
笼养鸡生长过程 NH₃、N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的排放 周忠凯,朱志平,董红敏,陈永杏,尚斌(2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能 王晓晖,卜龙利,刘海楠,张浩,孙剑宇,杨力,蔡力栋(2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究 张定丰,房俊逸,叶杰旭,邱松凯,钱东升,戴启洲,陈东之(2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 金圣,黄立维,李国平(2121)
模拟大气 CO₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 赵旭辉,汤龙升,史小丽,杨州,孔繁翔(2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 华祖林,汪靛(2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 李燕,李兆富,席庆(2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究 吴喜军,李怀恩,李家科,李强坤,董雯(2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 陈玲,刘德富,宋林旭,崔玉洁,张革(2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 李鸿妹,石晓勇,陈鹏,张传松(2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 张永生,郑丙辉,王坤,姜霞,郑浩(2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 冯伟莹,张生,焦立新,王圣瑞,李畅游,崔凤丽,付绪金,甄志磊(2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 侯金枝,魏权,高丽,孙卫明(2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 李大鹏,王晶,黄勇(2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 李昆,赵高峰,周怀东,刘晓茹,余丽琴,文武,张盼伟(2198)
UV 和 H₂O₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 张一清,周玲玲,张吉(2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 于丽,张培龙,侯甲才,庞立飞,李越,贾寿华(2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 毛雯,孙荣国,王定勇,马明,张成(2218)
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 王斌楠,刘国强,孔德洋,陆隽鹤(2225)
金属离子对 δ-MnO₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究 李非里,牟华倩(2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 刘建明,李红,熊振湖(2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 闫梦玥,庞志华,李小明,赵建宇,罗隽(2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 于红蕾,霍守亮,杨周生,席北斗,谷逢宇,张靖天(2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb²⁺、Cd²⁺ 吸附性能研究 吴宁梅,李正魁(2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色 魏红,李克斌,李娟,陈经涛,张涛(2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 张磊,刘平,马锦,张静,张明,吴根(2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 郭庆稳,张敏,王炜,杨治中,吴东雷(2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 李永峰,王艺璇,程国玲,刘春妍(2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 陈志强,邓毅,黄龙,温沁雪,郭子瑞(2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 刘文如,沈耀良,丁玲玲,丁敏(2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 杨敏,卢龙,冯涌,方超,李雄清(2309)
体积分数传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 李志华,范长青,王晓昌(2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价 汪浩,冯承莲,郭广慧,张瑞卿,刘跃丹,吴丰昌(2319)
麦穗鱼物种敏感性评价 王晓南,刘征涛,闫振广,张聪,何丽,孟双双(2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 雷炳莉,文育,王艺陪,康佳,刘倩(2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 钱建平,张力,李成超,黄栋(2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cl⁻ 和 Hg²⁺ 的响应 王飞祥,袁玲,黄建国(2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 宋新章,卜涛,张水奎,江洪,王志坤,赵明水,刘永军(2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 刘玲,方炎明,王顺昌,谢影,杨聃聃(2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 于皓,陈川,张莉,王爱杰(2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法 陈晓娟,吴小红,刘守龙,袁红朝,李苗苗,朱捍华,葛体达,童成立,吴金水(2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 陈建刚,曹雪(2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 刘意章,肖唐付,宁增平,贾彦龙,黎华军,杨菲,姜涛,孙旻(2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 陈志凡,赵焯,郭廷忠,王永锋,田青(2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 李晓燕(2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 王登阁,崔兆杰,傅晓文,殷永泉,许宏宇(2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 段雷,马萧萧,余德祥,谭炳全(2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 孙明明,滕应,骆永明,李振高,贾仲君,张满云(2428)
胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响 杨榕,李博文,刘微(2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 吴小莲,向垒,莫测辉,姜元能,严青云,李彦文,黄献培,苏青云,王纪阳(2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 张旭,席北斗,赵越,魏自民,李洋,赵昕宇(2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 王昭,李振山,冯亚斌,焦安英,薛安(2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 官贞珍,陈德珍,Thomas Astrup(2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 朱芬芬,高冈昌辉,大下和傲,姜惠民,北岛义典(2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能 李坤权,李焯,郑正,张雨轩(2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 姜志翔,郑浩,李锋民,王震宇(2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究 白桦,曾思育,董欣,陈吉宁(2493)
《环境科学》征订启事(2115) 《环境科学》征稿简则(2224) 信息(2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知(2478)

长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征

吴小莲¹, 向垒¹, 莫测辉^{1*}, 姜元能¹, 严青云¹, 李彦文¹, 黄献培¹, 苏青云², 王纪阳²

(1. 暨南大学环境工程系, 广东省高校水土环境毒性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632; 2. 东莞市农产品质量安全监督检测所, 东莞 523086)

摘要: 利用高效液相色谱-串联质谱(HPLC-MS/MS)技术, 分析了珠三角地区某长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中16种典型抗生素的含量, 并初步评价其健康风险。结果表明, 绝大部分抗生素不同程度被检出, 检出率为11%~100%, 大多数含量 $< 5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重), 最高为 $23.88 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.91 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以恩诺沙星、环丙沙星、磺胺二甲嘧啶和磺胺嘧啶为主。各蔬菜样品中至少检出1种抗生素, 最长达10种。蔬菜不同器官中喹诺酮类抗生素含量为地下部 $>$ 地上部。人体通过食用研究区蔬菜摄入抗生素的量低于日允许摄入量(ADI), 表明其健康风险较小, 但多种抗生素的联合毒性及其耐药性问题不容忽视。

关键词: 蔬菜; 抗生素; 检出率; 健康风险; 食品安全

中图分类号: X835 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2442-06

Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm

WU Xiao-lian¹, XIANG Lei¹, MO Ce-hui¹, JIANG Yuan-neng¹, YAN Qing-yun¹, LI Yan-wen¹, HUANG Xian-pei¹, SU Qing-yun², WANG Ji-yang²

(1. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutions, Department of Environment Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Dongguan Institute of Supervision and Testing for Agricultural Product Quality Safety, Dongguan 523086, China)

Abstract: Sixteen typical antibiotics including four tetracyclines, four quinolones, and eight sulfonamides in vegetables from manure-amended farm were determined using the ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and their health risks to human via the diet pathway was assessed. Most antibiotics were frequently detected in vegetable samples, with the detection rate from 11% to 90%. Concentrations of a single compound were mainly less than $5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (D. W.), with the maximum of $23.88 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and the average of $0.91 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Norfloxacin, ciprofloxacin, sulfamethoxazole and sulfadiazine were the dominant compounds. At least one antibiotic was detected in a single vegetable samples, and even up to ten antibiotics. The concentration of quinolones in underground parts was higher than those in aboveground parts. Intake dose of antibiotics via the consumption of the detected vegetables was lower than ADI, suggesting a lower health risk. But combination toxicity and resistance of antibiotics should not be ignored.

Key words: vegetables; antibiotics; detection rate; health risk; food safety

抗生素被广泛应用于动物养殖业中以防病治病、提高饲料利用率和促进动物生长^[1]。抗生素使用后通常大部分(80%左右)以原形或代谢产物随粪尿排出而不断进入环境^[2], 在各种水体(地表水、海水、地下水、自来水等)中普遍被检出^[3,4], 并通过农业灌溉造成土壤污染。特别是富含抗生素的畜禽粪便广泛作为有机肥用于农业生产, 造成土壤抗生素污染^[5,6], 可被蔬菜等作物吸收累积^[7,8], 通过食物链影响人体健康。动物性食品中抗生素的污染问题已受到人们的广泛关注, 并制订了有关标准。但目前对于蔬菜等植物性食品中抗生素污染问题还鲜见研究报道^[9,10]。为此, 本研究探讨了施用粪肥种植的蔬菜中16种典型抗生素的污染特征, 以为评估蔬菜质量和人体健康风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

Agilent 1100 型高效液相色谱仪, API4000 型电喷雾(ESI)离子源串联质谱仪; LL3000 型冷冻干燥仪; SHZ-82 恒温振荡器; KQ-250E 超声波清洗器; HC-3018R 高速冷冻离心机; 旋转蒸发器; 氮气浓缩装置; VisiprepTM-DL 型固相萃取装置(Supelco); Oasis HLB 固相萃取柱(3 mL/60 mg, Supelco)。

收稿日期: 2012-09-03; 修订日期: 2012-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071211, 41173101); 广东省自然科学基金重点项目(2011020003196); 广东省科技计划项目(2010B020311006); 广州市科技计划项目(2010A82070466); 东莞市科技计划项目(201210815000399); 惠州市科技计划项目(2009B010001009)

作者简介: 吴小莲(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染与农产品安全, E-mail: 221gte@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tchmo@jnu.edu.cn

16 种典型抗生素包括 4 种喹诺酮类 (QNs), 即诺氟沙星 (NOR)、环丙沙星 (CIP)、洛美沙星 (LOM) 和恩诺沙星 (ENR), 4 种四环素类 (TCs), 即土霉素 (OTC)、四环素 (TC)、金霉素 (CTC)、强力霉素 (DC), 8 种磺胺类 (SAs), 磺胺嘧啶 (SD)、磺胺吡啶 (SPD)、磺胺二甲基嘧啶 (SM2)、磺胺噻唑 (ST)、磺胺甲基嘧啶 (SM1)、磺胺-5-甲氧嘧啶 (SMT)、磺胺甲恶唑 (SMZ)、磺胺间二甲氧嘧啶 (SDM)。四环素类抗生素标准品产自中国药检所, 纯度大于 96.0%, 其它 3 类抗生素标准品均产自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司, 纯度 >98%。甲醇、乙腈均为色谱纯 (Sigma 公司), 其它化学试剂均为分析纯, 实验用水为高纯水。

标准品母液的配制: 准确称取 0.0100 g 标准品溶于少量甲酸溶液, 用乙腈 (0.1% 甲酸)-水 (0.1% 甲酸) (10/90, 体积比) 稀释定容至 100 mL, 配制浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的标准品储备液, 在 4℃ 下避光保存。实验中各种浓度的标准品工作液均用乙腈 (0.1% 甲酸)-水 (0.1% 甲酸) (10/90, 体积比) 稀释得到。

柠檬酸- MgCl_2 缓冲液配制: 称取柠檬酸 10.5 g, MgCl_2 10.2 g, 溶于适量的水溶液, 用 $\text{NH}_4\cdot\text{OH}$ 调节 pH 值为 5.0, 最后定容到 500 mL。

1.2 样品采集

蔬菜样品采自珠三角地区某现代农业生态园内“无公害蔬菜”生产基地, 属于亚热带气候条件, 年均气温 21.9℃, 年降雨量 1682.8 mm。生产基地由企业 (连片 100 亩以上) 或各农户 (10 亩/户左右) 进行经营, 严格按照无公害生产标准进行生产, 以北江清洁水源作为灌溉水, 施用畜禽粪便 (鸡粪、牛粪等) 作为有机肥 (每亩 250 kg), 同时施用一定量化肥。根据生产方式、蔬菜品种和环境条件等因素, 按环境监测要求采集了大白菜 (早黄白白菜、秋冬白菜、春水白菜)、花菜 (澄海早花)、西兰花 (格福西兰花)、菜心 (油绿粗苔菜心)、油麦菜 (精选油麦菜)、生菜 (散叶生菜)、萝卜 (白沙迟花晚萝卜)、芋头 (红芽芋)、韭菜 (西浦韭)、葱 (广东葱) 共 9 份蔬菜样品。样品采集后先用自来水轻洗表面灰尘, 再用蒸馏水清洗 2 次, 冷冻干燥后用研磨机磨碎备测。

1.3 样品预处理

蔬菜样品预处理方法参考文献 [9~12] 进行优化。准确称取 1.00 g 蔬菜样品置于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 提取液, 振荡 5 min 后再超声提取 15

min, 然后在 10℃ 下离心 ($12\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 15 min, 收集上清液。残渣用上述方法反复提取 2 次, 合并上清液, 于旋转蒸发仪上减压蒸发, 然后过 HLB 固相萃取小柱 (先后用 6 mL 甲醇、6 mL 水过柱活化) 净化富集。用 3 mL 高纯水清洗小柱, 真空干燥 10 min, 再用 3 mL 洗脱液洗脱小柱。洗脱液在 40℃ 水浴下用氮气吹至近干, 用乙腈 (0.1% 甲酸)-水 (0.1% 甲酸) (10/90, 体积比) 定容至 1 mL, 溶液过 0.22 μm 膜待测。

喹诺酮类抗生素提取液为盐酸: 乙腈 = 0.8: 100 (体积比), 磺胺类抗生素提取液为乙腈 (添加 2 g 无水硫酸钠、0.1 g 柠檬酸、0.1 g 乙二胺四乙酸二钠), 四环素类提取液为柠檬酸- MgCl_2 缓冲液: 乙腈 = 1: 2 (体积比)。喹诺酮类、磺胺类和四环素类的洗脱液分别为乙酸: 乙腈 = 1: 100 (体积比)、甲醇、甲醇。

1.4 HPLC-MS/MS 分析

1.4.1 色谱条件

高效液相色谱-串联质谱 (HPLC-MS/MS) 分析条件参考文献 [12~14] 进行优化。色谱柱: Ailent Eclipse Plus C18 (5 μm , 2.1 mm \times 150 mm); 柱温: 20℃; 柱平衡时间 30 min; 流动相: 水-乙腈 (90/10 体积比; 含 0.1% 甲酸) 等度洗脱, 流速: $0.2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 进样量: 5 μL 。

1.4.2 质谱条件

离子源: 电喷雾离子源; 扫描方式: 正离子扫描; 检测方式: 多反应检测 (MRM); 质谱分辨率: 半峰高 0.7; 雾化气: 60 psi; 干燥气: 50 psi; 气帘气: 20 psi; 离子源电压: 5 500 V; 去溶剂温度: 600℃; 碰撞气压水平: HIGH。其它质谱分析参数见表 1。

1.4.3 质量控制与质量保证

不同加标浓度下 16 种典型抗生素的回收率均在 60% 以上, 相对标准偏差 (RSD, $n=3$) 几乎都 < 10% (表 2)。以喹诺酮类、磺胺类和四环素类抗生素混合标准品工作液系列浓度 (分别为 1~500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.1~80 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.2~200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 建立各化合物标准曲线的线性回归方程, 按 10 倍信噪比计算样品定量限。16 种抗生素的线性关系均良好, R^2 大于 0.995。喹诺酮类、磺胺类和四环素类抗生素的定量限分别为 0.065~0.31 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.11~0.22 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.10~0.20 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。为控制实验过程中人为污染, 保证操作过程准确可靠, 实验中还设置空白样、样品平行样, 空白样中未检出抗生素, 平行样相对标准偏差均 < 5%。

表 1 16 种抗生素的色谱质谱参数

Table 1 HPLC-MS/MS parameters for sixteen typical antibiotics

化合物	保留时间/min	母离子(<i>m/z</i>)	子离子(<i>m/z</i>)	碰撞能/eV	去簇电压/V
磺胺嘧啶(SD)	3.37	251.2	156.2, 108.2	23, 36	60
磺胺吡啶(SPD)	3.92	250.2	156.2, 184.2	24, 27	68
磺胺噻唑(ST)	3.91	256.2	156.2, 108.2	22, 34	55
磺胺甲基嘧啶(SM1)	4.51	265.2	156.2, 172.2	24, 24	60
磺胺二甲基嘧啶(SM2)	5.72	279.2	186.2, 156.2	25, 27	65
磺胺-5-甲氧基嘧啶(SMT)	7.32	281.2	156.2, 108.2	25, 40	65
磺胺甲噁唑(SMZ)	10.76	254.2	156.2, 108.2	23, 37	62
磺胺二甲氧嘧啶(SDM)	13.74	311.2	156.2, 218.2	30, 27	75
诺氟沙星(NOR)	6.35	320.2	302.3, 233.3	31, 36	70
环丙沙星(CIP)	6.77	332.2	288.3, 245.3	27, 36	20
洛美沙星(LOM)	7.20	352.2	265.3, 308.3	35, 25	60
恩诺沙星(ENR)	7.89	360.3	316.4, 245.4	29, 39	50
土霉素(OTC)	5.79	461.2	426.2, 443.2	27, 18	90
四环素(TC)	7.01	445.2	410.2, 427.4	27, 22	54
金霉素(CT)	10.37	479.2	444.2, 462.2	29, 24	90
强力霉素(DC)	11.44	445.2	428.2, 154.2	27, 40	75

表 2 蔬菜中 16 种抗生素的加标回收率及相对标准偏差(RSD)(*n* = 3)/%Table 2 Recovery and relative standard deviation (RSD) of sixteen antibiotics in vegetables(*n* = 3)/%

类型	抗生素	50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		100 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		回收率	RSD	回收率	RSD
磺胺类(SAs)	SD	70.0	6.7	73.5	6.7
	SPD	62.0	10.3	73.6	7.3
	ST	62.4	12.1	67.5	3.7
	SM1	63.2	10.3	88.0	2.3
	SM2	67.9	10.8	71.5	4.3
	SMT	84.6	7.2	91.0	4.7
	SMZ	74.0	5.6	67.9	4.4
	SDM	80.1	14.0	70.1	2.4
喹诺酮类(QNs)	NOR	74.0	2.3	72.5	2.7
	CIP	86.9	2.6	90.1	4.9
	LOM	80.3	1.5	78.9	1.5
	ENR	63.7	3.1	64.4	4.2
四环素类(TCs)	OTC	68.0	10.8	87.5	10.4
	TC	69.8	7.2	78.2	10.6
	CTC	93.8	4.6	65.6	5.8
	DC	93.4	10.1	63.5	0.3

2 结果与分析

2.1 蔬菜中抗生素的含量特征

除了金霉素、土霉素、强力霉素和磺胺-5-甲氧基嘧啶未检出以外,其余 12 种抗生素在蔬菜中均不同程度被检出,检出率为 11% ~ 100% (表 3),其中四环素类抗生素的检出率相对较低(< 11%),喹诺酮类抗生素的检出率相对较高(40% ~ 100%)。各蔬菜样品均至少检出 1 种抗生素,其中 70% 的样品检出 2 种以上抗生素,10% 的样品检出 10 种抗生素。单个化合物最高(干重)为

25.64 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均(干重)为 0.91 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,以恩诺沙星和磺胺嘧啶为主。就各类抗生素而言,磺胺类单个化合物除了磺胺嘧啶含量为 23.88 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以外,其余含量均 < 3.29 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总含量在 0 ~ 28.52 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均总含量为 5.07 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;喹诺酮类单个化合物的含量均 < 10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总含量在 0.81 ~ 20.14 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均总含量为 6.94 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;四环素类仅检出四环素 1 种化合物,含量为 0.20 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。喹诺酮类总含量主要分布在 1 ~ 10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,而磺胺类总含量分布范围较分散(图 1)。

表3 蔬菜中16种抗生素的含量特征¹⁾(干重)/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 3 Contents of sixteen antibiotics in vegetables(D. W.)/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

类型	抗生素	最大值	最小值	均值	检出率/%
磺胺类(SAs)	磺胺嘧啶(SD)	23.88	—	3.95	43
	磺胺吡啶(SPD)	0.18	—	0.04	14
	磺胺噻唑(ST)	3.29	—	0.61	29
	磺胺甲基嘧啶(SM1)	0.28	—	0.08	29
	磺胺二甲基嘧啶(SM2)	0.38	—	0.14	57
	磺胺-5-甲氧基嘧啶(SMT)	—	—	0	0
	磺胺甲恶唑(SMZ)	1.32	—	0.35	29
	磺胺二甲氧嘧啶(SDM)	1.85	—	0.03	14
喹诺酮类(QNs)	诺氟沙星(NOR)	7.96	—	2.84	40
	环丙沙星(CIP)	3.38	—	0.49	50
	洛美沙星(LOM)	3.59	—	0.57	70
	恩诺沙星(ENR)	5.21	1.21	2.14	100
四环素类(TCs)	土霉素(OTC)	—	—	0	0
	四环素(TC)	0.2	—	0.02	11
	金霉素(CT)	—	—	0	0
	强力霉素(DC)	—	—	0	0

1) “—”表示低于定量限,按0计算

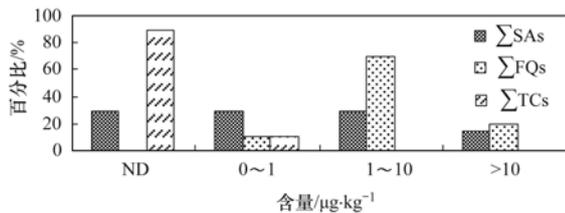


图1 蔬菜中各类抗生素的含量分布特征
Fig. 1 Concentration distribution of three types of antibiotics in vegetables

与北方某有机蔬菜基地蔬菜相比^[8],本研究蔬菜中喹诺酮类抗生素的检出率和含量较高,前者环丙沙星未检出;四环素类抗生素检出率和含量较低,前者四环素和金霉素的检出率100%,最高含量达 $523 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;磺胺类抗生素的检出率和含量与北方有机蔬菜相当($0 \sim 3.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间).与东莞市蔬菜基地蔬菜相比,本研究蔬菜中喹诺酮类(除恩诺沙星外)和四环素类抗生素检出率和含量均低于前者,其喹诺酮类检出率为61%~88%,含量为 $2.63 \sim 19.85 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[12],四环素类含量为 $0 \sim 9.41 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[13];磺胺类抗生素的检出率高于前者,但含量低于前者($0 \sim 31.87 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14].与广州市超市蔬菜中相比,本研究蔬菜中喹诺酮类抗生素的检出率和含量远低于前者^[9].

本研究蔬菜中抗生素的检出率和含量与土壤中相比均较低,但其相关性不明显.比如,土壤4种四环素类抗生素普遍检出,但蔬菜中只个别样品检出1个化合物(四环素);土壤中喹诺酮类以环丙沙星

为主,而蔬菜中以恩诺沙星和诺氟沙星为主;土壤中磺胺类检出磺胺-5-甲氧基嘧啶,而蔬菜中磺胺-5-甲氧基嘧啶均未检出.蔬菜中抗生素的含量特征与蔬菜品种、化合物性质与污染特征、土壤理化性质、环境条件等因素有关^[15].

2.2 不同蔬菜中抗生素的含量差异

不同蔬菜中抗生素的污染特征有明显差异(图2).各蔬菜中16种抗生素总含量高低依次为大白菜>菜心>花菜>生菜>韭菜>葱>菜心>芋头>油麦菜,其中含量最高的大白菜平均总含量为 $48.99 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低的油麦菜平均总含量为 $1.21 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.大白菜和花菜同时检出磺胺类和喹诺酮类抗生素,生菜同时检出喹诺酮类和四环素类抗生素,其他蔬菜只检出喹诺酮类抗生素.就单个化合物而言,不同蔬菜中其含量特征也明显不同,如恩诺沙星的含量高低顺序为萝卜>大白菜>葱>菜心>生菜>芋头>花菜>油麦菜>韭菜,环丙沙星的含

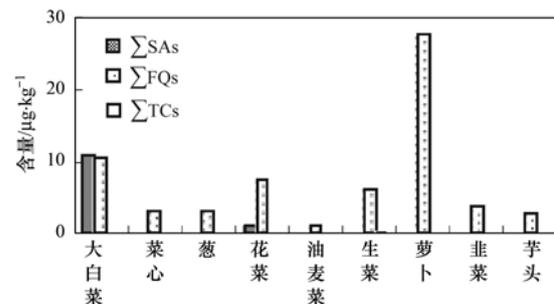
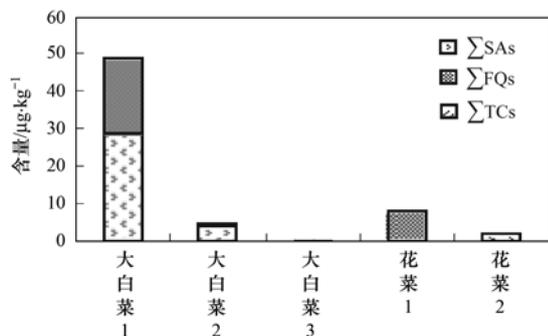


图2 不同蔬菜中各类抗生素的含量
Fig. 2 Concentrations of antibiotics in various vegetables

量高低顺序为生菜 > 萝卜 > 韭菜 > 大白菜 > 芋头, 在花菜、油麦菜、菜心和葱中均未检出. 不同采样点同种蔬菜中抗生素的污染特征差异明显(图 3). 对于大白菜, 采样点 1 其磺胺类和喹诺酮类抗生素含量均最高; 对于花菜, 采样点 1 仅检出喹诺酮类, 采样点 2 仅检出磺胺类.



1、2、3 分别代表 3 个不同采样点

图 3 不同采样点同种蔬菜中各类抗生素的含量

Fig. 3 Concentrations of antibiotics in vegetables from various sites

不同植物对污染物的吸收累积差异与其根系吸收和体内运输分配等因素有关, 同一植物不同品种之间的差异通常是体内分配差异起重要作用, 植物的根系分泌物等生理生化差异和污染物的辛醇-水分配系数差异均可能导致植物体内抗生素含量不同^[16~18]. Haller 等^[6]研究表明, 玉米、包菜和洋葱中未检出泰乐菌素, 但检出金霉素且含量差异显著. 本课题组研究发现, 不同品种菜心对四环素类抗生素的吸收累积有显著差异, 油绿粗苔菜心、70 天油青菜心为低吸收累积品种, 50 天油青甜菜心、666 柳叶菜心为高吸收累积品种^[13].

2.3 蔬菜不同部位中喹诺酮类抗生素的含量特征

对蔬菜不同部位中喹诺酮类抗生素的含量进行了分析, 同种蔬菜不同部位中喹诺酮类抗生素含量有明显差异. 地上部和地下部相比(图 4), 除了葱以外, 蔬菜中总含量地下部(3.12 ~ 20.47 μg·kg⁻¹) > 地上部(< 2 μg·kg⁻¹). 不同器官相比, 萝卜肉 > 萝卜叶 > 萝卜皮, 花菜 > 花菜叶, 芋头 > 芋头叶, 也即其可食部分中含量较高.

抗生素通常水溶性较强, 进入根系后随着植物木质部的蒸腾流作用进入植物各个组织器官. 不同植物、不同器官对不同污染物的吸收、转运和累积能力不同. 某些植物对污染物的吸收能力很强, 但其转运能力却很弱, 导致其根部和叶部含量分配的差异, 且植物类型和生长阶段均会影响抗生素在植物组织中的分配^[19~21]. Migliore 等^[22, 23]研究发现,

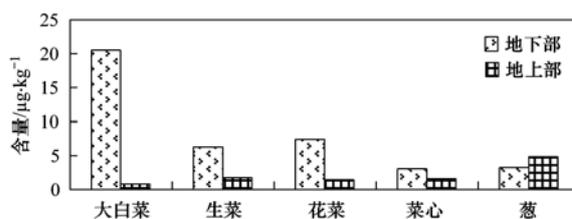


图 4 蔬菜不同组织中喹诺酮类抗生素含量分布特征

Fig. 4 Distribution of \sum QNs in different kinds of plant organs

大麦、玉米、豌豆和黍的根系对磺胺间二甲氧嘧啶的富集速率和含量均大于地上部. 但也有研究表明, 植物地上部抗生素含量大于地下部^[8], 运输分配差异可能是导致含量差异的重要原因. 抗生素的特殊结构对其吸收累积能力也有影响, 如四环素结构中酸性基团使其容易渗透到植物的特定组织器官^[24]. Dolliver^[7]等认为, 通过皮层扩散导致磺胺类抗生素累积在马铃薯块根中, 且从皮层到中心部位浓度降低. Boxall 等^[25]研究也发现, 胡萝卜皮中四环素类、磺胺类等抗生素的含量高于核部. 但 Bobovnikova 等^[26]研究发现, 胡萝卜和西红柿皮层中多氯联苯的含量低于核部.

2.4 蔬菜中抗生素的健康风险评价

依照我国《动物性食品中兽药最高残留限量》规定, 喹诺酮类、磺胺类和四环素类抗生素在肉类中最高残留量为 100 μg·kg⁻¹, 世界卫生组织规定其日允许摄入量 (ADI) 分别为 2、50 和 30 μg·(kg·d)⁻¹^[27], 结合我国居民日常膳食习惯, 即卫生部的建议^[28]: 每人每天食用肉类 100 g, 蔬菜 500 g (叶菜类、瓜果类和根茎类蔬菜分别占 50%、30% 和 20%), 对研究区蔬菜中抗生素的健康风险进行初步评价. 结果表明, 人体每天食用蔬菜(按蔬菜含水率换算为新鲜蔬菜中抗生素含量)而摄入抗生素的量, 低于通过食用肉类(按最高残留限量计算)而摄入抗生素的量, 且通过肉类和蔬菜摄入的抗生素总量, 也低于人体日允许摄入量(按体重 60 kg 计). 由此可见, 研究区蔬菜中抗生素对人体的健康风险较小, 但多种抗生素的联合毒性特别是其耐药性问题不容忽视, 尤其是对儿童和孕妇等敏感群体的健康问题更值得关注. 而且, 人体每天通过饮水也可能增加体内摄入抗生素的量^[29].

3 结论

研究区长期施用粪肥种植的蔬菜中普遍检出喹诺酮类和磺胺类抗生素, 大多数含量 < 5 μg·kg⁻¹ (干重), 以恩诺沙星、环丙沙星、磺胺二甲氧嘧啶

和磺胺嘧啶为主,在不同蔬菜及其不同器官中含量分布有明显差异。人体食用研究区蔬菜摄入抗生素的量低于人体日允许摄入量。

参考文献:

- [1] Kools S A E, Moltmann J F, Knacker T. Estimating the use of veterinary medicines in the European union [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2008, **50**(1): 59-65.
- [2] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lanzky P F, *et al.* Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment-a review [J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(2): 357-393.
- [3] 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): 2458-2462.
- [4] Watkinson A J, Murby E J, Kolpin D W, *et al.* The occurrence of antibiotics in an urban watershed: From wastewater to drinking water [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 2711-2723.
- [5] Zhao L, Dong Y H, Wang H. Residues of veterinary antibiotics in manures from feedlot livestock in eight provinces of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(5): 1069-1075.
- [6] Haller M Y, Müller S R, McArdell C S, *et al.* Quantification of veterinary antibiotics (Sulfonamides and Trimethoprim) in animal manure by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, **952**(1-2): 111-120.
- [7] Dolliver H, Kumar K, Gupta S. Sulfamethazine uptake by plants from manure-amended soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(4): 1224-1230.
- [8] Hu X G, Zhou Q X, Luo Y. Occurrence and source analysis of typical veterinary antibiotics in manure, soil, vegetables and groundwater from organic vegetable bases, northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(9): 2992-2998.
- [9] 吴小莲, 莫测辉, 李彦文, 等. 蔬菜中喹诺酮类抗生素污染探查与风险评估: 以广州市超市蔬菜为例 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 168-174.
- [10] 包艳萍, 李彦文, 莫测辉, 等. 固相萃取-高效液相色谱法分析蔬菜中 6 种磺胺类抗生素 [J]. *环境化学*, 2010, **29**(3): 513-518.
- [11] 姚圆, 莫测辉, 李彦文, 等. 固相萃取-高效液相色谱法分析蔬菜中四环素类抗生素 [J]. *环境化学*, 2010, **29**(3): 536-541.
- [12] 吴小莲. 珠三角区域蔬菜中喹诺酮类抗生素污染特征与健康风险 [D]. 广州: 暨南大学, 2011. 30-35.
- [13] 姚圆. 蔬菜中四环素类抗生素的植物毒性及含量特征研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2010. 28-36.
- [14] 包艳萍. 珠三角蔬菜中磺胺类抗生素污染特征研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2010. 49-56.
- [15] Mo C H, Cai Q Y, Tang S R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in vegetables from nine farms of the pearl river delta, South China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **56**(2): 181-189.
- [16] 吴启堂, 陈同斌. 地表生态系统污染物质迁移转化及模拟软件 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 25-47.
- [17] 蔡全英, 莫测辉, 曾巧云, 等. 邻苯二甲酸酯在不同品种通菜-土壤系统中的累积效应研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(8): 1455-1458.
- [18] 曾巧云, 莫测辉, 蔡全英, 等. 邻苯二甲酸二丁酯在不同品种菜心-土壤系统的累积效应研究 [J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(3): 333-336.
- [19] Liu W T, Zhou Q X, An J, *et al.* Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 737-743.
- [20] Liu W T, Zhou Q X, Zhang Y L, *et al.* Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(3): 781-788.
- [21] Liu W T, Zhou Q X, Sun Y B, *et al.* Identification of Chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(6): 1961-1967.
- [22] Migliore L, Civitareale C, Cozzolino S, *et al.* Laboratory models to evaluate phytotoxicity of sulphadimethoxine on terrestrial plants [J]. *Chemosphere*, 1998, **37**(14-15): 2957-2961.
- [23] Migliore L, Brambilla G, Casoria P, *et al.* Effect of sulphadimethoxine contamination on barley (*Hordeum distidum* L., Poaceae, Liliopsida) [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1996, **60**(1-2): 121-128.
- [24] Maia P P, Silva E C, Rath S, *et al.* Residue content of oxytetracycline applied on tomatoes grown in open field and greenhouse [J]. *Food Control*, 2009, **20**(1): 11-16.
- [25] Boxall A B A, Johnson P, Sinclair C J, *et al.* Uptake of veterinary medicines from soils into plants [J]. *Journal Agricultural and Food Chemistry*, 2006, **54**(6): 2288-2297.
- [26] Bobovnikova T S T, Alekseeva L B, Dibtseva A V, *et al.* The influence of a capacitor plant in serpukhov on vegetable contamination by polychlorinated biphenyls [J]. *Science Total Environment*, 2000, **246**(1): 51-60.
- [27] 农业部畜牧兽医局. 农业部发布动物性食品中兽药最高残留限量 [J]. *中国兽药杂志*, 2003, **37**(2): 7-9.
- [28] 葛可佑. 中国居民膳食指南精编版 [M]. 北京: 人民出版社, 2007. 45-63.
- [29] Yiruhan, Wang Q J, Mo C H, *et al.* Determination of four fluoroquinolone antibiotics in tap water in Guangzhou and Macao [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(7): 2350-2358.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, CAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrain the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 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