

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险

陈卫平¹, 彭程伟^{1,2}, 杨阳^{1,2}, 吴玉梅³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 北京市水环境监测中心, 北京 100038)

摘要: 应用气相色谱与质谱联用仪分析了北京市地下水内磺胺类(SAs)、氟喹诺酮类(FQs)、四环素类(TCs)、 β -内酰胺类和大环内酯类等 5 大类抗生素. 结果表明, 北京地下水抗生素以 SAs、FQs 和 TCs 等 3 类为主, 检出率分别为 78.9%、100% 和 47.3%, 其中甲氧苄氨嘧啶(TMP)、环丙沙星(CIP)和诺氟沙星(NOR)检出率均在 70% 以上. 污灌区地下水样点抗生素浓度显著高于水源地和南水回灌区样点, 磺胺二甲嘧啶(SDD)和磺胺嘧啶(SDZ)在污灌区检出峰值达到 236 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 96.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 生态风险评价结果表明, 研究区地下水抗生素污染风险较小, 但在污灌区显示中等或高等风险等级. CIP 应作为研究区地下水抗生素监测中的重点监测对象.

关键词: 抗生素; 地下水; 污灌区; 分布; 健康风险

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5074-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201704287

Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing

CHEN Wei-ping¹, PENG Cheng-wei^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, WU Yu-mei³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Monitoring Center of Beijing Water Environment, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the GC-MS technique, we conducted a survey to investigate the concentration, distributions, and emission sources of sulfonamides (SAs), fluoroquinolones (FQs), tetracycline (TCs), β -lactam, and macrolides in groundwater in Beijing. Results indicated that SAs, FQs, and TCs were the main types of antibiotic in groundwater, and the detection ratios of trimethoprim, ciprofloxacin, and norfloxacin were above 70%. Concentration of antibiotics in sites from sewage irrigation areas were significantly higher than those from the drinking source area or the south-to-north water recharge areas. The highest concentration of sulfadimidine (236 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) and sulfadiazine (96.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) in groundwater were both found in the sewage irrigation area. An ecological risk analysis showed a low risk for antibiotic in groundwater at drinking source sites, while groundwater at sewage irrigation sites fell into the high risk group. It is important to strengthen the ciprofloxacin monitoring and ensure underground water safety.

Key words: antibiotic; groundwater; sewage area; distribution; health risk

抗生素可治疗各种非病毒感染^[1,2], 被广泛用于疾病治疗和养殖业^[3], 主要包括磺胺类、氟喹诺酮类、四环素类、 β -内酰胺类和大环内酯类等^[4,5]. 尽管大部分抗生素的半衰期不长^[6], 但由于抗生素滥用以及污水处理不足, 每年都有大量抗生素进入水环境, 形成“假持续”现象^[7]. 近年, 美国、法国、英国、瑞典和丹麦地下水均检出高于环境安全质量标准的抗生素^[4,5]. 美国地下水磺胺甲基嘧啶和磺胺甲噁唑的峰值浓度分别高达 360 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1110 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[8], 西班牙地下水检出了 31 种抗生素, 伊诺沙星、恩诺沙星和氧氟沙星检出率高达 100%, 大环内酯类和氟喹诺酮类抗生素峰值浓度已经达到 2980 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 543 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[9]. 水环境中抗生素会影响微生物种群数量、破坏水生态平衡, 并产生大量耐药菌, 这些病菌随食物链进入人体, 危害人体

健康^[1,10,11]. 因此, 抗生素被作为一种新型污染物受到各国科学家的广泛关注.

全球抗生素年消费 12~20 万 t^[5], 而我国抗生素产量和消费量均居世界首位^[6]. 2013 年, 我国有 58.3% 的抗生素进入污水处理厂^[6]. 由于缺乏抗生素类污水处理技术, 因此大量抗生素从污水厂排水口进入水环境^[12]. Zhou 等^[2] 在广西省养殖场检出大量磺胺类抗生素, 最高浓度为 128 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (磺胺间二甲氧嘧啶). Hu 等^[4] 对天津市菜地地下水抗生素含量特征的调查显示, 磺胺类和氟喹诺酮类检出

收稿日期: 2017-04-28; 修订日期: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173123); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室项目(SKLURE2013-1-04)

作者简介: 陈卫平(1976~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为生态风险评估, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

率最高,峰值浓度分别为 $78 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $43 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 孙雨等^[3]的研究发现长江南京段水源地地表水中抗生素检出率高达 100%,最高浓度为 $10.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (氯霉素).北京市地下水抗生素含量、种类、分布规律及潜在风险的报道却较少.本研究分析了北京市地下水中磺胺类、氟喹诺酮类、 β -内酰胺类、四环素类和大环内酯类等 5 类抗生素的分布特征,并评价其生态风险,以期水资源利用和河流新型污染物管理提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市地处华北平原北部,工农业用地和人口主要集中在东南部平原地区(图 1).北京市地下水资源 26.3 亿 m^3 ,平原地区可采资源量约为 24.6 亿 m^3 ,其中永定河、潮白河冲洪积扇中上部的郊区和密云、怀柔及顺义地区地下水可采资源量占到全市平原地区可采资源量的近一半^[13],是北京市集中供水的主要水源地,也是地下水源保护的重点地区.

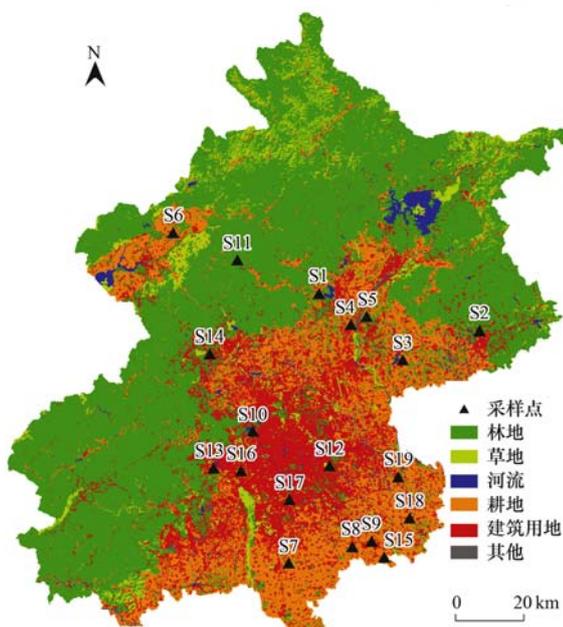


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Research area and distribution of sampling stations

北京市山区地下水根据含水介质的不同,可分为 3 个含水组:碳酸盐类岩溶及裂隙含水组主要分布在延庆东部与怀柔一带,单井出水量一般为 $1\ 000 \sim 4\ 000 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$;碎屑岩裂隙含水组主要分布在西南部的猫儿山及北安河、百花山一带,单井出水量一般为 $300 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$;岩浆岩和变质岩风化裂隙含水组主要分布在怀柔喇叭沟门、延庆大庄科、八达岭

及房山城关西北,单井出水量一般为 $200 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ^[14].

1.2 样品采集

根据北京市地下水资源分布,在北部和西部山区及平原地区共选择 19 个地下水重点监测样点,包括前辛庄(S1)、平谷水源地(S2)、沙子营(S3)、牛栏山镇(S4)、八厂(S5)、小柏老村(S6)、庞各庄(S7)、长子营(S8)、采育(S9)、地下水水源地三厂(S10)、密云(S11)、王四营(S12)、门头沟(S13)、马池口(S14)、张坊水源地(S15)、衙门口(S16)、丰台南苑村(S17)、永乐店(S18)和西集(S19).其中 S4 为南水回灌点位,S7、S9 和 S18 为北京市传统的农业污灌区,灌溉历史近 50 年,污水来源以农业用水和附近水产及畜禽类养殖为主.

北京市地下水主要为第四系松散层孔隙水^[14],取样分为 3 个层位,包括浅层孔隙水(埋深 $0 \sim 40 \text{ m}$),中深层孔隙水(中深层承压水, $80 \sim 100 \text{ m}$)和深层孔隙水(深层承压水, $150 \sim 200 \text{ m}$)等 3 类.

应用 QED(Sample ProTM 采样泵)低流量采样设备于 2016 年 8 月在北京市 19 个样点进行采样(图 1).采样瓶为 5 L 的棕色玻璃瓶,采样后立即密封,运回实验室于 4°C 条件下保存并于 24 h 内完成前处理.

1.3 化学试剂

6 种磺胺类抗生素(Sulfonamides, SAs),包括磺胺二甲嘧啶(SDD)、磺胺甲噁唑(SMX)、磺胺二甲氧嘧啶(SDM)、磺胺氯哒嗪(SCD)、磺胺嘧啶(SDZ)和甲氧苄氨嘧啶(TMP),4 种氟喹诺酮类抗生素(Fluoroquinilones, FQs),包括氧氟沙星(OFI)、环丙沙星(CIP)、诺氟沙星(NOR)和恩诺沙星(ENRO),5 种四环素类(Tetracyclines, TCs),包括金霉素(CTC)、土霉素(OTC)、四环素(TCY)、多西环素(DIX)和美他环素(METC),3 种 β -内酰胺类(β -lactam, β -LTMs)抗生素,包括红霉素(ERY)、罗红霉素(ROX)和泰乐菌素(TLS),和 2 种大环内酯类抗生素(Macrolides, MLs),包括氨苄青霉素(APL)和强力霉素(DCL)购自于 Dr. Ehrenstorfer-Schafers 公司(Augsburg, 德国)和 Sigma-Aldrich 公司(Saint Louis, 美国);同位素内标物购自 Sigma-Aldrich 公司(Saint Louis, 美国),所用试剂均为优级纯.

1.4 样品分析

水样经玻璃纤维滤膜(GF/F, Whatman)过滤后采用固相萃取装置(SPE)将水样以低于 5

$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速通过 Oasis HLB 小柱 (6 mL、500 mL, 美国 Waters 公司). HLB 小柱使用前依次用 6 mL 甲醇和 6 mL 超纯水进行活化. 萃取结束后, 清洗小柱, 并抽空干燥 2 h, 用 10 mL 酸化乙腈洗脱, 收集洗脱液至玻璃离心管中, 氮吹后用甲醇/超纯水 (60:40, 体积比) 溶液定容后待测. 样品应用高效液相色谱-质谱联用仪 (Agilent, 6900N, GC/5975 MSD) 进行测定, 仪器分析条件参见文献 [15].

样品分析中应用方法空白, 空白加标和样品平行进行质量控制, 测的回收率在 75.3% ~ 102.5% 之间, 样品平行样相对标准偏差在 16.3% 以下, 方法空白未检出目标污染物.

表 1 常见抗生素毒性风险数据及 PNEC 值¹⁾

Table 1 PNEC and toxicity values for measured antibiotics

| 抗生素 | 非靶标生物 | 毒性数据/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ | 毒性 | 评价因子 | 预测无效应浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ |
|------|-------------------------|-------------------------------------|---------|------|--|
| TMP | <i>R. salina</i> | EC50 = 16 * | Acute | 1000 | 16 000 |
| SMX | <i>S. leopoliensis</i> | EC50 = 0.027 * | Acute | 1000 | 27 |
| SDD | <i>S. capricornutum</i> | EC50 = 2.2 * | Acute | 1000 | 2 200 |
| SDZ | <i>S. vacuolatus</i> | EC50 = 9.52 * | Chronic | 1000 | 19 520 |
| CIP | <i>M. aeruginosa</i> | EC50 = 0.005 * | Acute | 1000 | 5 |
| NOR | <i>V. fischeri</i> | NOEC = 0.010 38 ** | Chronic | 100 | 103.8 |
| ENRO | <i>V. fischeri</i> | NOEC = 0.002 88 ** | Chronic | 100 | 28.8 |
| OTC | <i>M. aeruginosa</i> | EC50 = 0.05 * | Acute | 1000 | 50 |

1) * 表示半最大效应浓度, ** 表示无影响浓度

$0.01 \leq \text{RQ} < 0.1$ 为低风险, $0.1 \leq \text{RQ} < 1$ 为中等风险, $\text{RQ} \geq 1$ 为高风险.

1.6 数据分析

土地利用数据采用 2015 年 TM 影像数据, 利用 ENVI 4.8 和 ArcGIS 10.0 进行影像解译. 数据统计和分析应用 Genstat 17.0.

2 结果与讨论

2.1 抗生素检出率

北京市地下水抗生素检测结果显示, 磺胺类 (SAs)、氟喹诺酮类 (FQs) 和四环素类 (TCs) 的检出率分别为 78.9%、100% 和 47.3% (图 2). SAs 类 TMP 检出率高达 73.7%, SDD、SMX、SCP 和 SDZ 检出率都在 22% 以内. FQs 类 CIP 与 NOR 的检出率分别高达 94.7% 和 78.9%, ENRO 检出率为 15.8%. TCs 类 OTC 检出率达 47.3%, CTC、ROX 和 METC 检出率均在 11% 以内. β -LTMS 与 MLS 的检出在国内外的报道较少. β -LTMS 在法国^[19] 地下水中有检出, 但浓度仅 $1.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. MLS 在美国^[20] 和欧洲^[10] 检出率都较高, 峰值浓度接近 3 000

1.5 风险评价模型

选用风险熵值法^[14] 进行抗生素的风险表征方法, 其计算根据以下公式:

$$\text{RQ} = \text{MEC}/\text{PNEC} \quad (1)$$

式中, RQ (risk quotients) 为风险熵, MEC (measured environmental concentration) 为地下水抗生素的检测浓度 ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$); PNEC (protected no effect concentration), 即, 预测无效应浓度, 为水生生物的风险阈值 ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$). PNEC 通过查阅文献 [16, 17] 或收集慢性或急性毒理学试验数据与评价因子计算得来 (表 1). 本次评估基于“最高风险”模式, 采用抗生素实测峰值计算 RQ 值. 根据 Hernando 等^[18] 提出的 RQ 的分类标准: $\text{RQ} < 0.01$ 为无风险,

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (螺旋霉素)^[10], 而在我国 MLS 的检出率和检出浓度都较低^[2]. β -LTMS 与 MLS 抗生素在北京市地下水均未检出.

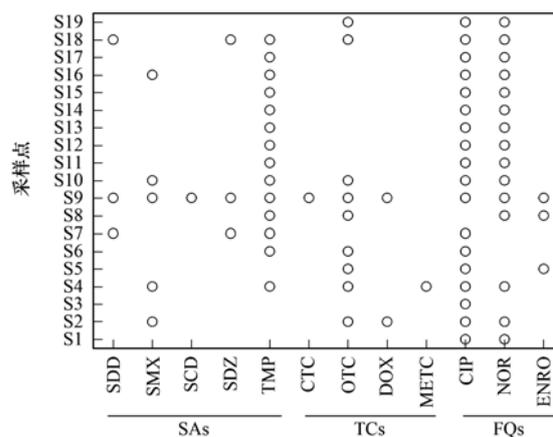


图 2 北京市地下水抗生素检出率

Fig. 2 Detected ratio of antibiotics in the groundwater in Beijing

SAs 在水中水溶性较好, 不容易发生吸附或降解反应^[21], 因而 TMP 作为磺胺增效剂被广泛使用^[15]. SAs 在美国地下水检出率 (0.41%) 较低但浓度较高 ($160 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[22], 而在西班牙地下水检

出率(56.4%)较高但浓度($2.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)较低^[23]. FQs类抗生素(如CIP和NOR)作为广谱抗菌药受到广泛使用,衰减期较长,易经淋滤作用后渗入地下水系统^[7]. 我国TCs使用量高达12000 t(2013年),约为英国整个抗生素使用量的11倍^[6]. OTC在水环境中半衰期约为55 d左右,显著高于TCS中其他抗生素^[6].

2.2 抗生素含量特征

表2列出了检出率在15%以上的8种抗生素含量,其中SDD和SDZ峰值接近或大于 $100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其余抗生素峰值则均在 $100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内. 从含量平均值来看,SAs中SDD与SDZ含量最高,分别为 $17.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. FQs中,CIP与

ENRO含量最高,分别为 $4.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. TCs中OTC检出率虽然最高(47.3%),但其平均含量只有 $0.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 与国内地下水抗生素研究对比,研究区SAs(除过SDD和SDZ)和TCs类抗生素浓度范围相近,FQs类抗生素含量相对较低^[4,6,7]. 与国外相关研究对比,研究区地下水SMX、TMP、OTC、CIP、NOR和ENRO检出率及浓度与西班牙加泰罗尼亚地区相近^[9],但显著低于印度、美国 and 德国^[1,9,22,23].

检测结果说明研究区地下水抗生素浓度均较低. 地下水环境具有低温、缺氧和避光等特点,不利于抗生素的快速降解^[5]. Xu等^[1]的研究指出在该温度下SMX降解率仅为40%,显著低于 25°C 左

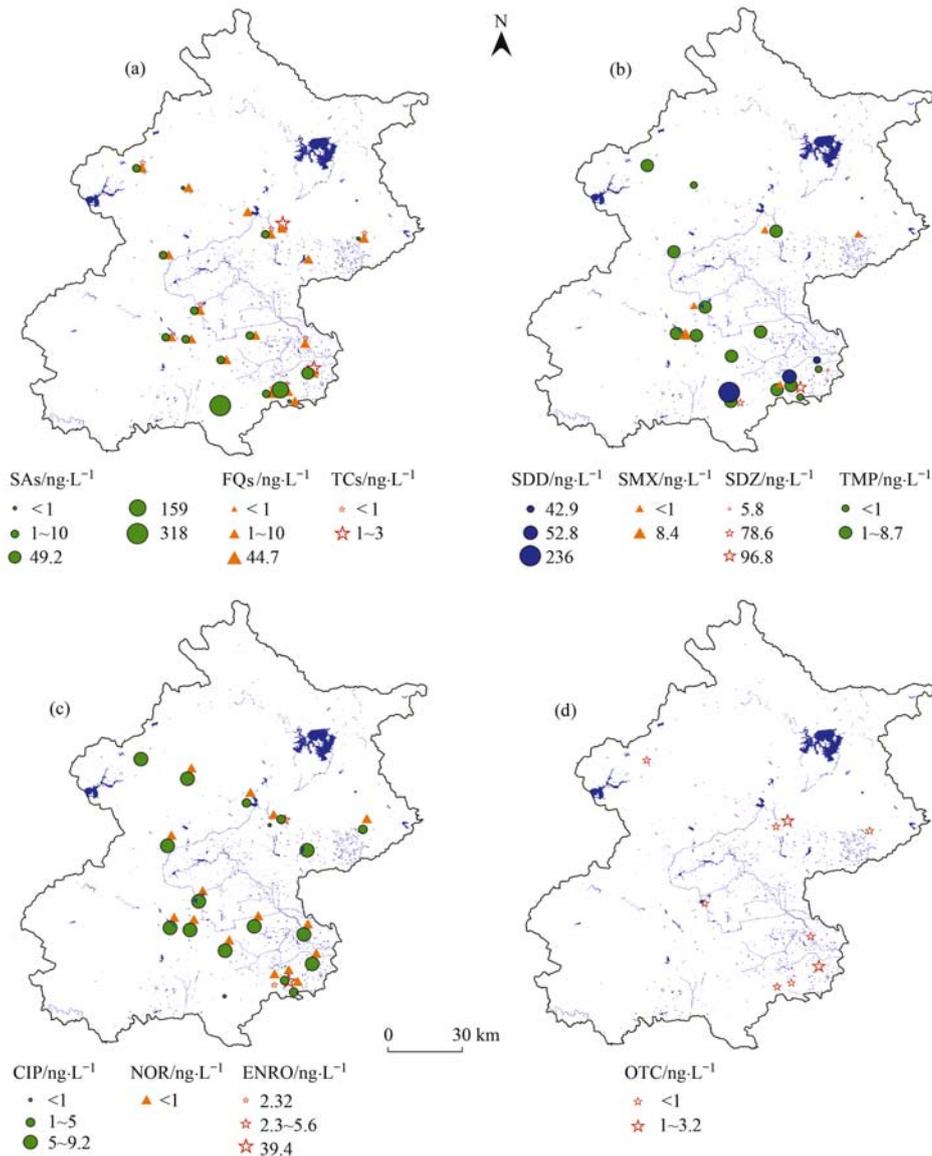


图3 北京市地下水抗生素空间浓度分布

Fig. 3 Spatial distribution of concentration of antibiotics in the groundwater in Beijing

右时的 82.9%。而抗生素在地下水中的长时间残留可诱导产生维生素群落耐药性。

表 2 北京市地下水检出抗生素浓度
Table 2 Concentration of detected antibiotics
in the groundwater in Beijing

| 类别 | 抗生素 | 范围 /ng·L ⁻¹ | 平均值 /ng·L ⁻¹ | RQ |
|-----|------|---------------------------|----------------------------|---------|
| SAs | SDD | nd ~ 236 | 17.5 | 0.107 2 |
| | SMX | nd ~ 8.4 | 0.6 | 0.312 6 |
| | SDZ | nd ~ 96.8 | 9.5 | 0.005 0 |
| | TMP | nd ~ 8.7 | 1.9 | 0.000 5 |
| TCs | OTC | nd ~ 3.2 | 0.3 | 0.063 8 |
| | CIP | nd ~ 9.2 | 4.9 | 1.840 0 |
| FQs | NOR | nd ~ 0.9 | 0.2 | 0.008 4 |
| | ENRO | nd ~ 39.4 | 2.5 | 1.366 7 |

Chee-Sanford 等^[24]在养殖场下游地下水中检出带有多种编码抗性的四环素抗性基因,说明其向地下水迁移的可能性。考虑到地下水水环境系统的特殊性会让其成为抗性基因的储存库,因此需加强对地下水中低浓度高检出率的抗生素的监测。

2.3 抗生素空间分布

北京市地下水 SAs 主要集中于 S7、S9 和 S18 等 3 个点位,其含量分别为 318、159 和 49 ng·L⁻¹; FQs 主要集中在样点 S9,含量为 44.7 ng·L⁻¹[图 3(a)]。SAs 类抗生素 SDD 只在 S7、S4 和 S18 等 3 个样点检出,但浓度较高,分别为 236、52.8 和 42.9 ng·L⁻¹; SDZ 主要集中在 S7(78.6 ng·L⁻¹)和 S9(96.8 ng·L⁻¹)两个样点[图 3(b)]。FQs 类抗生素 ENRO 主要集中在样点 S9,浓度高达 39.4 ng·L⁻¹,显著高于其他样点[图 3(c)]。TCs 类抗生素 OTC 主要集中在 S5 和 S18 两个点位,含量分别为 3.19 ng·L⁻¹和 1.25 ng·L⁻¹[图 3(d)]。吸附作用弱的抗生素易被淋洗,随着水循环迁移进入地下水^[11]。Carballa 等^[10]指出抗生素固液分配系数(K_d)越大,抗生素越容易被土壤吸附。而 SDD、SDZ 和 CIP 的 K_d 分别为 0.65、0.39 和 0.28,显著小于其同类抗生素^[5,10]。

S7、S9 和 S18 等 3 个样点属于北京市农业污灌区,并分布有垃圾填埋场。苏思慧等^[12]在该区土壤剖面中检出大量抗生素; Grundwasser 等^[25]指出未经特殊处理的污水灌溉农田会带入大量的抗生素,并通过渗滤作用进一步污染地下水。S4 为南水北调工程引水回灌地下水位点,SMX、TMP、OTC、METC、CIP 和 NOR 虽然有检出,但浓度远远低于污灌区。因此推断抗生素在该区域地下水中的显著

富集与污水灌溉有关。

2.4 风险评价

Tolls^[26]指出抗生素吸附量随土壤有机质及黏粒含量的增加而减小。而北京棕黄壤的土壤 pH 偏高(pH = 8.2),而有机碳(TOC = 1.2%)和黏粒(Clay = 6.4%)含量较低^[27],因此抗生素向地下水中迁移的概率较大。生态风险评价结果显示,无风险、低风险、中等风险和高风险等级分别为 50%、0%、25% 和 25%(表 2)。CIP 和 ENRO 等 2 种抗生素处于高风险等级,对北京市地下水敏感性生物构成较大威胁。

从空间分布来看,SDD、SMX 和 ENRO 只在污灌区为中等或高等风险等级。CIP 风险水平较高(图 4),36.8% 和 57.9% 的样点处于中等和高等风险等级。天津市蔬菜种植地地下水 CIP 的 RQ 值高达 8.5^[4]。而瑞典制药厂附近村庄的地下水 CIP 的 RQ 值高达 2 800^[28]。考虑到 CIP 对地下水水生物的高毒性效应^[7],应作为地下水抗生素监测中的重点监测对象。南水回灌点除 CIP 为中等风险外,其他抗生素风险较小。长江南京段水源地 SMX 的 RQ 值在可控范围内(RQ < 0.1),水环境抗生素来源主要是医用药品和制药厂废水^[3]。山东小清河流域有 13 种抗生素中 61.6% 处于中等风险和高风险等级,其中 SMX 和 LIP 的 RQ 值高达 31.3 和 11.3,SMX 的高风险与水产养殖有关,而 CIP 的高风险区域主要为人口密集区^[15]。因此,SAs 和 TCs 两大类抗生

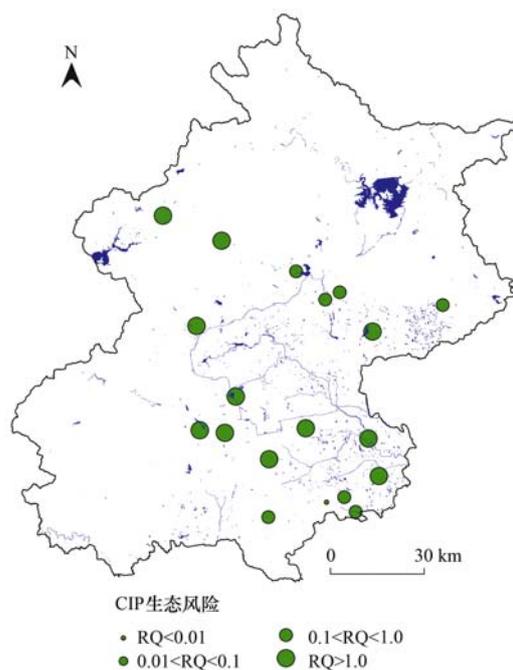


图 4 北京市地下水 CIP 生态风险

Fig. 4 Ecological risk of CIP in the groundwater in Beijing

素在我国水环境中污染风险较高,考虑到这两类抗生素用量在我国呈逐年增加的趋势^[6],应进一步加强对其在水环境的监测。

3 结论

北京市地下水检出 13 种抗生素,除磺胺二甲嘧啶(SDD)和磺胺嘧啶(SDZ)外,其他抗生素含量均较低,与天津及西班牙地下水中抗生素浓度范围相近。抗生素在该区域地下水中的显著富集与污水灌溉有关。当前北京市地下水抗生素整体风险可控,但磺胺二甲嘧啶(SDD)、磺胺嘧啶(SDZ)和恩诺沙星(ENRO)在区域内呈现中等风险,环丙沙星(CIP)在多处呈高风险。考虑到当前污水处理设施难以有效去除这几种抗生素,应加强对该敏感区域的地下水抗生素监测和污染风险控制。

参考文献:

- [1] Xu B J, Mao D Q, Luo Y, *et al.* Sulfamethoxazole biodegradation and biotransformation in the water-sediment system of a natural river[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7069-7076.
- [2] Zhou L J, Ying G G, Liu S, *et al.* Simultaneous determination of human and veterinary antibiotics in various environmental matrices by rapid resolution liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, **1244**: 123-138.
- [3] 孙雨, 丁剑楠, 卢婕, 等. 长江南京段新兴污染物污染特征及风险评估[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, **29**(2): 25-30.
Sun Y, Ding J N, Lu J, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of emerging pollutants in surface water at Nanjing section in the Yangtze River [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2017, **29**(2): 25-30.
- [4] 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.
- [5] 童蕾, 姚林林, 刘慧, 等. 抗生素在地下水系统中的环境行为及生态效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(2): 27-36.
Tong L, Yao L L, Liu H, *et al.* Review on the environmental behavior and ecological effect of antibiotics in groundwater system [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(2): 27-36.
- [6] Zhang Q Q, Ying G G, Pan C G, *et al.* Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(11): 6772-6782.
- [7] 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 等. 某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4060-4067.
Cui Y F, He J T, Su S H, *et al.* Distribution characteristics of fluoroquinolones antibiotics in surface water and groundwater from typical areas in a city [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4060-4067.
- [8] Lapworth D J, Baran N, Stuart M E, *et al.* Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **163**: 287-303.
- [9] López-Serna R, Jurado A, Vázquez-Suñé E, *et al.* Occurrence of 95 pharmaceuticals and transformation products in urban groundwaters underlying the metropolis of Barcelona, Spain [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **174**: 305-315.
- [10] Carballa M, Fink G, Omil F, *et al.* Determination of the solid-water distribution coefficient (K_d) for pharmaceuticals, estrogens and musk fragrances in digested sludge [J]. *Water Research*, 2008, **42**(1-2): 287-295.
- [11] Sukul P, Lamshöft M, Zühlke S, *et al.* Sorption and desorption of sulfadiazine in soil and soil-manure systems [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(8): 1344-1350.
- [12] 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 等. 北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4257-4266.
Su S H, He J T, Yang L, *et al.* Contamination characteristics of fluoroquinolones in different kinds of soil profiles in southeast suburb of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4257-4266.
- [13] 陈江, 聂振龙, 王莹. 北京市地下水资源利用现状评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, **6**(6): 97-99, 114.
Chen J, Nie Z L, Wang Y. Evaluation on groundwater resource utilization status in Beijing [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, **6**(6): 97-99, 114.
- [14] 张安京. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
Zhang A J. *Underground water in Beijing* [M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [15] 李嘉, 张瑞杰, 王润梅, 等. 小清河流域抗生素污染分布特征与生态风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(7): 1384-1391.
Li J, Zhang R J, Wang R M, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of antibiotic pollution in Xiaoqing River watershed [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(7): 1384-1391.
- [16] Cristale J, Katsoyiannis A, Sweetman A J, *et al.* Occurrence and risk assessment of organophosphorus and brominated flame retardants in the River Aire (UK) [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **179**: 194-200.
- [17] Baran W, Sochacka J, Wardas W. Toxicity and biodegradability of sulfonamides and products of their photocatalytic degradation in aqueous solutions [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(8): 1295-1299.
- [18] Hernando M D, Mezcuca M, Fernández-Alba A R, *et al.* Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments [J]. *Talanta*, 2006, **69**(2): 334-342.
- [19] Vulliet E, Cren-Olivé C. Screening of pharmaceuticals and hormones at the regional scale, in surface and groundwaters intended to human consumption [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2929-2934.
- [20] Bartelt-Hunt S, Snow D D, Damon-Powell T, *et al.* Occurrence of steroid hormones and antibiotics in shallow groundwater impacted by livestock waste control facilities [J]. *Journal of*

- Contaminant Hydrology, 2011, **123**(3-4): 94-103.
- [21] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [22] Fram M S, Belitz K. Occurrence and concentrations of pharmaceutical compounds in groundwater used for public drinking-water supply in California [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(18): 3409-3417.
- [23] García-Galán M J, Garrido T, Fraile J, *et al.* Application of fully automated online solid phase extraction-liquid chromatography-electrospray-tandem mass spectrometry for the determination of sulfonamides and their acetylated metabolites in groundwater[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2011, **399**(2): 795-806.
- [24] Chee-Sanford J C, Aminov R I, Krapac I J, *et al.* Occurrence and diversity of tetracycline resistance genes in lagoons and groundwater underlying two swine production facilities [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67**(4): 1494-1502.
- [25] Heberer T, Schmidt-Bäumler K, Stan H J. Occurrence and distribution of organic contaminants in the aquatic system in Berlin. Part I: Drug residues and other polar contaminants in Berlin surface and groundwater [J]. Acta Hydrochimica Hydrobiologica, 1998, **26**(5): 272-278.
- [26] Tolls J. Sorption of veterinary pharmaceuticals in soils: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(17): 3397-3406.
- [27] Liu R, Wang M E, Chen W P, *et al.* Spatial pattern of heavy metals accumulation risk in urban soils of Beijing and its influencing factors [J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 174-181.
- [28] Fick J, Söderström H, Lindberg R H, *et al.* Contamination of surface, ground, and drinking water from pharmaceutical production[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2009, **28**(12): 2522-2527.



CONTENTS

| | |
|---|--|
| Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015 | WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897) |
| Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks | XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905) |
| Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data | XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913) |
| Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China | YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924) |
| Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing | ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932) |
| Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze | LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943) |
| Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province | ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951) |
| Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin | YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958) |
| Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming | WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968) |
| Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 | DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976) |
| Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus | LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983) |
| Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai | DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991) |
| Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China | CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004) |
| Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir | YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012) |
| Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area | ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020) |
| Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir | CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032) |
| Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin | LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039) |
| Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin | LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047) |
| Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain | MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056) |
| Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model | XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063) |
| Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing | CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074) |
| Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen | LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081) |
| Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems | LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090) |
| Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter | LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097) |
| Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent | LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106) |
| Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water | GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116) |
| MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate | WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124) |
| Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature | XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132) |
| Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite | CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139) |
| Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes | MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146) |
| Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater | LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154) |
| Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater | ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162) |
| Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process | SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169) |
| Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an | KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174) |
| Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX | WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184) |
| Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms | YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192) |
| Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization | YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201) |
| Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate | ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208) |
| Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor | ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215) |
| Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR | SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222) |
| Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor | LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229) |
| Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta | ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237) |
| Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers | ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247) |
| Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir | HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256) |
| Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai | GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262) |
| Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City | SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272) |
| Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area | YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282) |
| Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai | ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292) |
| Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants | GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299) |
| Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice | SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308) |
| Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield | ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315) |
| Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields | HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326) |
| Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain | SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333) |
| Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain | FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344) |
| Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers | WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352) |