

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000~2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
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	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

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

崔亚丰, 何江涛*, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖翠

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为初步了解某市水体中5种典型氟喹诺酮类抗生素(FQs)的污染特征, 对该市主要排污河与典型地段采集地表水与地下水, 分别对水样进行常规指标测试与FQs浓度测试分析。结果表明, 地表水与地下水中FQs的含量水平和组成特征差异明显。地表水中FQs总含量水平整体高于地下水; 地表水中FQs浓度平均值为 $789.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 主要以氧氟沙星(OFL)与洛美沙星(LOM)为主; 地下水中FQs浓度平均值为 $342.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 主要以诺氟沙星(NOR)与洛美沙星(LOM)为主, 恩诺沙星(ENR)在地表水与地下水的含量水平均偏低。地表水体中FQs含量水平表现为沟渠>支流>干流。该市排污河水系傍河剖面地下水中FQs含量水平高于其他地段。傍河剖面处地下水中FQs监测浓度随着采样点与河道距离的增加呈现递减趋势, 且各组分变化趋势基本一致, 初步证实河水可能是河道周边地下水中FQs的主要来源。

关键词: 氟喹诺酮类抗生素; 地表水; 地下水; 污染来源

中图分类号: X522; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4060-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.015

Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City

CUI Ya-feng, HE Jiang-tao*, SU Si-hui, YANG Lei, QIAO Xiao-cui

(Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environmental Engineering, School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of 5 typical kinds of fluoroquinolones (FQs) pollution in waters from a city, surface water and groundwater samples from main drainage rivers and typical areas were collected, respectively. The conventional test and FQs concentrations analysis of the water samples were conducted. The results showed the concentration and composition of FQs in groundwater differed substantially from those in surface water. The average concentration of FQs in surface water was $789.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ with the main components of ofloxacin (OFL) and lomefloxacin (LOM). This value was higher than the average concentration of FQs in groundwater: $342.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ with the main components of norfloxacin (NOR) and lomefloxacin (LOM). The enrofloxacin (ENR) exhibited relatively lower levels in both surface water and groundwater as compared to others. The highest FQs concentrations in surface water were found in trenches, followed by tributaries and the main stream. For groundwater, FQs concentrations were relatively higher in the sewage riverside. A decreasing trend of FQs concentration was monitored with the increasing distance of sampling points to the drainage rivers and all components mentioned above showed similar changing trends. The results of this study preliminarily indicated that FQs in groundwater along the riverside probably came from the surface water.

Key words: fluoroquinolones antibiotics; surface water; groundwater; pollution source

氟喹诺酮类抗生素(fluoroquinolones, FQs)是在喹诺酮类抗生素主环的6或8位加入氟原子衍生而来, 具有抗菌谱广、抗菌活性强、给药方便、不良反应小、无交叉耐药性等优点。是近年来广泛用于人和其他动物细菌性感染的临床治疗药物^[1]。作为氟喹诺酮类药物的消耗大国, 中国每年生产约21万t抗生素, 其中42%被应用于人类和动物细菌传染疾病的预防与治疗, 58%作为促生长药物被用于畜牧业和水产养殖业^[2~5]。由于氟喹诺酮类药物具有良好的药物动力学性质, 它们在体内的代谢率<25%^[6]。因此, 大多数氟喹诺酮类药物以原型药物经人和动物排泄物、医药废水以及水产饲料等途

径进入到环境中^[7~9]。氟喹诺酮类抗生素进入环境后, 通过吸附、降解、迁移以及生物富集等一系列运移过程在土壤、水、沉积物以及植物中重新进行分配^[10]。近年来, 不同地区地表与地下水环境中已频繁检出抗生素, 且由于农田灌溉与富含抗生素的畜禽粪便大量作为有机肥用于农业生产, 对土壤也造成一定污染^[11, 12]。环境中的抗生素浓度很低,

收稿日期: 2015-06-03; 修订日期: 2015-06-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309001-4, 201209053-2)

作者简介: 崔亚丰(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水环境, E-mail: 18813181433@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jthe@cugb.edu.cn

但长时间的存在会影响环境生态系统中细菌、水生生物、土壤生物和植物的种群结构和营养转移方式,破坏其平衡,并产生大量耐药菌,对人类健康构成威胁^[13-15]。

为初步探查某市地表、地下水中 5 种 FQs 的污染状况,本研究对该市主要排污河 C 河水系及其傍河剖面进行了地表水与地下水的采样工作,同时对 A 河与 B 河及部分典型地段进行了地表水与地下水的采样以作对比。分析总结了地表水和地下水中 5 种 FQs 的含量水平、分布特征,以及在傍河剖面周边不同位置地下水中 FQs 含量与组成变化规律,初步探索了傍河剖面地面源和地下水中 FQs 的组成与含量对应关系,以期为进一步探讨水环境中抗生素污染特征与污染来源提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

某市位于中国北部,西北部为山区,东南部为大面积冲洪积扇平原。该市河网较为发育,A 河和 B 河是该市两大主要河流,由于城市人口数量急剧增加导致供水量增加,加上连续干旱,降雨量减少,A 河与 B 河出现水量严重不足,大部分干流一度出现无水状态,部分有水河段均为外来水源。C 河流经该市东北部地区,是该市五大水系之中唯一发源于

境内且常年有水的河流。C 河水系现为该市最主要的排污水系,全长约 186 km,流域面积达 4 235 km²,包含了该市主要城区。其间主要有 H 河、D 河、E 河和 F 河等城市排污河支流汇入。

1.2 样品采集

于 2013 年 8 月针对某市主要排污河道与典型地段进行地表水与地下水采集。本次地下水采集采用 QED (Sample ProTM 采样泵) 低流量采样设备,地表水采集采用手持取样泵。共布设 12 个采样点,采样点分布如图 1 所示。其中,地表水采样点以污染较为严重的 C 河水系为主,D 河、E 河与 F 河分别为 C 河的支流;NF 段、DH 段与 SQ 段分别为 C 河水系的次级排污沟。同时为作对比,对主要以外来水源为主污染较轻的 A 河与 B 河段进行地表水的采集。地下水采样点以 C 河水系傍河剖面为主,外加典型地段剖面以作对比。采样点类型如表 1 所示,主要包括:河道 2 处、傍河剖面 5 处、排污河 6 处、排污沟 3 处、养殖场 1 处。此次共采集地下水样 24 组,地表水样 11 组。每个傍河剖面垂直河道布设 2~5 个地下水采样点。样品存放在 1 L 棕色瓶中,放置在保温箱中加入冰块保存,带回实验室后将样品置于 0~4℃ 冰箱保存。

1.3 样品测试

采用高效液相色谱法对 5 种氟喹诺酮类抗生素进行测试,5 种抗生素的理化性质参数如表 2 所示。

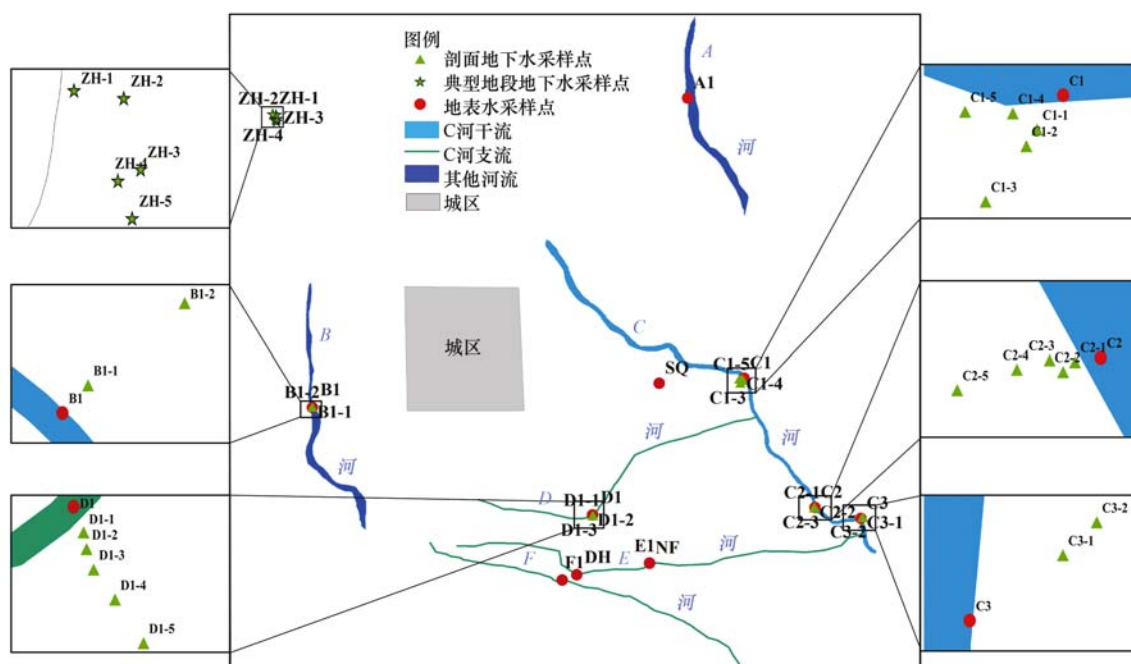


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the research area

表 1 样品采集情况

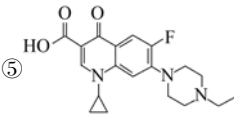
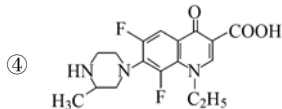
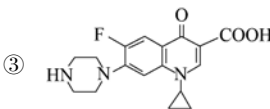
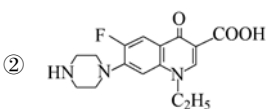
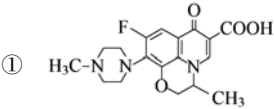
Table 1 Condition of sample collection

典型研究区	研究区类型	地下水样品 (组)	地表水样品 (组)
A1 段	河道	0	1
B1 段	(河道) 傍河断面	2	1
C1 段	(排污河) 傍河断面	5	1
C2 段	(排污河) 傍河断面	5	1
C3 段	(排污河) 傍河断面	2	1
D1 段	(排污河) 傍河断面	5	1
E1 段	排污河	0	1
F1 段	排污河	0	1
ZH	养殖场	5	0
DH	排污沟	0	1
NF	养殖场排污沟	0	1
SQ	工业区排污沟	0	1

表 2 氟喹诺酮类抗生素 (FQs) 的理化参数

Table 2 Physical and chemical parameters of fluoroquinolones

名称	英文名	化学结构式	CAS 登录号	分子式	相对分子质量	lgK _{ow}	pK _a
氧氟沙星	Ofloxacin	①	82419-36-1	C ₁₈ H ₂₀ FN ₃ O ₄	361.37	-0.39	6.0, 8.3
诺氟沙星	Norfloxacin	②	70458-96-7	C ₁₆ H ₁₈ FN ₃ O ₃	319.33	-1.03	6.3, 8.4
环丙沙星	Ciprofloxacin	③	85721-33-1	C ₁₇ H ₁₈ FN ₃ O ₃	331.34	0.28	6.0, 8.8
洛美沙星	Lomefloxacin	④	98079-51-7	C ₁₇ H ₁₉ F ₂ N ₃ O ₃	351.35	-0.30	5.8, 9.3
恩诺沙星	Enrofloxacin	⑤	93106-60-6	C ₁₉ H ₂₂ FN ₃ O ₃	359.40	0.70	6.3, 8.3



1.3.1 水样预处理

水样置于 1.0 L 的带聚四氟乙烯衬垫螺旋盖的棕色玻璃瓶中,加入 500 mg Na₂EDTA,于 4℃ 保存.水样经玻璃纤维滤膜 (GF/F, Whatman) 过滤去除悬浮颗粒物,取水样两份,其中一份加入标准混合溶液浓度均为 100 ng·L⁻¹,作回收率实验.水样通过 HLB 固相萃取柱 (6 mL, 500 mg) 萃取.采用 Visiprep™-DL 型固相萃取装置 (Supelco, MSA), Oasis HLB SPE 柱 (6 mL, 500 mg) (美国 Waters 公司).样品过柱前,HLB 柱依次用 6 mL CH₃OH 和 6 mL H₂O 进行活化.过柱时,流速控制在 1~3 mL·min⁻¹ 左右.样品过完后,用 10 mL 超纯水 (洗去 Na₂EDTA) 冲洗小柱,抽真空干燥 2 h,用 10 mL 酸化乙腈 (CH₃CN:0.05 mol·L⁻¹ H₃PO₄ 溶液 = 5:1, 体积比) 洗脱,收集洗脱液,于平行蒸发仪中浓缩至 1 mL 以下,超纯水定容至 1 mL 待测.

1.3.2 分析测试

5 种 FQs 标准样品均来自德国 Dr. Ehrenstorfer

公司,样品测试采用 LC-20A 高效液相色谱 (SPD-20A 紫外检测器,日本岛津公司), Inertsil ODS-SPC18 型分析柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm, 日本岛津公司), LC Solution 色谱工作站;条件:柱温为 40℃;柱平衡时间为 30 min. 流动相 A 为 5% H₃PO₄ 溶液 (pH = 2.5);流动相 B 为甲醇和乙腈的混合液 (甲醇:乙腈 = 60:40, 体积比),流动相的有机相比比例为 20%;检测波长为 280 nm;流速为 1.0 mL·min⁻¹;进样量为 10 μL.

向 2 组 (每组 7 个样品) 1 L 超纯水中分别加入 10 μL 100 ng·L⁻¹ 标准混合溶液,进行 7 次平行测定,氧氟沙星、诺氟沙星、环丙沙星、洛美沙星和恩诺沙星的方法检出限分别为 3.0、6.1、4.9、8.5 和 6.4 ng·L⁻¹;定量限范围为 3.0~6.4 ng·L⁻¹,相对标准偏差 (RSD) 均小于 10% (n = 7). 氧氟沙星、诺氟沙星、环丙沙星、洛美沙星和恩诺沙星的平均回收率分别为 83.4%、88.6%、85.3%、82.4% 和 92.3%,出峰时间分别为 13.265、14.137、15.864、

18.956 和 19.986 min. 为控制实验过程中人为污染,保证操作过程准确可靠,实际样品测试中还设置空白样、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%.

2 结果与讨论

2.1 地表水中 FQs 组成特征与含量水平分析

目前,在世界范围内的河流、养殖废水、制药及医院废水中、氟喹诺酮类抗生素已被广泛检出^[16]. 将该市河流与国内外其他地区水体中氟喹诺酮类抗生素含量对比如表 3,结果显示,该市水体中 FQs 平均含量处于较高水平,达 789.1 ng·L⁻¹. 渤海湾水体中 FQs 浓度最高,达到1 500.0 ng·L⁻¹,水体中 FQs 浓度最低的是法国塞纳河,浓度只有 19.9 ng·L⁻¹.

表 3 世界不同国家和地区范围内不同水体中 FQs 检出情况

Table 3 Concentrations of FQs detected in water from different countries and regions of the world			
采样地点	采样年份	5 种 FQs 总浓度 /ng·L ⁻¹	文献
法国塞纳河	2002	19.9	[17]
美国 Charmoise 河	2000	124.0	[18]
德国	2002	ND ~ 120.0	[19]
黄河	2009	940.0	[20]
渤海湾	2011	1 500.0	[21]
莱州湾	2012	583.0	[22]
香港维多利亚港	2006	270.0	[23]
某市典型河流及沟渠	2013	789.1	本研究

在该市采集的 11 个地表水样中,OFL 和 LOM 均检出 11 个,检出率高达 100%; NOR 检出 10 个,检出率达 90.9%; ENR 与 CIP 检出率为 81.8%.

对 11 个地表水样品中的氟喹诺酮类抗生素的含量进行统计分析,如图 2 所示. 结果表明,地表水

中 FQs 总浓度中位数为 752.3 ng·L⁻¹,OFL 和 LOM 在地表水中浓度较高,最高值分别达3 453.5 ng·L⁻¹和 3 815.6 ng·L⁻¹,平均检出浓度分别为 525.3 ng·L⁻¹和 360.7 ng·L⁻¹. 地表水中不同类抗生素的含量组成差异,一定程度上与其环境行为与使用量有关. OFL、LOM 与 NOR 的医疗行业用量排名居前,NOR 与 CIP 在畜牧水产养殖业广泛使用^[24],所以这几类抗生素在地表水环境中分布较广,而 ENR 是兽用专用药,用量比较局限,在自然界可以发生光解反应,动物体内可以代谢生成 CIP^[25],这些因素共同导致地表水体中 ENR 含量水平与检出率偏低.

对比该地区不同河流中 5 种 FQs 含量水平,如图 2 所示. 可以看出,C 河排污水系中 FQs 含量水平明显高于对照组 A 河与 B 河,组成特征也存在一定差异. C 河水系作为城市主要排污水系,具有典型的河流污染特征. 虽然该市河流污染治理力度逐年加大,污水处理能力日益增高,水质有了较大改善,但由于污染物排放超过环境容量,C 河水系中水质依旧较差. 水系干流和主要支流的水源为市内各污水处理厂处理之后的排水,而水系中较小的沟渠水则为污染源直接排放的基本未经处理的污水. C 河水系中 FQs 含量水平高低为沟渠 > 支流 > 干流. 沟渠 SQ 段、DH 段和 NF 段分别位于工业园区、居民区工业区混合区域和奶牛养殖场附近,推测沟渠内水为不同来源未经处理的污水,故污染物浓度较高,且组成特征彼此存在差异. 作为 C 河的一条支流,D1 段河水中 FQs 组成特征与 C 河类似,但含量水平远远高于 C 河,平均浓度高达 1 879.5 ng·L⁻¹,由于 D 河为该市排污河道,大部分河水为污水处理厂处理之后的排水与部分未经处理的污水,水质较差. C1、C2 和 C3 段分别位于 C 河上下

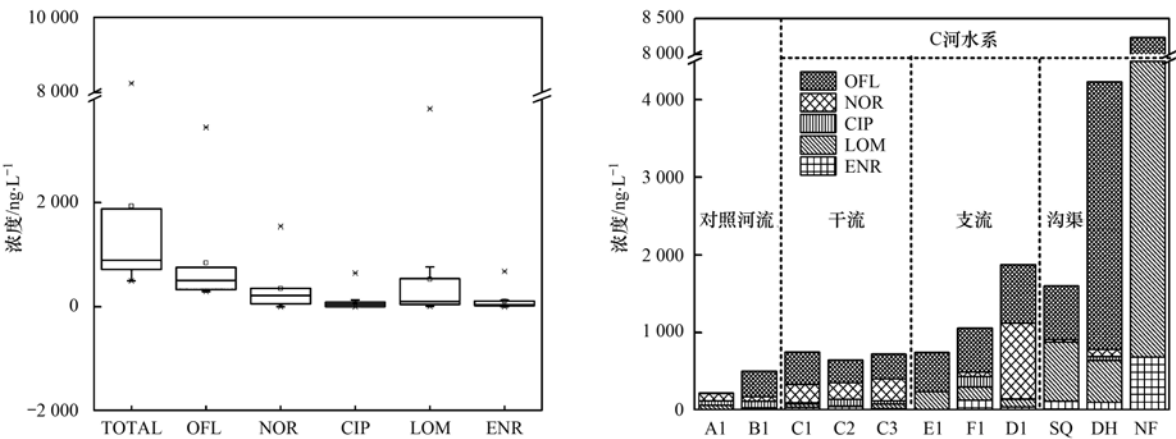


图 2 典型地段地表水中 5 种 FQs 类抗生素含量水平及组成特征

Fig. 2 Concentrations and constitution characteristics of five kinds of FQs in surface water of typical areas

游不同地段,在河水运移过程中,FQs 含量水平与组成特征没有较大差异,浓度范围为 $646.8 \sim 752.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,主要以 OFL 与 NOR 为主。相比之下,对照组 A 河与 B 河 FQs 含量水平较低,主要是因为这两条河流的水源均为外来水,水质较好。

2.2 地下水中 FQs 组成特征与含量水平分析

该市采集的 24 个地下水样中,NOR 检出 24 个,检出率高达 100%;OFL 检出 23 个,检出率达 95.8%。

抗生素通过各种途径进入包气带后会发生复杂的迁移转化行为,主要包括吸附、降解和通过植物吸收参与生态系统循环 3 种途径^[26]。有学者研究发现,—COOH 官能团在氟喹诺酮类抗生素的吸附过程中起到了很大的贡献作用^[27];FQs 抗生素中含有较多酸碱解离基团,不管在酸性或碱性环境中降解作用都比较明显^[28],故 FQs 从地表水途径包气带进入地下水的过程中浓度迅速降低。对 24 个地下水样品中的 5 种 FQs 的含量水平进行统计分析,如图 3 所示。结果表明,地下水中 FQs 总体含量水平明显低于地表水,FQs 总浓度中位数为 $309.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。NOR 和 LOM 在地下水中浓度较高,最高值分别达 $657.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $307.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,平均检出浓

度分别为 $169.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $68.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

对比该市不同地段地下水中 FQs 的平均含量水平与组成特征,如图 3 所示。结果表明,地下水中 FQs 的含量水平与组成特征均与地表水存在较大差异。C 河水系傍河剖面周边地下水中 FQs 含量水平明显高于 B 河段与 ZH 段。可能与 C 河排污系地表水补给地下水有关。D1 段傍河剖面地下水中 FQs 的检出浓度最高,其次是 C 河段地下水,ZH 段与 B1 河段周边地下水中 FQs 检出浓度较低,与地表水中 FQs 含量水平的分布特征类似。地下水中 FQs 以 NOR 和 LOM 为主。ZH 段地下水采样点位于一大型养殖场附近,由于其地下水中 FQs 含量水平较 NF 段同类型养殖场废水中 FQs 含量水平相差甚远,且比其他未受污染地段地下水中 FQs 含量水平还低,推测该段地下水受养殖场内排放废水影响较小。傍河剖面 C1、C2 和 C3 段周边地下水中含量水平与组成特征类似,含量水平在 $395.0 \sim 415.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,均以 NOR 为主,NOR 含量水平占 FQs 总含量水平的质量分数分别为 66%、45% 和 78%。D 河为 C 河一条支流,D1 段地下水中 FQs 组成特征与 C 河段地下水相近,地下水中 FQs 含量上的差异与前文讨论地表水中 FQs 含量水平支流 > 干流的结论相契合。

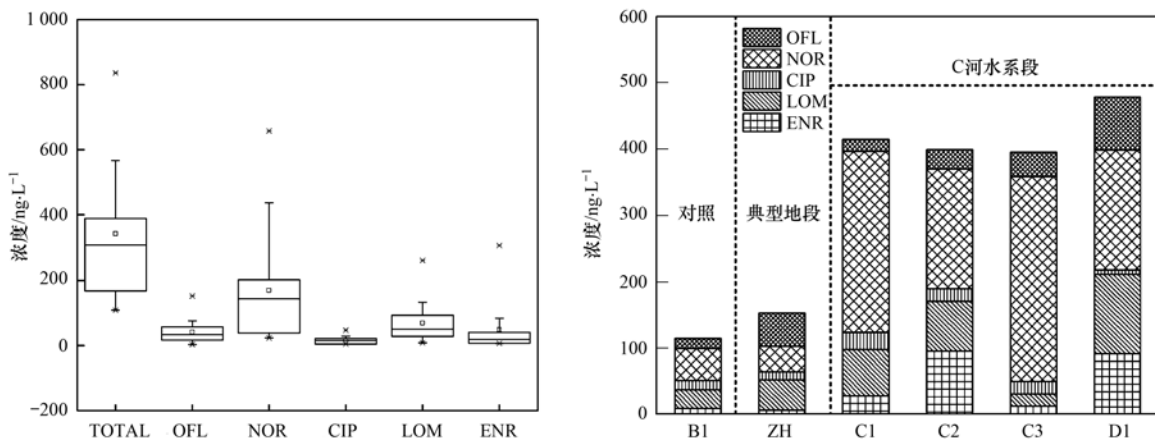


图 3 某市典型地段地下水中 5 种 FQs 类抗生素含量水平及组成特征

Fig. 3 Concentrations and constitution characteristics of five kinds of FQs in groundwater of typical areas

2.3 傍河剖面处地表水与地下水中 FQs 含量与组成特征分析

即使药物经自然衰减作用被大量消减,仍有少量药物进入地下水体^[29]。为确定傍河剖面处周边地下水中 FQs 是否来源于河水,对研究区 C 河水系傍河剖面处河水与地下水进行单独分析。对比不同傍河剖面处河水与周边地下水中 FQs 含量水平,如图 4 所示。结果表明,傍河剖面处河水中 FQs 含量

水平明显高于周边地下水。地表水中 FQs 含量水平在不同傍河剖面处的变化趋势与地下水一致,故推测傍河剖面处河水与周边地下水存在一定的水力联系。

为确定傍河剖面处地表水与地下水之间的补排关系,选取傍河 C1 段、C2 段与 D1 段河水与其周边不同距离处地下水样品进行分析,如图 5 所示。结果表明,傍河剖面河水与周边地下水中 FQs 含量水

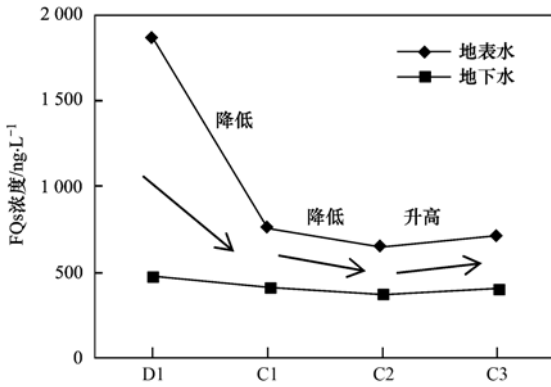
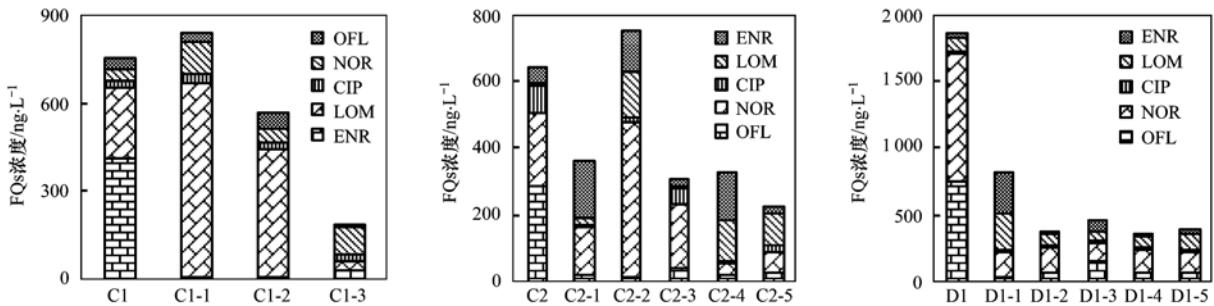


图4 傍河段面处河水与地下水中 FQs 总浓度对比

Fig. 4 Comparison of total FQs concentrations in surface water and riverside groundwater

平与组成特征存在差异. 河水组分主要以 NOR 与 OFL 为主, 地下水中主要以 NOR 为主. 距离 C1 段最近的钻孔地下水中 NOR 的浓度高达 $657.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 占到 5 种目标抗生素总浓度的 78.7%. 傍河剖面处周边地下水中 FQs 总浓度随着地下水采样点与河道距离的增加呈现整体递减趋势, 傍河地段包气带岩性较简单, 且在观测期内地表水位高于潜水位, 剖面岩性与水位如图 6 所示, 故推断傍河剖面处地下水中 FQs 来源于地表河水补给.

由于地下水环境处于黑暗条件下, 抗生素的光解作用减弱, 在包气带与地下含水层中抗生素的吸附作用比较明显. 李顺义等研究发现, NOR 在土壤中的吸附作用跟 pH 有较大关系, pH 为 5 ~ 11 时,



横坐标为地下水编号, 序号越大表示地下水采样点与河道距离越大

图5 不同傍河剖面河水及周边地下水中 5 种 FQs 浓度柱状图

Fig. 5 Concentrations of FQs detected from surface water and groundwater in different river riverside profiles

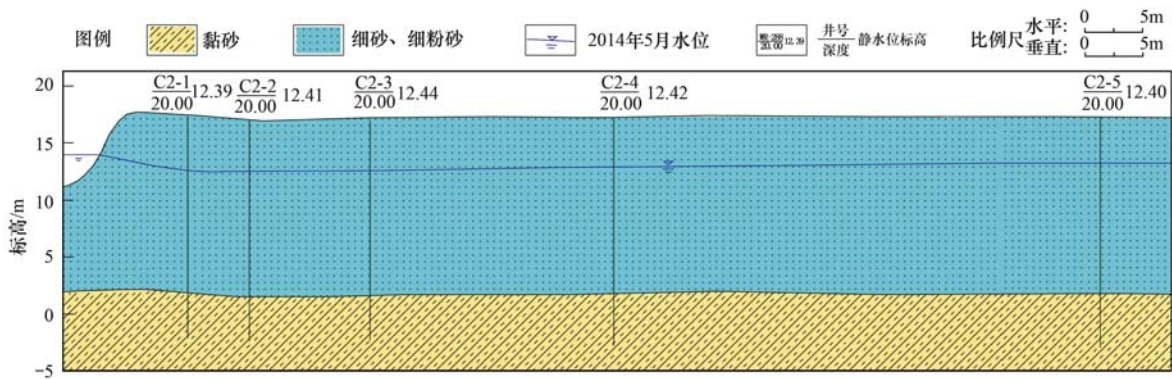


图6 C2 河段剖面岩性

Fig. 6 Stratigraphic lithology of C2 riverside profile

土壤对 NOR 的吸附量是先降低后升高, 在 pH 为 8 ~ 9 时, 吸附作用最弱^[28]. 假设傍河剖面处地下水中 FQs 是由地表河水补给, 实时监测数据显示地下水环境中 pH 值基本在 6.5 ~ 8 之间, 将不同傍河剖面河水与其周边地下水中 NOR 浓度占 FQs 总浓度比重变化与所处地下水环境 pH 进行分析, 如图 7 所示. 结果表明, 地下水环境中 pH 在 6.5 ~ 8 范围

内, NOR 在河水与地下水中所占 FQs 的比重差异与 pH 存在高度相关性. 随着 pH 的升高地下水中 NOR 浓度占 FQs 总浓度的比重逐渐增高. 推测 pH 在 6.5 ~ 8 范围内, 随着 pH 的升高, 包气带中土壤 NOR 的吸附作用逐渐减弱, 导致地下水中 NOR 比重逐渐增大. 与李顺义等^[28]研究的结论基本一致, 也验证上述河水补给地下水的假设.

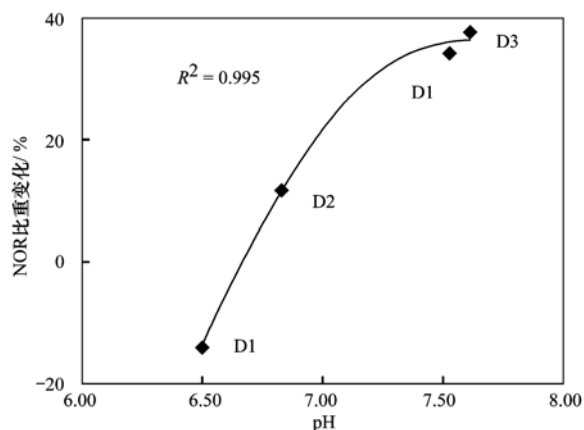
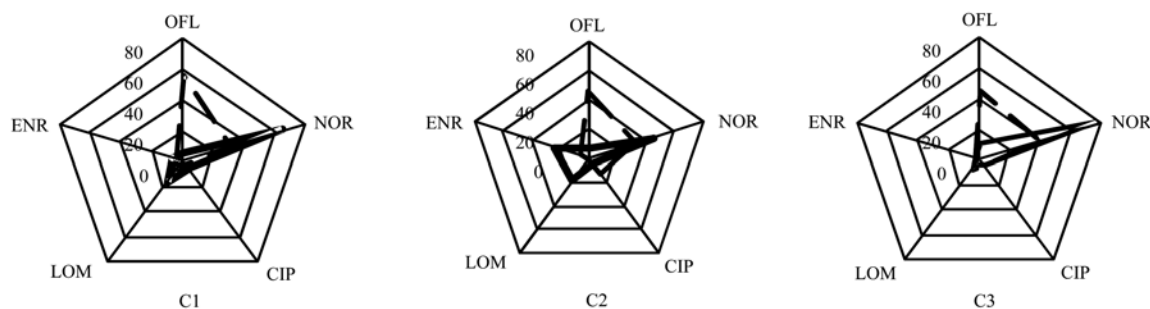


图7 不同傍河剖面处河水和地下水中 NOR 占 FQs 总浓度比重变化与地下水环境 pH 关系

Fig. 7 Relationship between the proportion variation of NOR concentrations in total FQs concentration between surface water and groundwater in different riverside profiles and the environmental pH of groundwater



虚线为地表水,实线为地下水

图8 典型傍河剖面处河水与周边地下水中 5 种 FQs 组成

Fig. 8 Constitution characteristics of the 5 types of FQs detected in surface water and groundwater of typical riverside profiles

基于研究区地段水文地质剖面资料,加之以上论证,基本可以判断研究区傍河剖面周边地下水是由河水补给,傍河剖面河水可能是周边地下水中 FQs 的污染来源之一。但由于地下水中污染物含量的变化受污染源、地下环境条件、降解能力等多方面的影响^[33],故对于地下水中抗生素的更多来源与运移过程还需进一步研究。

3 结论

(1) 某市典型地段地表水中 FQs 含量水平整体大于地下水中 FQs 含量水平;地表水中 FQs 浓度平均值为 $789.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,主要以氧氟沙星与洛美沙星为主;地下水中 FQs 浓度平均值为 $342.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,主要以诺氟沙星与洛美沙星为主。地表水与地下水中恩诺沙星的浓度都很低。

(2) 该市主要排污河 C 河水系中 FQs 的组成特

征在地下环境中的运移主要取决于自身的理化特性和环境特征两方面^[30]。由图 8 可知,傍河剖面河水与其周边地下水中 5 种抗生素所占 FQs 总浓度的比重变化趋势基本一致,表现为 NOR、LOM、ENR 比重升高,OFL 与 CIP 比重降低。如果河水补给地下水假设成立,由于 C 河水系傍河剖面岩性大致相同,那么药物在包气带中所经历的迁移转化过程比较类似,5 种污染物从地表水迁移至地下水后所占 FQs 总浓度的比例变化应该大体一致。在自然界水体环境中,抗生素的光解占了抗生素降解的一大部分^[31],有学者研究发现,CIP 在发生光解作用时是喹诺酮环(环丙环的破裂和氟的溶剂分解)和侧链发生反应;而 NOR 只有一种光解反应途径,光解反应条件比较局限^[32],加之 CIP 容易在土壤的表层积累,向下层土的迁移很弱^[25],这些原因共同导致 NOR 向地下水运移过程中所占 5 种 FQs 总浓度的比重升高与 CIP 所占比重降低,与本研究测试结果基本一致。

征与其他水系存在较大差异,含量水平明显高于其他水系;C 河水系中 FQs 含量水平表现为沟渠 > 支流 > 干流;C 河水系傍河剖面地下水中 FQs 含量水平高于其他地段。

(3) 傍河地段随着地下水采样点与河道距离的增加,地下水中 FQs 含量水平逐渐降低,5 种抗生素从地表水到地下水中所占 FQs 总浓度的比重变化一致,初步证实傍河剖面周边地下水由河水补给,傍河剖面处河水可能是地下水中 FQs 的主要污染源。

致谢:清华大学环境学院在本研究的野外工作中提供了相应的协助与技术指导,在样品测试分析方法上给予了很大帮助。

参考文献:

- [1] Golet E M, Strehler A, Alder A C, et al. Determination of fluoroquinolone antibacterial agents in sewage sludge and sludge-

- treated soil using accelerated solvent extraction followed by solid-phase extraction [J]. *Analytical Chemistry*, 2002, **74** (21): 5455-5462.
- [2] 杨常青, 王龙星, 侯晓虹, 等. 大辽河水系河水中 16 种抗生素的污染水平分析[J]. *色谱*, 2012, **30**(8): 756-762.
- [3] 高品, 王宇晖, 刘振鸿, 等. 水中抗生素药物的迁移分布特征研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(7): 58-63.
- [4] Jiang H Y, Zhang D D, Xiao S C, *et al.* Occurrence and sources of antibiotics and their metabolites in river water, WWTPs, and swine wastewater in Jiulongjiang River basin, south China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 9075-9083.
- [5] Kümmerer K. Antibiotics in the aquatic environment-a review-part II [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(4): 435-441.
- [6] Migliore L, Cozzolino S, Fiori M. Phytotoxicity to and uptake of enrofloxacin in crop plants [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(7): 1233-1244.
- [7] 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.
- [8] 李彦文, 张艳, 莫测辉, 等. 广州市蔬菜中喹诺酮类抗生素污染特征及健康风险初步研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2445-2449.
- [9] 尹春艳, 骆永明, 滕应, 等. 典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2810-2816.
- [10] Snyder S A, Leising J, Westerhoff P, *et al.* Biological and physical attenuation of endocrine disruptors and pharmaceuticals: implications for water reuse [J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2004, **24**(2): 108-118.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王冉, 刘铁铮, 王恬. 抗生素在环境中的转归及其生态毒性[J]. *生态学报*, 2006, **26**(1): 265-270.
- [14] 吴小莲, 向垒, 莫测辉, 等. 长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2442-2447.
- [15] Yao L L, Wang Y X, Tong L, *et al.* Seasonal variation of antibiotics concentration in the aquatic environment: a case study at Jiangnan Plain, central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 56-64.
- [16] Kümmerer K. Antibiotics in the aquatic environment-A review-Part I [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(4): 417-434.
- [17] Tamtam F, Mercier F, Le Bot B, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics in the Seine River in various hydrological conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **393**(1): 84-95.
- [18] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, *et al.* Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U. S. streams, 1999- 2000: A National Reconnaissance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1202-1211.
- [19] Hirsch R, Ternes T A, Haberer K, *et al.* Determination of antibiotics in different water compartments via liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 1998, **815**(2): 213-223.
- [20] Ling Z H, Yang Y, Huang Y L, *et al.* A preliminary investigation on the occurrence and distribution of antibiotic resistance genes in the Beijiing River, South China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(8): 1656-1661.
- [21] Zou S C, Xu W H, Zhang R J, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotics in coastal water of the Bohai Bay, China: Impacts of river discharge and aquaculture activities[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2913-2920.
- [22] 张瑞杰, 张干, 郑芊, 等. 喹诺酮类抗生素在莱州湾及主要入海河流中的含量和分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2012, **31**(1): 53-57.
- [23] 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.
- [24] 王刚斌, 程军. 2006~2008 年我院氟喹诺酮类抗菌药物应用分析[J]. *中国医院用药评价与分析*, 2009, **9**(5): 354-357.
- [25] 吴银宝, 廖新伟, 汪植三, 等. 兽药恩诺沙星(enrofloxacin)的水解特性[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(6): 1086-1090.
- [26] 高太忠, 黄群贤, 刘野, 等. 有机污染物在包气带中迁移转化试验研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(2): 42-45, 55.
- [27] Zhang H C, Huang C H. Adsorption and oxidation of fluoroquinolone antibacterial agents and structurally related amines with goethite[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(8): 1502-1512.
- [28] 李顺义, 张从良, 李保莹, 等. 土壤类型、温度和 pH 值对诺氟沙星吸附的影响[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2009, **30**(4): 73-75.
- [29] 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.
- [30] 王丽平, 章明奎, 郑顺安. 土壤中恩诺沙星的吸附-解吸特性和生物学效应[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(2): 393-397.
- [31] Dolar D, Košutić K, Periša M, *et al.* Photolysis of enrofloxacin and removal of its photodegradation products from water by reverse osmosis and nanofiltration membranes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, **115**: 1-8.
- [32] Babić S, Periša M, Škorić I. Photolytic degradation of norfloxacin, enrofloxacin and ciprofloxacin in various aqueous media[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(11): 1635-1642.
- [33] 林双双, 张亚雷, 石璐, 等. 地下水药物的赋存、源解析及运移机理[J]. *环境化学*, 2012, **31**(12): 1849-1854.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行