

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性

陈慧<sup>1</sup>, 刷泽佳<sup>1</sup>, 赵鑫宇<sup>1</sup>, 付雨<sup>1</sup>, 崔建升<sup>1,2</sup>, 张璐璐<sup>1,2\*</sup>

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050000; 2. 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050000)

**摘要:** 国内外地下水抗生素的研究主要集中于抗生素的污染特征, 而较少关注地下水中抗生素的生态风险及其与环境因子的相关性. 鉴于此, 选取石家庄市地下水环境为研究对象, 应用超高效液相色谱串联质谱法 (HPLC-MS) 分析地下水中典型抗生素——喹诺酮类 (QNs) 浓度, 研究 QNs 抗生素的生态风险, 并建立 QNs 浓度与典型环境因子的相关性. 结果表明: ① 石家庄地下水中 QNs 抗生素以环丙沙星 (CIP)、依诺沙星 (ENO) 和氟甲喹 (FLU) 为主, 其检出率分别为 75.0%、80.0% 和 100%; ② QNs 抗生素浓度范围为 3.02 ~ 98.5 ng·L<sup>-1</sup>; 就空间分布而言, QNs 浓度在 S4 处最高 (98.5 ng·L<sup>-1</sup>), 而在 S19 处最低 (3.02 ng·L<sup>-1</sup>); ③ 相关性分析结果表明, 温度 (*T*)、化学需氧量 (COD)、总溶解固体 (TDS)、菌落总数 (BCTC) 和 pH 与 QNs 相关性显著 ( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ); ④ 就生态风险的空间分布特征而言, S4 为高风险区, 其余各点为中低风险区; 就 QNs 抗生素种类而言, 除 CIP 处于中高风险水平, 其余 QNs 处于中低风险水平. 鉴于此, 为了保障石家庄地下水环境安全, 需进一步加强地下水中抗生素的风险管控.

**关键词:** 喹诺酮类抗生素; 地下水; 空间分布; 环境因子; 生态风险

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4556-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111192

## Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City

CHEN Hui<sup>1</sup>, JU Ze-jia<sup>1</sup>, ZHAO Xin-yu<sup>1</sup>, FU Yu<sup>1</sup>, CUI Jian-sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu-lu<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China; 2. Biotechnology Laboratory for Pollution Control in Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** Most studies on antibiotics in groundwater have focused on pollution characteristics, whereas less attention has been paid to the ecological risks of antibiotics and the correlation to environmental parameters. In this study, the groundwater in Shijiazhuang City was selected as the research area. Through high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS), the concentration of quinolones (QNs) in the groundwater was analyzed. Correlation analysis was conducted between QNs concentrations and physical-chemical parameters. The results showed that: ① the detection frequency of flumequine (FLU) was the highest (100%), followed by enoxacin (ENO) (80.0%) and ciprofloxacin (CIP) (75.0%). ② The concentration of QNs ranged from 3.02 to 98.5 ng·L<sup>-1</sup>; in terms of spatial distribution, the highest concentration of QNs appeared at S4 (98.5 ng·L<sup>-1</sup>), whereas the lowest concentration was exhibited at S19 (3.02 ng·L<sup>-1</sup>). ③ Temperature (*T*), chemical oxygen demand (COD), total dissolved solids (TDS), total number of colonies (BCTC), and pH were significantly correlated with QNs ( $P < 0.01$  or  $P < 0.05$ ) based on correlation analysis. ④ For the spatial distribution of ecological risk, the results showed that the ecological risk at S4 was high, whereas the risks for other sites were low. For the type of QNs, ciprofloxacin (CIP) was at a medium-high risk level, whereas the other QNs were at a low-risk level. Thus, in order to guarantee the ecological safety of groundwater in Shijiazhuang City, more attention should be paid to the risk management and control of antibiotics in groundwater in the future.

**Key words:** quinolone antibiotics; groundwater; spatial distribution; environmental factors; ecological risk

抗生素按照其化学结构可以分为: 喹诺酮类、β-内酰胺类、大环内酯类、磺胺类及其他种类<sup>[1]</sup>. 其中喹诺酮类抗生素 (quinolones, QNs) 因具有广谱抗菌、抗菌活性强和毒副作用小等特点, 已被广泛作为人类用药和兽用药. 据统计, 全球每年抗生素消费量在 100 000 ~ 200 000 t 之间<sup>[2]</sup>, 尤其是我国, 原料药使用量超过 15 000 t·a<sup>-1</sup><sup>[3,4]</sup>. 然而, 抗生素的生物可降解性低, 在水中具有高溶解度和化学稳定性<sup>[5]</sup>, 且污水处理厂的工艺对去除效率较低<sup>[6]</sup>, 导致大量抗生素进入水环境, 目前已在各类水体中检测出抗生素, 包括河流、湖泊、海湾和地下水<sup>[7~10]</sup>. 尽管地下水中抗生素的浓度比地表水低<sup>[11,12]</sup>, 但长期低水平干扰下可诱导微生物产生

抗药性或抗性基因 (antibiotics resistance genes, ARGs)<sup>[13,14]</sup>. 而地下水作为饮用水的重要来源, 一旦遭受抗生素污染, 诱导耐药性细菌 (antibiotics resistance bacterias, ARBs) 的产生, 将会对人类健康及生态系统构成严重威胁.

目前, 国内外许多地区地下水都检出抗生素. 例如, 在巴基斯坦和美国北卡罗莱纳山麓乡村的地下水中检测出 15 ~ 20 种抗生素, 浓度范围分别为 ND

收稿日期: 2021-11-17; 修订日期: 2022-01-13

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (D2019208152); 河北省教育厅重点项目 (ZD2021046)

作者简介: 陈慧 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为抗生素生态风险评估, E-mail: chh1007@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhanglu19850703@163.com

~5 610 ng·L<sup>-1</sup>和 ND ~1 740 ng·L<sup>-1</sup> (ND 表示未检测到), 主要以磺胺类、大环内酯类和喹诺酮类为主<sup>[15,16]</sup>. 在巴塞罗那市地下水中检出了 31 种抗生素, 其中 QNs 类中依诺沙星(enoxacin, ENO)、恩诺沙星(enrofloxacin, ENR)和氧氟沙星(ofloxacin, OFL)的检出率高达 100%<sup>[17]</sup>. 此外, 在英国等国地下水中也检测到高于环境安全水平的抗生素浓度<sup>[18]</sup>. 就国内而言, 南京市饮用水源地中检出 29 种抗生素, 浓度平均值为 0.56 ~ 1 995 ng·L<sup>-1</sup>, 其中环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)的检出浓度最高, 为 317 ng·L<sup>-1</sup><sup>[19]</sup>. 在北京和北方典型地段地下水中 QNs 类检出率最高 (100%), 其中 CIP 和诺氟沙星(norfloxacin, NOR)检出率均在 70.0% 以上, 且呈现污灌区地下水抗生素浓度显著高于水源地和回灌区的分布特征<sup>[11,20]</sup>. 因此, 喹诺酮类抗生素作为地下水环境中广泛存在的抗生素受到各国科学家的广泛关注.

综上所述, 目前国内外地下水抗生素的研究多集中于污染特征方面, 较少关注地下水环境中抗生素的生态风险及其与环境因子的相关性. 河北省作为我国抗生素生产大省之一, 年产抗生素原料药达 37.7 万 t, 约占全国总产量的 32.0%<sup>[21]</sup>. 而石家庄作为河北省重要的医药制造基地, 拥有华北制药等多家大型制药企业, 其产品包含多种抗生素、抗生素中间体及制剂等<sup>[22]</sup>; 大量制药废水中的抗生素未经有效处理而经多种途径进入到地下水中, 加剧了石家庄地下水环境中的抗生素污染. 鉴于此, 本文选取石家庄市地下水为研究对象, 选取 QNs 为目标物, 运用超高效液相色谱串联质谱法 (high performance liquid chromatography-Mass spectrometry, HPLC-MS). 探究石家庄市地下水中 QNs 的空间分布特征, 明确 QNs 浓度与主要理化因子的相关性, 并利用风险商值法 (risk quotients, RQ) 计算 QNs 生态风险, 以期对石家庄地下水环境中抗生素风险管控和生态安全保障提供科学支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

石家庄位于河北中南部, 地处华北平原北部, 是华北平原第四系地下水重要的山前补给区. 全市多年平均的水资源总量为 21.2 亿 m<sup>3</sup>, 其中地下水资源量达 14.8 亿 m<sup>3</sup>. 石家庄市地下水的分布规律是由西北向东南、由浅变深<sup>[23]</sup>. 依据石家庄市地下水的赋存条件和含水介质孔隙特征, 将地下水分为三大类含水岩组: 第一类为碳酸盐岩类岩溶含水岩组, 主要分布在井陘县和矿区, 单位涌水量小于 20.0 m<sup>3</sup>·(h·m)<sup>-1</sup>; 第二类为松散岩类孔隙水含水岩组,

主要分布于山前平原及山间河谷地带, 单位涌水量 36.3 m<sup>3</sup>·(h·m)<sup>-1</sup>; 第三类为基岩类裂隙水含水岩组, 广泛分布于除井陘县和矿区以外的山区, 单位涌水量小于 10.0 m<sup>3</sup>·(h·m)<sup>-1</sup><sup>[24]</sup>.

### 1.2 样品采集及理化参数

石家庄市工农业用地和人口主要集中在东部平原地区<sup>[25]</sup>, 因此本研究主要针对平原区进行研究分析. 根据石家庄市地下水资源分布, 在西部山区 (3 个) 及平原地区 (17 个) 各区县观测井共选择均匀分布的 20 个地下水重点监测采样点 (图 1), 分别为: 河村 (S1)、小宅 (S2)、固营 (S3)、东杜 (S4)、韩家楼 (S5)、里城道 (S6)、耿村 (S7)、南刘 (S8)、翟营 (S9)、深泽 (S10)、贾庄 (S11)、菜园 (S12)、寺头 (S13)、木邱 (S14)、山尹村 (S15)、鹿泉 (S16)、马庄 (S17)、赵县 (S18)、南清河 (S19) 和北辛庄 (S20). 应用 QED (Sample Pro<sup>TM</sup> 采样泵) 低流量采样仪器于 2020 年 9 月在石家庄市 20 个国控采样点进行采样.

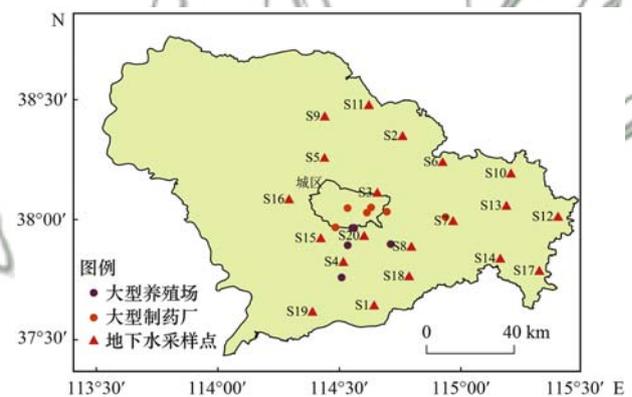


图 1 石家庄市地下水采样点布设示意

Fig. 1 Distribution of groundwater sampling sites in Shijiazhuang

### 1.3 水体样品采集与理化参数分析

地下水样品取自采样点附近现有水井, 用 QED (Sample Pro<sup>TM</sup> 采样泵) 采样仪器将样品收集到预先用甲醇和超纯水清洗过的低密度聚乙烯容器 (5 L) 中, 在现场经适当过滤 (去除水中的泥沙等杂质) 后立即密封, 用冰盒运回实验室. 水样在收集后 24 h 内进行预处理, 并在 4℃ 下保存, 直至实验分析<sup>[8]</sup>. 现场测量水温 (temperature, *T*)、水深 (height, *H*)、透明度 (transparency, *SD*)、溶解氧 (dissolved oxygen, *DO*) 和 pH 等水体理化参数. 按照标准方法《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750-2006) 测定耗氧量 (chemical oxygen demand, *COD*)、溶解性总固体 (total dissolved solids, *TDS*)、硝态氮 (nitrate nitrogen, *NO<sub>3</sub><sup>-</sup>*)、总硬度 (total hardness, *THRD*)、总大肠菌群 (total coliform, *TCG*) 和菌落总数 (total number of colonies, *BCTC*) 等理化参数.

## 1.4 抗生素分析方法

### 1.4.1 化学试剂

目标抗生素为 14 种喹诺酮类(QNs),包括噁嗪酸(oxolinic acid,OXO)、氧氟沙星(ofloxacin,OFL)、恩诺沙星(enrofloxacin,ENR)、司帕沙星(sparfloxacin,SPA)、氟甲喹(flumequine,FLU)、氟罗沙星(fleroxacin,FLE)、依诺沙星(enoxacin,ENO)、达氟沙星(difloxacin,DIF)、诺氟沙星(norfloxacin,NOR)、沙氟沙星(sarafloxacin,SAR)、奥比沙星(orbifloxacin,ORB)、环丙沙星(ciprofloxacin,CIP)、吡哌酸(pipemidic Acid,PIP)和马波沙星(marbofloxacin,MAR).标准品购自Sigma-Aldrich(steinheim,germany),均属于分析纯(纯度>95%).

### 1.4.2 样品分析

每个采样点取 1 L 水样经 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜过滤后加入 0.2 g 乙二胺四乙酸二钠( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ),使用硫酸溶液( $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )调节 pH 为 3.0 并加入内标物.采用固相萃取装置将水样以 2~5  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  流速通过固相萃取柱(InertSep HLB),HLB 柱使用前依次用 10 mL 甲醇和 10 mL 超纯水活化.萃取结束后,负压条件下抽空干燥 60 min,用 10% (体积比) 甲醇水溶液洗去杂质,用 12 mL 纯乙腈浸泡 30 min 后进行洗脱.洗脱液于 40 $^{\circ}\text{C}$  水浴条件下氮吹至近干,用 50% (体积比) 甲醇水溶液定容至 1 mL,涡旋振荡 10 min,过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜后转移至棕色样品瓶,于 -20 $^{\circ}\text{C}$  条件下保存,以备上机分析<sup>[7]</sup>.样品中 QNs 测定采用超高效液相色谱-质谱仪(HPLC-MS).HPLC 系统为 Agilent 1200 系列(色谱柱:C18, 2.1 mm $\times$ 50 mm, 1.8  $\mu\text{m}$ ),流动相 A 为 0.1% 的甲酸水溶液,流动相 B 为甲醇和 0.1% 的甲酸溶液,总流速为 0.3  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,进样量为 5  $\mu\text{L}$ ,干燥气体温度为 350 $^{\circ}\text{C}$ .质谱条件:电喷雾离子化源,正、负离子电离模式,检测模式为多重反应检测方式(MRM),流速为 11  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,离子源温度为 350 $^{\circ}\text{C}$ ,加速电压为 4 V,毛细管电压为  $\pm 3\ 500\ \text{V}$ <sup>[8]</sup>.

### 1.4.3 质量控制

QNs 采用外标法定量.用甲醇:水(1:1,体积比)逐级稀释储备液( $1\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )配制成 0.1、0.5、1.0、5.0、10.0 和 100  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$  这 6 个系列标准溶液,经 HPLC-MS 分析获得质量浓度与峰面积的标准曲线,相关系数均 $\geq 0.99$ .样品中 QNs 抗生素的回收率为 70%~102%.

## 1.5 风险评估

### 1.5.1 QNs 生态风险评估

有研究表明,多种抗生素存在于水体中时产生

的毒性效应会加强<sup>[26,27]</sup>.因此,本研究采用联合风险商值法( $\text{RQ}_{\text{sum}}$ )来表征抗生素对水生生态系统的生态风险,计算公式如下:

$$\text{RQ}_{\text{sum}} = \sum \text{RQ} \quad (1)$$

$$\text{RQ} = \text{MEC}/\text{PNEC} \quad (2)$$

式中,MEC 为抗生素在地下水中实测浓度( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ );PNEC 为预测无效应浓度( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[7,28,29]</sup>.RQ 为单一抗生素生态风险商, $\text{RQ}_{\text{sum}}$  为联合生态风险商. $\text{RQ}_{\text{sum}}$  的分类标准:0.01 <  $\text{RQ}_{\text{sum}} \leq 0.1$  为低风险;0.1 <  $\text{RQ}_{\text{sum}} \leq 1$  为中风险; $\text{RQ}_{\text{sum}} > 1$  为高风险.

农业、城市和工业活动加剧了地下水资源的潜在细菌污染,摄入含有抗生素抗性大肠杆菌的水与这种细菌的肠道定殖有关<sup>[30]</sup>.因此,本研究选取大肠杆菌作为敏感物种来进行风险评估,通过文献[31,32]得到 8 种 QNs 抗生素敏感物种的 PNEC 值来进行评估(表 1).

表 1 不同抗生素对应敏感生物毒理数据

抗生素	敏感物种	评价因子	I(E)C <sub>50</sub> / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PNEC / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$
CIP	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$2.68 \times 10^{-2}$	26.80
NOR	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$1.43 \times 10^{-1}$	143.0
SAR	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$5.31 \times 10^{-2}$	53.10
ENR	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$5.07 \times 10^{-2}$	50.70
OFL	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$8.63 \times 10^{-2}$	86.30
ORB	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$5.97 \times 10^{-2}$	59.70
ENO	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$2.48 \times 10^{-1}$	248.0
MAR	<i>Escherichia coli</i>	1 000	$2.23 \times 10^{-2}$	22.30

### 1.5.2 QNs 人体健康风险评估

本研究利用风险商值的计算模型,基于人体对抗生素的日可接受量 ADI,来评估石家庄市地下水中的 QNs 对人体的健康风险( $\text{RQ}_H$ ),计算公式如下:

$$\text{RQ}_H = \text{MEC}/\text{DWEL} \quad (3)$$

$$\text{DWEL} = \frac{\text{ADI} \times \text{BW} \times \text{HQ}}{\text{DWI} \times \text{AB} \times \text{FOE}} \quad (4)$$

式中,DWEL 为饮用水当量值( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ );ADI 为日均可接受摄入量 [ $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ];BW 为人体重量(kg);DWI 为每日饮水量( $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$ );HQ 为最高风险;AB 为肠胃吸收率;FOE 为暴露频率( $350\ \text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ );其中 HQ = 1, AB = 1.不同年龄段人群的 BW 和 DWI 取值参照环境保护部制定的标准(表 2)<sup>[33]</sup>. $\text{RQ}_H$  的分类标准: $\text{RQ}_H < 0.1$  为低风险;0.1  $\leq \text{RQ}_H < 1$  为中风险; $\text{RQ}_H \geq 1$  为高风险.

## 1.6 数据分析方法

水体理化特征数据采用 Origin 2019 软件绘制.使用 IBM SPSS Statistical 24 统计软件进行统计分

析,采用皮尔逊和斯皮尔曼相关系数法度量 QNs 与环境因子之间的相关性(显著性水平分别为  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$ )<sup>[34]</sup>. 使用 CANOCO 4.5 版软件进行冗余分析(RDA).

表 2 成人和儿童平均体重及每日饮水量

Table 2 Average body weight and daily water intake

for adults and children			
研究人员	性别	BW/kg	DWL/L·d <sup>-1</sup>
儿童	男	24.0	0.81
	女	23.0	0.76
成人	男	66.1	2.48
	女	57.8	2.12

## 2 结果与分析

### 2.1 抗生素的检出率

在石家庄 20 个地下水样品中,共检出 13 种 QNs 抗生素(图 2). 就检出率而言,QNs 抗生素检出率为 100%. 其中,FLU 检出率最高(100%),其次为 OXO (95.0%)、OFL (90.0%)、ENR (90.0%)、ENO (80.0%)、NOR (75.0%) 和 CIP (75.0%),其余目标抗生素检出率较低( $\leq 60.0%$ ). 就空间分布而言,S20 采样点 QNs 检出率最高(92.0%);其次为 S18、S15、S14、S12 和 S3 采样点,QNs 检出率均为 71.0%;其余采样点抗生素检出率较低( $\leq 65.0%$ ). 总体而言,整体呈现东南高西北低的空间分布规律.

### 2.2 抗生素浓度特征

在石家庄地下水环境中,QNs 浓度范围为 3.02 ~ 98.5 ng·L<sup>-1</sup>[图 3(a)]. 其中,CIP 和 ENO 浓度最大值接近或大于 50.0 ng·L<sup>-1</sup>,其余抗生素浓度最大值则均在 50.0 ng·L<sup>-1</sup>以内. 从各 QNs 抗生素浓度平均值而言,呈现 CIP (3.32 ng·L<sup>-1</sup>) > ENO (2.06

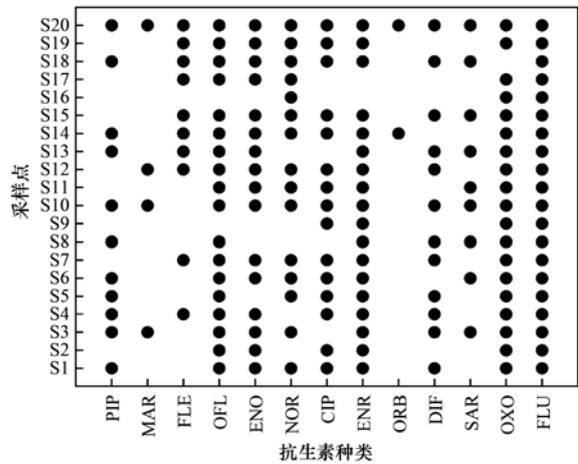


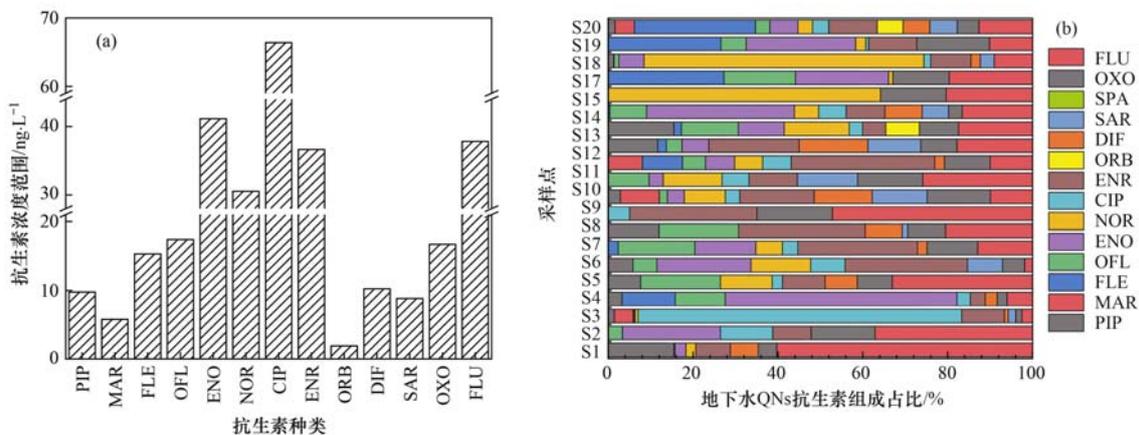
图 2 石家庄市地下水 QNs 检出样点示意

Fig. 2 Detection sampling sites of QNs antibiotics in the groundwater in Shijiazhuang

ng·L<sup>-1</sup>) > FLU (1.89 ng·L<sup>-1</sup>) > ENR (1.83 ng·L<sup>-1</sup>) > NOR (1.52 ng·L<sup>-1</sup>) > OFL (0.87 ng·L<sup>-1</sup>) > OXO (0.84 ng·L<sup>-1</sup>) > FLE (0.77 ng·L<sup>-1</sup>) 的趋势. 其中,CIP 的检出浓度最高,范围为 ND ~ 66.40 ng·L<sup>-1</sup>,占 QNs 总浓度的 22.0% [图 3 (b)];其次为 ENO 和 FLU,浓度范围分别为 ND ~ 41.14 ng·L<sup>-1</sup> 和 0.22 ~ 37.82 ng·L<sup>-1</sup>,分别占 QNs 总浓度的 14.0% 和 13.0%.

### 2.3 抗生素空间分布特征

就采样点空间分布而言(图 4),S2、S3、S6 和 S11 为石家庄北部,S5、S9 和 S16 为石家庄西部,S7、S10、S12、S13、S14 和 S17 为石家庄东部,S1、S4、S8、S15、S18、S19 和 S20 为石家庄南部. 因此,就 QNs 浓度平均值的空间分布特征而言,总体呈现南部(26.6 ng·L<sup>-1</sup>) > 东部(10.7 ng·L<sup>-1</sup>) > 北部(8.72 ng·L<sup>-1</sup>) > 西部(7.04 ng·L<sup>-1</sup>) 的空间分布规



(a) QNs 检出浓度范围,(b) 各采样点地下水 QNs 抗生素的组成占比

图 3 石家庄地下水 QNs 检出浓度范围和各采样点地下水 QNs 抗生素的组成占比

Fig. 3 Detected concentration range of QNs in groundwater and the composition percentage of groundwater QNs antibiotics at each sampling site in Shijiazhuang

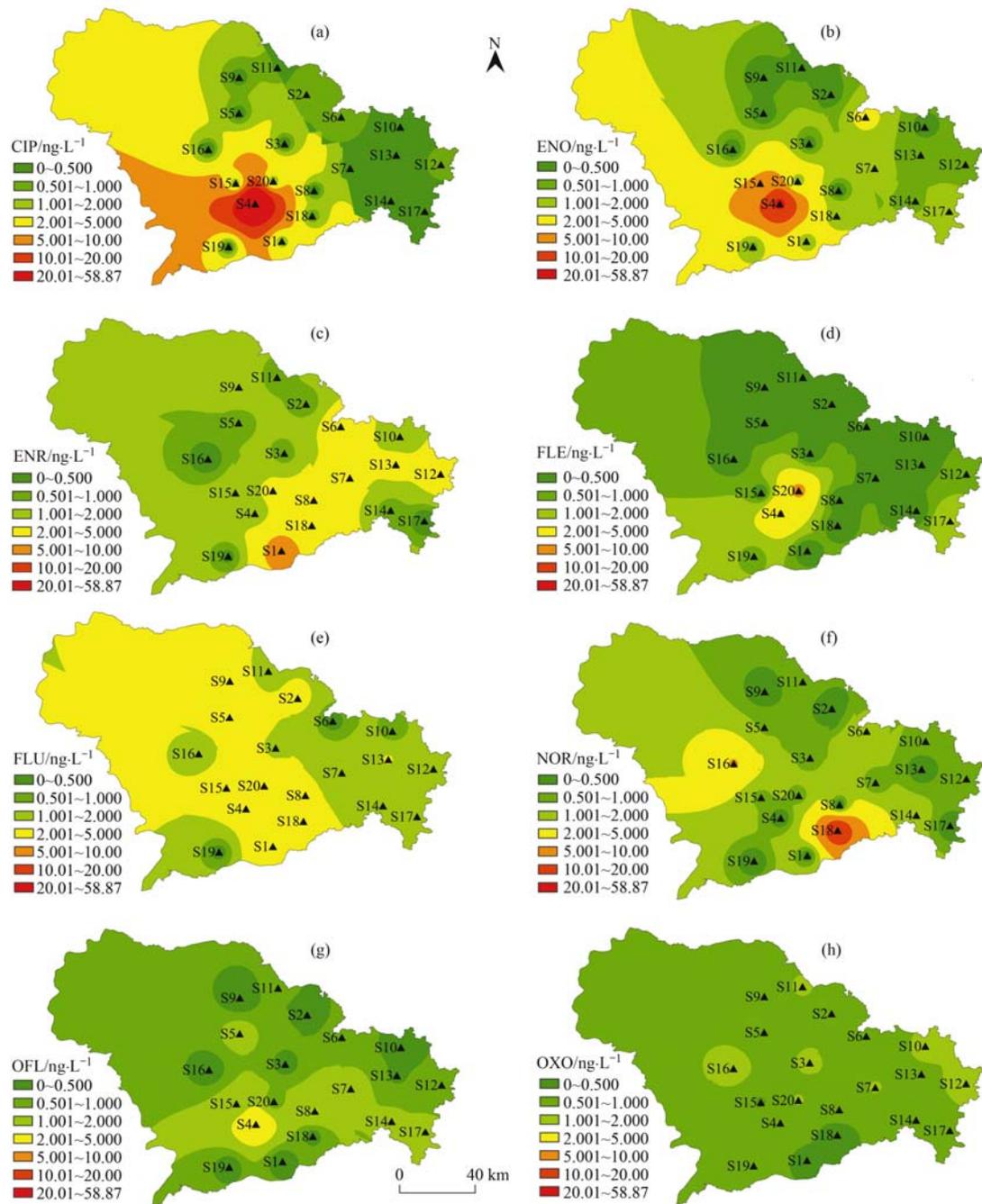


图4 石家庄市地下水中 QNs 类抗生素浓度的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of QNs antibiotics in groundwater in Shijiazhuang

律. 这可能与南部地区制药企业、养殖业较多以及人口密集有关, 该区域地下水可能受到医药废水、养殖废水和生活污水的复合影响, 故南部区域地下水的 QNs 浓度最高.

就各采样点浓度而言, QNs 浓度最大值出现在 S4 ( $98.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 而最小值出现在 S19 ( $3.02 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 就各采样点检出种类而言, 最大值出现在 S20, 在该采样点检出了 13 种抗生素. 抗生素集中分布于 S1、S4、S18 和 S20(图 4), 这些区域距离城区较近, 且附近养殖场较多, 大量医药废水、生活污水和养殖废水等排放影响到地下水中抗生素浓度. 其

中 CIP、NOR 和 ENR 作为最常见的兽用 QNs, 其在土壤中的吸附性差, 不易被吸附或降解, 易经淋溶作用渗入地下水系统, 进而在地下水中迁移和扩散<sup>[35,36]</sup>. 总体而言, QNs 在石家庄东南区域地下水中浓度相对较高, 主要抗生素种类为 CIP、ENO 和 FLU.

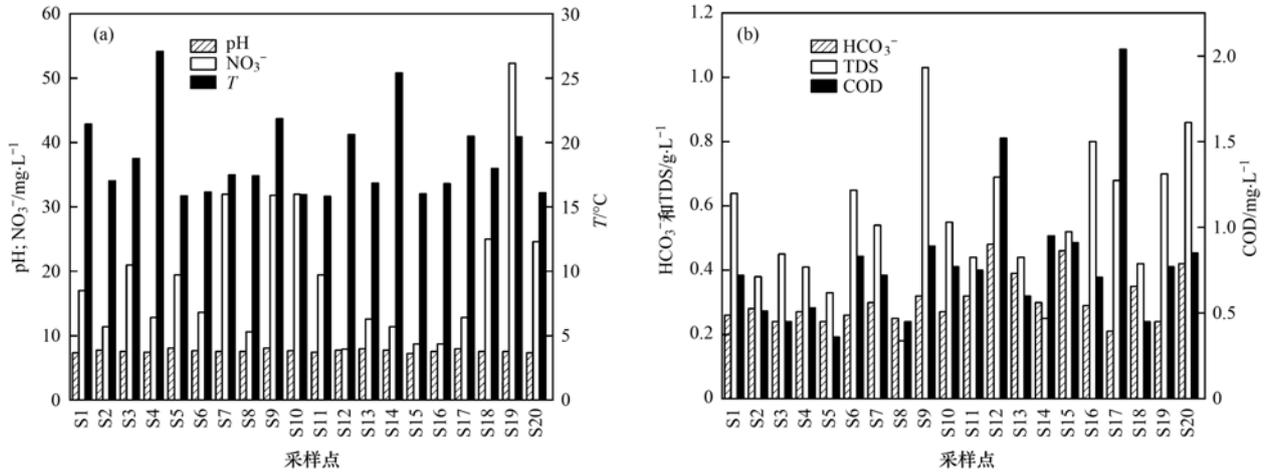
## 2.4 地下水抗生素相关性分析

### 2.4.1 地下水主要理化参数的空间分异特征

根据石家庄地下水的使用目的分类, 设定其为 III 类水. 石家庄市地下水中主要理化参数中, COD ( $0.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )、 $\text{NO}_3^-$  ( $19.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )、TDS (589

mg·L<sup>-1</sup>) 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (0.31 g·L<sup>-1</sup>) 的均值均在地下水质量标准 (GB/T 14848-2017) 范围内. 由图 5 可知, pH 范围为 7.20 (S15) ~ 8.00 (S9); COD 范围为

0.18 (S8) ~ 2.03 g·L<sup>-1</sup> (S9); NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 最大值为 52.3 mg·L<sup>-1</sup> (S19), 最小值为 7.85 mg·L<sup>-1</sup> (S12); TDS 的浓度范围为 362 (S5) ~ 1 040 mg·L<sup>-1</sup> (S17).



(a) pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 *T* 空间分布特征, (b) HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、TDS 和 COD 空间分布特征

图 5 石家庄市地下水的主要理化参数的空间分布特征

Fig. 5 Physical and chemical characteristics of groundwater in Shijiazhuang

### 2.4.2 石家庄 QNs 与环境因子相关性

运用 Pearson、Spearman 和 RDA 冗余分析, QNs 浓度与水体理化参数相关性结果表明 (图 6), 水体中 ENO、OFL 和 PIP 与 *T* 显著正相关 ( $P < 0.01$  和  $P < 0.05$ ); PIP 和 OFL 与 COD 显著负相关 ( $P < 0.05$ ); NOR 和 CIP 与 BCTC 呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ); FLE 与 TDS 显著负相关 ( $P < 0.05$ ); NOR 与 pH 显著负相关 ( $P < 0.05$ ).

就地下水中各 QNs 类抗生素而言, FLE 与 OFL、ENO、SAR 和 ORB 呈显著相关 ( $P < 0.01$ ), 表明这 5 种抗生素的来源相同. 这 5 种抗生素主要在 S4 和 S20 检出, 这些区域距离城区较近且附近有养

殖场, 因此推断主要来源可能是医药废水、生活污水和养殖废水. 而 ENR、MAR 和 CIP 显著性相关 ( $P < 0.01$  和  $P < 0.05$ ), 这 3 种抗生素主要在 S3、S8 和 S16 检出, 这些采样点距村庄较近, 因此抗生素的主要来源可能是生活污水和农田灌溉. 其余 QNs 抗生素间无显著相关性, 表明其来源差异较大, 可能为医药废水、生活污水、农田灌溉和畜牧养殖等.

### 2.5 风险评估

#### 2.5.1 QNs 生态风险评估

就各 QNs 生态风险空间分布而言, 地下水中 CIP 在 S4 处 RQ 值 (2.20) 大于 1, 处于高风险水平; ENR (S1)、MAR (S3) 和 NOR (S18) 的 RQ 值均在 0.1 ~ 1 间, 处于中风险水平; 其余各 QNs 均处于低风险水平.

就 QNs 联合生态风险空间分布而言 (图 7), 在

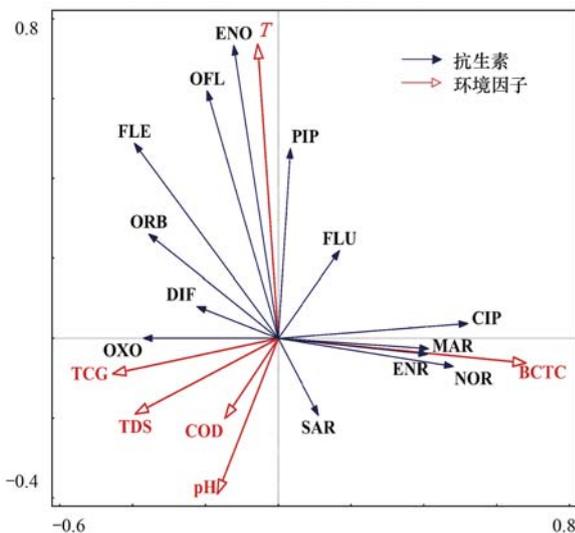


图 6 石家庄地下水中各 QNs 与水质理化参数的 RDA 分析

Fig. 6 RDA analysis of QNs in Shijiazhuang groundwater with the physicochemical parameters of water

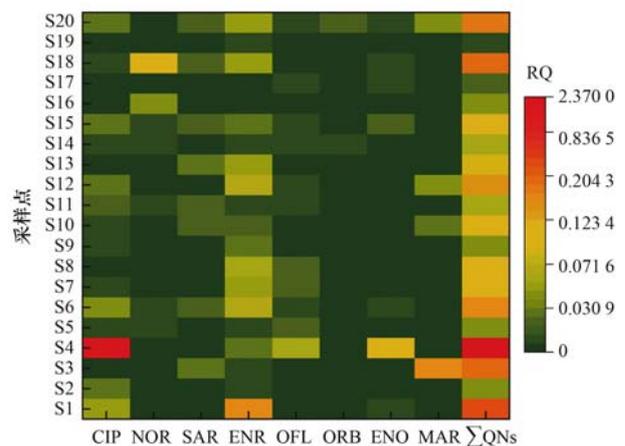


图 7 石家庄市地下水各采样点 QNs 的联合生态风险熵

Fig. 7 RQ<sub>sum</sub> of QNs in groundwater sampling sites in Shijiazhuang

S2、S5、S7、S8、S9、S10、S11、S13、S14、S16、S17 和 S19 采样点的  $RQ_{sum} < 0.1$ , 处于低风险水平; S1、S3、S6、S12、S15、S18 和 S20 采样点的  $RQ_{sum}$  处于 0.1 ~ 1 之间, 处于中风险水平; 而 S4 采样点的  $RQ_{sum} > 1$ , QNs 抗生素处于高风险水平. 总体而言, 石家庄地下水中 QNs 抗生素生态风险参数处于中低风险水平.

### 2.5.2 QNs 人体健康风险评估

石家庄市地下水环境中 CIP、ENR、NOR、OFL 和 SAR 的浓度较高, 因此选取这 5 种抗生素进行健康风险评估, 通过文献查阅得到 5 种 QNs 的 ADI 值 (表 3)<sup>[37,38]</sup>. 结果表明, 地下水的  $RQ_H$  均小于 0.1, 石家庄市地下水环境中 QNs 抗生素对人体健康的影响处于低风险水平.

表 3 不同抗生素的 ADI 值和  $RQ_H$  值

Table 3 ADI and  $RQ_H$  of different antibiotics

抗生素	ADI $/\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$RQ_H$			
		儿童(男)	儿童(女)	成人(男)	成人(女)
CIP	7.100	0.016	0.014	0.016	0.016
ENR	6.200	0.009	0.009	0.011	0.010
NOR	11.40	0.004	0.004	0.004	0.004
OFL	3.200	0.008	0.008	0.009	0.009
SAR	0.300	0.047	0.046	0.053	0.051

## 3 讨论

### 3.1 国内外地下水中 QNs 的污染特征

目前, 在国内外其它城市的地下水环境中, QNs 类抗生素均有检出 (表 4). 就其检出率而言, 石家庄市 QNs 检出率 (100%) 与北京市相当<sup>[20]</sup>, 较天津 (55.0%) 和巴基斯坦 (< 60.0%) 等其它区域高<sup>[12,15,39,40]</sup>. 就 QNs 浓度而言, 与北京 (ND ~ 49.5  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和天津 (31.8 ~ 42.5  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 相比, 石家庄市地下水中 QNs 浓度 (3.02 ~ 98.5  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 较高, 但其浓度低于江汉平原的沙湖县 (20.2 ~ 212  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和巴基斯坦的费萨拉巴德等 6 个主要城市 (0.01 ~ 579  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 其中, 就地下水中主要抗生素 CIP 浓度而言, 石家庄市 (平均值为 3.32  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 远低于巴基斯坦的费萨拉巴德市 (平均值为 61.6  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )、北京市 (平均值为 4.90  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和天津市 (平均值为 42.5  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 但其浓度高于韩国 (平均值为 0.38  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 与江汉平原沙湖县 (平均值为 2.72  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 浓度水平相当.

石家庄作为河北省重要的医药制造基地, 2019 年医药工业较上年增长 14.7%, 其中化学药品原药产量达 9.74 万 t; 此外, 石家庄农林牧渔业发达, 化学和医药等原药消费量达 312 万 t<sup>[41]</sup>; 且有研究表明, 石家庄市的畜禽抗生素使用量较北京市和天津市高<sup>[42]</sup>. 这可能是导致石家庄市地下水中 QNs 浓度

比北京和天津高的原因. 江汉平原沙湖县作为我国农业和水产养殖的主要基地之一, 位于亚热带季风气候, 因其水文地质条件和浅层地下水位, 进而地表水和地下水相互作用强烈<sup>[43]</sup>, 导致江汉平原 QNs 浓度较石家庄高. 而巴基斯坦可能是由于 QNs 的消耗量居首位, 且缺乏污水处理厂和对抗生素药物的管控, 造成地下水中抗生素浓度污染形势严峻<sup>[15]</sup>.

表 4 不同区域地下水 QNs 抗生素浓度<sup>1)</sup>

Table 4 Concentrations of QNs antibiotics in groundwater in different regions

地区	浓度范围	检出率	最大值	文献
	$/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	/%	$/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	
石家庄市	3.02 ~ 98.5	100	58.9	本研究
北京市	ND ~ 49.5	100	39.4	[20]
天津市	31.8 ~ 42.5	55	42.5	[39]
江汉平原沙湖县	20.2 ~ 212	>80	73.2	[12]
巴基斯坦主要 6 个城市	0.01 ~ 579	<60	561	[15]
韩国某农业区	ND ~ 4.92	78	1.58	[40]

1) ND 表示未检测到

总体而言, 本研究中除 CIP 和 ENO 外, 其它抗生素浓度均较低. 但地下水环境具有低温、缺氧和避光等特点, 不利于抗生素的光解、水解和微生物降解等物理化学和生物作用<sup>[44]</sup>. 此外, 抗生素持续释放到地下水中可能会诱导产生 ARBs 和 ARGs<sup>[45]</sup>. 鉴于 QNs 用量在我国呈逐年增加的趋势, 因此需进一步加强其在地下水环境中的监测.

### 3.2 地下水中 QNs 类抗生素与环境因子

有研究表明, 地下水环境的理化因子 (有机物含量、地下水 pH 和离子强度) 在抗生素的迁移行为中发挥着重要作用, 此外, 抗生素在地下水中的迁移亦受其自身理化特征的影响<sup>[15,46]</sup>. 本研究结果表明, 各 QNs 与环境因子呈现一定的相关性, 其中 NOR 与 pH 显著负相关 ( $P < 0.05$ ). pH 会影响 NOR 的抗菌活性, pH 值在 7 ~ 9 时, 其多以两性离子形式存在, 这有利于它的疏水性<sup>[47,48]</sup>. 本研究与巴基斯坦、江汉平原的研究结果类似, 也与 Loftin 等<sup>[49]</sup>的研究认为抗生素的水解率随着 pH 值的增大而增加的结论相一致.

与地表水中的情况类似, 温度会影响地下水环境中抗生素的浓度<sup>[50]</sup>. 有研究表明, NOR 在地下水中的吸附系数会随温度升高而降低<sup>[51]</sup>, 但本研究中 ENO、OFL 和 SAR 与温度呈显著正相关 ( $P < 0.01$  和  $P < 0.05$ ), 这与 Zainab 等<sup>[15]</sup>在古吉拉特地下水中的研究结果一致. 而本研究中温度较高的异常点位靠近槐河、沛河、磁河和潞龙河等河流, 可能是受到河流等地表水中污染源的影响, 促使地下水中抗生素的浓度较高.

此外,在厌氧条件下抗生素的生物降解率低于好氧条件<sup>[48]</sup>,而地下水环境具有低温和缺氧等特点,不利于抗生素生物降解,因此在本研究中抗生素与 TCG 和 BCTC 相关性较小.虽然地下水中微生物数量稀缺,但生物降解仍是地下水中抗生素降解的重要途径<sup>[44]</sup>.地下水环境中的微生物在抗生素长期干扰下可显著影响其种类、数量和群落结构功能,并可使群落产生抗性<sup>[52,53]</sup>,从而破坏地下水系统的平衡,对地下水系统造成威胁.有研究表明,地下水中微生物群落持续暴露在较低浓度的磺胺甲噁唑(240 ~ 520  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )中 30 d 后可引起微生物群落功能的改变<sup>[54]</sup>;此外,Zou 等<sup>[55]</sup>的研究发现洛美沙星可以影响微生物群落,使其组成发生显著变化,从而抑制微生物介导的反硝化作用,促使地下水中硝酸盐的积累.但近年来,抗生素的生物降解研究多集中于污水处理厂的活性污泥,地下水中抗生素的生物降解研究十分有限.因此,后续可能需要深入研究地下水环境中的微生物群落.

#### 4 结论

(1)石家庄地下水中 QNs 的检出率及其空间分布存在显著差异;OXO 和 FLU 的检出率最高;整体呈现东南高西北低的空间分布规律.

(2)石家庄地下水中 QNs 浓度呈现显著的空间分布特征,整体呈现南部 > 东部 > 北部 > 西部的趋势;抗生素在该区域地下水中的显著富集与医药废水和养殖废水有关.

(3)石家庄市地下水中 QNs 浓度与理化因子的相关性显著,尤其是温度和 pH.

(4)除 CIP 风险水平较高外,石家庄市地下水中 QNs 生态风险整体处于中低风险水平.

#### 参考文献:

- [1] 刘高燕. 抗生素残留对环境影响的调查研究[J]. 化工中间体, 2015, **11**(1): 13-15.  
Liu G Y. Investigations on the impact of antibiotic residues on the environment[J]. Chemical Intermediates, 2015, **11**(1): 13-15.
- [2] Kümmerer K. Antibiotics in the aquatic environment-A review-Part I[J]. Chemosphere, 2009, **75**(4): 417-434.
- [3] Qiao M, Ying G G, Singer A C, *et al.* Review of antibiotic resistance in China and its environment [J]. Environment International, 2018, **110**: 160-172.
- [4] Zheng Q, Zhang R J, Wang Y H, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotics in the Beibu Gulf, China: impacts of river discharge and aquaculture activities [J]. Marine Environmental Research, 2012, **78**: 26-33.
- [5] Liu X H, Lu S Y, Wei G, *et al.* Antibiotics in the aquatic environments: a review of lakes, China[J]. Science of the total Environment, 2018, **627**: 1195-1208.
- [6] 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 等. 冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2724-2731.  
Chai Y F, Zhang Y X, Chen M X, *et al.* Distribution and treatment of antibiotics in typical WWTPs in small towns in China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2724-2731.
- [7] 魏晓东. 广州典型排放源废水和河流水体中抗生素的污染特征研究[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2018.  
Wei X D. Contamination of antibiotics in typical emission sources and a river in Guangzhou[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [8] 申立娜, 张璐璐, 秦珊, 等. 白洋淀喹诺酮类抗生素污染特征及其与环境因子相关性研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(11): 3888-3897.  
Shen L N, Zhang L L, Qin S, *et al.* The occurrence and distribution of quinolones (QNs) and correlation analysis between QNs and physical-chemical parameters in Baiyangdian Lake, North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(11): 3888-3897.
- [9] Liu S S, Zhao H X, Lehmler H J, *et al.* Antibiotic pollution in marine food webs in Laizhou Bay, North China: trophodynamics and human exposure implication[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(4): 2392-2400.
- [10] Ma Y P, Li M, Wu M M, *et al.* Occurrences and regional distributions of 20 antibiotics in water bodies during groundwater recharge[J]. Science of the total Environment, 2015, **518-519**: 498-506.
- [11] 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.
- [12] Yao L L, Wang Y X, Tong L. Occurrence and risk assessment of antibiotics in surface water and groundwater from different depths of aquifers: a case study at Jiangnan Plain, central China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **135**: 236-242.
- [13] 祁彦洁, 刘菲. 地下水中抗生素污染检测分析研究进展[J]. 岩矿测试, 2014, **33**(1): 1-11.  
Qi Y J, Liu F. Analysis of antibiotics in groundwater: a review [J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, **33**(1): 1-11.
- [14] 郭欣妍, 王娜, 许静, 等. 5 种磺胺类抗生素在土壤中的吸附和淋溶特性[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 3083-3091.  
Guo X Y, Wang N, Xu J, *et al.* Adsorption and leaching behavior of sulfonamides in soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(11): 3083-3091.
- [15] Zainab S M, Junaid M, Rehman M Y A, *et al.* First insight into the occurrence, spatial distribution, sources, and risks assessment of antibiotics in groundwater from major urban-rural settings of Pakistan [J]. Science of the Total Environment, 2021, **791**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148298.
- [16] Gray A D, Todd D, Hershey A E. The seasonal distribution and concentration of antibiotics in rural streams and drinking wells in the piedmont of North Carolina [J]. Science of the Total Environment, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136286.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] 李辉, 陈瑀, 封梦娟, 等. 南京市饮用水源地抗生素污染特征及风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(4): 1269-1277.
- Li H, Chen Y, Feng M J, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in Nanjing drinking water sources [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1269-1277.
- [20] 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 等. 北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5074-5080.
- Chen W P, Peng C W, Yang Y, *et al.* Distribution characteristics and risk analysis of antibiotic in the groundwater in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5074-5080.
- [21] 赵卫凤, 鲍晓磊, 张媛, 等. 河北省发酵类抗生素菌渣处置现状及存在的问题[J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(31): 12417-12421.
- Zhao W F, Bao X L, Zhang Y, *et al.* Investigation on status of antibiotics fermentation residues and existing problems in Hebei [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(31): 12417-12421.
- [22] 徐艳, 张远, 郭昌胜, 等. 石家庄汪洋沟地区抗生素、抗性细菌和抗性基因污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(6): 1174-1182.
- Xu Y, Zhang Y, Guo C S, *et al.* Pollution characteristics of antibiotics and antibiotic-resistant bacteria and genes in Wangyanggou River, Shijiazhuang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(6): 1174-1182.
- [23] 李海军. 石家庄市及周边浅层地下水水质评价[J]. *工程技术研究*, 2021, **6**(6): 251-253.
- [24] 刘兆旋. 石家庄市平原区地下水水位变化特征分析及预测研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- Liu Z X. Analysis and prediction of groundwater level variation in Shijiazhuang Plain[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [25] 孙菊秋. 石家庄地下水资源动态变化及农业灌溉优化[J]. *水利规划与设计*, 2018, (8): 33-34, 74.
- Sun J Q. Dynamic changes of groundwater resources and optimization of agricultural irrigation in Shijiazhuang city [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2018, (8): 33-34, 74.
- [26] Park S, Choi K. Hazard assessment of commonly used agricultural antibiotics on aquatic ecosystems[J]. *Ecotoxicology*, 2008, **17**(6): 526-538.
- [27] Cleuvers M. Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects[J]. *Toxicology Letters*, 2003, **142**(3): 185-194.
- [28] Hernando M D, Mezcua 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.
- [29] Bengtsson-Palme J, Larsson D G J. Concentrations of antibiotics predicted to select for resistant bacteria; proposed limits for environmental regulation[J]. *Environment International*, 2016, **86**: 140-149.
- [30] Lopes T R, Costa I L Jr, Periotto F, *et al.* Antibiotic resistance in *E. coli* isolated in effluent from a wastewater treatment plant and sediments in receiver body[J]. *International Journal of River Basin Management*, 2016, **14**(4): 441-445.
- [31] 苏冰梅, 王婷, 方淑霞, 等. 喹诺酮类与磺胺类药物对枯草芽孢杆菌与大肠杆菌的联合毒性及其机制初探[J]. *环境化学*, 2015, **34**(11): 1975-1980.
- Su B M, Wang T, Fang S X, *et al.* The combined toxicity of quinolones and sulfonamides on bacillus subtilis and escherichia coli[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(11): 1975-1980.
- [32] Wang D L, Ning Q, Dong J Y, *et al.* Predicting mixture toxicity and antibiotic resistance of fluoroquinolones and their photodegradation products in *Escherichia coli*[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114275.
- [33] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷): 概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (Adult Roll) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2014.
- [34] 王同飞, 张伟军, 李立青, 等. 白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5303-5311.
- Wang T F, Zhang W J, Li L Q, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of antibiotics and polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of desilting demonstration area in Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5303-5311.
- [35] Hamscher G, Sczesny S, Höper, *et al.* Determination of persistent tetracycline residues in soil fertilized with liquid manure by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, **74**(7): 1509-1518.
- [36] Chen G L, Liu X, Tartakovsky D, *et al.* Risk assessment of three fluoroquinolone antibiotics in the groundwater recharge system[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **133**: 18-24.
- [37] Hanna N, Sun P, Sun Q, *et al.* Presence of antibiotic residues in various environmental compartments of Shandong province in eastern China: its potential for resistance development and ecological and human risk[J]. *Environment International*, 2018, **114**: 131-142.
- [38] Wang H X, Yang J Q, Yu X, *et al.* Exposure of adults to antibiotics in a Shanghai suburban area and health risk assessment: a biomonitoring-based study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(23): 13942-13950.
- [39] 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.
- [40] Lee H J, Kim K Y, Hamm S Y, *et al.* Occurrence and distribution of pharmaceutical and personal care products, artificial sweeteners, and pesticides in groundwater from an agricultural area in Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 168-176.
- [41] 金福中. 2019 石家庄统计年鉴[M]. 石家庄: 中国统计出版社, 2020.
- Jin F Z. 2019 Shijiazhuang statistical yearbook [M]. Shijiazhuang: China Statistics Press, 2020.
- [42] 凌文翠, 范玉梅, 方瑶瑶, 等. 京津冀地区畜禽养殖业抗生素污染现状分析[J]. *环境工程技术学报*, 2018, **8**(4): 390-397.
- Ling W C, Fan Y M, Fang Y Y, *et al.* Antibiotics pollution of livestock and poultry breeding in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, **8**(4): 390-397.
- [43] Gan Y Q, Wang Y X, Duan Y H, *et al.* Hydrogeochemistry and

- arsenic contamination of groundwater in the Jiangnan Plain, central China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **138**: 81-93.
- [44] 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.
- [45] Gao F Z, Zou H Y, Wu D L, *et al.* Swine farming elevated the proliferation of *Acinetobacter* with the prevalence of antibiotic resistance genes in the groundwater [J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105484.
- [46] Boy-Roura M, Mas-Pla J, Petrovic M, *et al.* Towards the understanding of antibiotic occurrence and transport in groundwater: findings from the Baix Fluvià alluvial aquifer (NE Catalonia, Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 1387-1406.
- [47] Boxall A B A, Fogg L A, Blackwell P A, *et al.* Veterinary medicines in the environment [A]. In: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. New York: Springer, 2004.
- [48] Tong L, Qin T L, Guan C, *et al.* Antibiotic resistance gene profiling in response to antibiotic usage and environmental factors in the surface water and groundwater of Honghu Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, **27**(25): 31995-32005.
- [49] Loftin K A, Adams C D, Meyer M T, *et al.* Effects of ionic strength, temperature, and pH on degradation of selected antibiotics [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(2): 378-386.
- [50] Liu X, Wang Z, Zhang L, *et al.* Inconsistent seasonal variation of antibiotics between surface water and groundwater in the Jiangnan Plain: risks and linkage to land uses [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **109**: 102-113.
- [51] Dorival-García N, Zafra-Gómez A, Navalón A, *et al.* Removal of quinolone antibiotics from wastewaters by sorption and biological degradation in laboratory-scale membrane bioreactors [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **442**: 317-328.
- [52] 方淑霞, 王大力, 朱丽华, 等. 抗生素对微生物的联合与低剂量毒性研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(2): 69-75.
- Fang S X, Wang D L, Zhu L H, *et al.* Progress in researches on toxicity of antibiotics in low dose and mixture exposure to microorganisms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(2): 69-75.
- [53] Zhang L L, Zhang C, Lian K T, *et al.* Effects of chronic exposure of antibiotics on microbial community structure and functions in hyporheic zone sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126141.
- [54] Haack S K, Metge D W, Fogarty L R, *et al.* Effects on groundwater microbial communities of an engineered 30-day in situ exposure to the antibiotic sulfamethoxazole [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(14): 7478-7486.
- [55] Zou H, He J T, Guan X Y, *et al.* Microbial responses underlying the denitrification kinetic shifting exposed to ng/L- and µg/L-level lomefloxacin in groundwater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126093.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i>	(4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i>	(4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i>	(4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i>	(4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i>	(4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i>	(4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i>	(4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i>	(4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i>	(4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i>	(4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i>	(4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i>	(4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i>	(4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i>	(4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i>	(4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i>	(4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i>	(4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i>	(4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i>	(4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i>	(4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i>	(4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i>	(4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i>	(4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i>	(4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i>	(4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i>	(4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i>	(4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i>	(4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i>	(4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i>	(4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i>	(4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i>	(4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i>	(4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i>	(4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i>	(4911)