

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

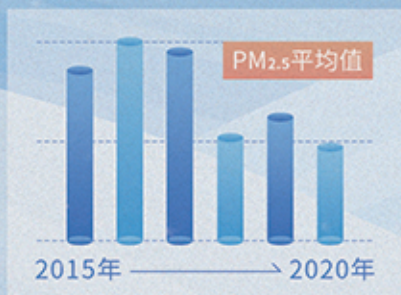
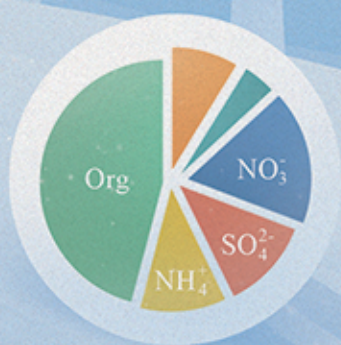
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估

李富娟¹, 高礼^{1,2,*}, 李凌云¹, 郑兰香³, 马兰⁴, 杨桂钦¹

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 教育部中阿旱区特色资源开发与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021; 3. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 4. 宁夏大学测试分析中心, 银川 750021)

摘要: 为了探究宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与潜在生态风险, 采用固相萃取-超高效液相色谱串联质谱法对第三排水沟中 14 种 PPCPs 进行检测分析. 结果表明, 14 种 PPCPs 在第三排水沟和汇入水样中均有所检出, 总浓度范围分别为 117.74 ~ 1 947.64 ng·L⁻¹ 和 63.94 ~ 4 509.39 ng·L⁻¹. 排水沟中吉非罗齐 (GEM)、咖啡因 (CAF)、阿伏苯宗 (BM-DBM)、二苯甲酮-3 (BP-3)、3-(4-甲基苯亚甲基)-樟脑 (4-MBC) 和避蚊胺 (DEET) 的检出率均达到 100%. 药物中检出浓度最高的是 GEM (7.78 ~ 721.84 ng·L⁻¹), 其次是 CAF (41.74 ~ 246.86 ng·L⁻¹); 个人护理品中检出浓度最高的是 DEET (3.17 ~ 219.91 ng·L⁻¹), 其次是 BP-3 (56.92 ~ 150.14 ng·L⁻¹). 不同采样点的 PPCPs 浓度呈现一定的空间差异, PPCPs 总浓度在流经平罗县城后猛然增加, 并在该段处达到最大, 随后呈现下降趋势. 相关性分析表明, 4-MBC 与 COD 呈显著的正相关关系 ($P < 0.01$), IBU、XMTD、TCC 和 TCS 与 NH₄⁺-N 呈较明显的正相关关系 ($P < 0.05$), DIC、BF、CBZ 和 DEET 与 TN 呈较明显的正相关关系 ($P < 0.05$), 表明 PPCPs 浓度和水质指标密切相关. 生态风险评估结果显示 DIC、IBU、GEM、CBZ、CAF 和 BP-3 具有高风险, BM-DBM、TCC 和 TCS 具有中等风险.

关键词: 第三排水沟; 药物和个人护理品 (PPCPs); 水质指标; 污染特征; 生态风险

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4087-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112080

Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia

LI Fu-juan¹, GAO Li^{1,2,*}, LI Ling-yun¹, ZHENG Lan-xiang³, MA Lan⁴, YANG Gui-qin¹

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Analysis and Testing Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To investigate the contamination characteristics and potential ecological risks of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia, 14 PPCPs were detected and analyzed using solid-phase extraction coupled with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. The results showed that these 14 PPCPs were detected in the Third Drain and its confluent streams, with total concentrations of 117.74-1 947.64 ng·L⁻¹ and 63.94-4 509.39 ng·L⁻¹, respectively. Detection ratios of gemfibrozil (GEM), caffeine (CAF), avobenzone (BM-DBM), benzophenone-3 (BP-3), 3-(4-methylbenzylidene)-camphor (4-MBC), and diethyltoluamide (DEET) were 100% in the drain. The highest-concentration pharmaceutical was GEM (7.78-721.84 ng·L⁻¹), followed by CAF (41.74-246.86 ng·L⁻¹), and the highest-concentration personal care product was DEET (3.17-219.91 ng·L⁻¹), followed by BP-3 (56.92-150.14 ng·L⁻¹). Concentrations of PPCPs at different sampling points exhibited spatial differences. The total PPCPs concentration increased dramatically and reached a maximum value after flowing through Pingluo County, then showed a decreasing trend downstream. Correlation analysis showed that 4-MBC was significantly positively correlated with COD ($P < 0.01$). IBU, XMTD, TCC, and TCS were significantly correlated with NH₄⁺-N ($P < 0.05$). DIC, BF, CBZ, and DEET were significantly correlated with TN ($P < 0.05$). The results indicated that concentrations of PPCPs were closely related to water quality indexes. Risk assessment showed that DIC, IBU, GEM, CBZ, CAF, and BP-3 had high risks, whereas BM-DBM, TCC, and TCS had moderate risks.

Key words: the Third Drain; pharmaceuticals and personal care product (PPCPs); water quality index; pollution characteristic; ecological risk

药物和个人护理品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 主要由两部分组成, 其中药物包括抗生素、激素、消炎止痛药、抗精神药物和降血脂药等; 个人护理品包括消毒剂、驱虫剂、香料、防腐剂和防晒剂等^[1]. 近年来, PPCPs 在地表水、沉积物、土壤和地下水等多种环境介质中被检出^[2,3], 相关研究备受关注, 已成为环境科学领域的研究热点. 尽管 PPCPs 在水环境中的浓度较低, 通常在 ng·L⁻¹ ~ μg·L⁻¹ 水平, 但这类物质往往具有较高生物活性, 长期存在于水环境中可以诱发

水生生物生化功能改变, 进而影响其生长发育和繁殖, 对生态环境和生物健康构成潜在风险^[4].

宁夏位于黄河上游, 是黄河流域生态保护和高质量发展先行区. 作为我国古老的大型灌区之一, 排水沟已成为宁夏地表水环境的重要组成部分, 发挥着

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21607087); 宁夏回族自治区重点研发项目 (2019BFG02032, 2020BEB04008); 宁夏自然科学基金项目 (2021AAC05004)

作者简介: 李富娟 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新型污染物的环境行为和生态毒理, E-mail: 2487440665@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoli@nxu.edu.cn

接纳农田退水、生活污水和工业废水的功能. 入黄排水沟水质的的好坏, 直接影响着地区水生态环境和黄河干流宁夏段的水体质量^[5]. 区内 13 条入黄排水沟经近年来的综合整治后, 水质明显改善, 但部分断面仍不能达到目标水质, 为 V 类或劣 V 类水体. 其中, 第三排水沟是宁夏最长的排水水系, 承担着沿途约 966.67 km² 农田的排水任务, 同时接纳贺兰县暖泉工业区、大武口区、平罗县和惠农区的城镇生活污水和工业废水, 水质状况不容乐观. 本课题组前期研究发现, 第三排水沟中抗生素类药物的污染普遍存在^[6]. 本研究将进一步分析第三排水沟中除抗生素以外的 14 种 PPCPs 的污染特征, 探讨相关环境参数与目标污染物之间的相关性, 并进行生态风险评价, 以期为宁夏制定 PPCPs 控制策略提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

LTQ 超高效液相色谱仪 (Thermo Fisher Scientific, 美国), 静电场轨道阱质谱仪 (Orbitrap

XL), 12 位防交叉污染固相萃取装置 (Supelco, visiprepTM 12DL), 固相萃取小柱 Oasis HLB (6 mL, 500 mg, Waters), Milli-Q Advantage 型超纯水仪 (美国 Milli Pore).

PPCPs 标准品如下. 3 种抗炎药: 对乙酰氨基酚 (APAP)、双氯芬酸 (DIC) 和布洛芬 (IBU); 2 种降血脂药: 苯扎贝特 (BF) 和吉非罗齐 (GEM); 1 种抗溃疡药: 西咪替丁 (XMTD); 1 种抗癫痫药: 卡马西平 (CBZ); 1 种兴奋剂: 咖啡因 (CAF); 3 种紫外防晒剂: 阿伏苯宗 (BM-DBM)、二苯甲酮-3 (BP-3) 和 3-(4-甲基苯亚甲基)-樟脑 (4-MBC); 2 种抑菌剂: 三氯卡班 (TCC) 和三氯生 (TCS); 1 种驱虫剂: 避蚊胺 (DEET). 所有 PPCPs 标准品的纯度均 >97%, 购于 TCI 和 Sigma 公司. 另外, Ibuprofen-d₃ (IBU-d₃)、Caffeine-¹³C₃ (CAF-¹³C₃) 和 Triclocarban-d₄ (TCC-d₄) 作为内标指示物, 分别购于 Cato、Sigma 和 C/D/N ISO Topes 公司. 甲醇 (色谱纯) 和二氯甲烷 (色谱纯) 购自美国 Thermo Fisher 公司. 14 种目标 PPCPs 理化参数见表 1.

表 1 目标化合物理化性质和质谱参数

Table 1 Physical and chemical properties and mass spectrometric parameters of target compounds

分类	化合物	缩写	CAS	分子式	lg K _{ow}	pK _a	电离模式
抗炎药	对乙酰氨基酚	APAP	103-90-2	C ₈ H ₉ NO ₂	0.46	9.39	ESI ⁺
	双氯芬酸	DIC	644-62-2	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ NO ₂	4.51	4.15	ESI ⁻
	布洛芬	IBU	15687-27-1	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	3.97	4.91	ESI ⁻
降血脂药	苯扎贝特	BF	41859-67-0	C ₁₉ H ₂₀ ClNO ₄	1.55	3.83	ESI ⁻
	吉非罗齐	GEM	25812-30-0	C ₁₅ H ₂₂ O ₃	3.61	4.42	ESI ⁻
抗溃疡药	西咪替丁	XMTD	51481-61-9	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	0.40	6.8	ESI ⁺
抗癫痫药	卡马西平	CBZ	298-46-4	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O	2.45	13.9	ESI ⁺
兴奋剂	咖啡因	CAF	5743-12-4	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	-0.07	10.4	ESI ⁺
紫外防晒剂	阿伏苯宗	BM-DBM	70356-09-1	C ₂₀ H ₂₂ O ₃	4.51	4.81	ESI ⁺
	二苯甲酮-3	BP-3	131-57-7	C ₁₄ H ₁₂ O ₃	3.52	7.6	ESI ⁺
	3-(4-甲基苯亚甲基)-樟脑	4-MBC	36861-47-9	C ₁₈ H ₂₂ O	5.92	7.92	ESI ⁺
抑菌剂	三氯卡班	TCC	101-20-2	C ₁₃ H ₉ Cl ₃ N ₂ O	4.9	12.7	ESI ⁻
	三氯生	TCS	3380-34-5	C ₁₂ H ₇ Cl ₃ O ₂	4.8	7.8	ESI ⁻
驱虫剂	避蚊胺	DEET	134-62-3	C ₁₂ H ₁₇ NO	2.18	—	ESI ⁺
内标	布洛芬-d ₃	IBU-d ₃	121662-14-4	C ₁₃ H ₁₅ D ₃ O ₂	—	—	ESI ⁻
	咖啡因- ¹³ C ₃	CAF- ¹³ C ₃	78072-66-9	¹³ C ₃ C ₅ H ₁₀ N ₄ O ₂	—	—	ESI ⁺
	三氯卡班-d ₄	TCC-d ₄	1219799-29-7	C ₁₃ H ₅ D ₄ Cl ₃ N ₂ O	—	—	ESI ⁻

1.2 样品采集与水质指标测定

于 2021 年 7 月在宁夏第三排水沟及水流汇入口采样, 具体采样点位置见图 1. 从贺兰县团结沟开始每隔 5 ~ 10 km 设置一个采样点, 共取排水沟水样 18 个 (S1 ~ S18), 其中, S1 ~ S4 位于上游贺兰段, S5 ~ S11 位于中游平罗段, S12 ~ S18 位于下游惠农段; 同时采集排水沟汇入水样 13 个 (W1 ~ W13). 采集的水样存储在预先洗净的 1 L 棕色玻璃瓶中, 用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤水样后, 4℃ 下避光冷藏直至样品预处理. 现场采用便携式多参数分析仪

(sensION156, 美国 HACH) 测定水样的温度、pH 值、电导率 (EC) 和溶解氧 (DO) 等参数. 水样中 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的浓度测定方法见文献 [6].

1.3 样品前处理与分析

取 1 L 水样分别加入 0.2 g Na₂EDTA 和 50 μL 混合内标 (浓度为 1 mg·L⁻¹), 搅拌至完全溶解后, 老化 30 min. 依次用 10 mL 甲醇和高纯水对 HLB 固相萃取小柱进行活化; 将老化后的水样通过小柱, 流速控制在 3 ~ 5 mL·min⁻¹; 用 10 mL 超纯水清洗



图1 采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of sampling sites

小柱并在真空状态下干燥 0.5 h; 用 6 mL 甲醇和 6 mL 甲醇/二氯甲烷(1:1, 体积比) 对目标物进行洗脱, 洗脱液氮吹浓缩至恰好吹干, 用甲醇定容至 1 mL, 用 0.22 μm 针筒过滤器过滤后, 保存于自动进样样品瓶中, 进行仪器检测。

采用超高效液相色谱-静电场轨道阱质谱联用仪进行样品分析. 其中正离子的色谱柱为 Accucore™ C18 (150 mm $\times$ 2.1 mm, 2.6 μm); 柱温为 35℃; 进样体积为 5 μL ; 流速为 0.35 mL $\cdot$ min⁻¹; 流动相 A 为 0.1% 的甲酸水溶液, 流动相 B 为乙腈. 离子源采用电喷雾离子源 (ESI⁺), 多反应检测 (MRM) 模式分析. 毛细管电压为 8.0 V; 喷雾电压为 4 500 V; 管透镜压力为 50 V; 毛细管温度为 350℃; 鞘层气体流速为 20 arb; 辅助气体流速则为 5 arb. 负离子的色谱柱为 Hypersil gold AQ (100 mm $\times$ 2.1 mm, 1.9 μm); 柱温为 35℃; 进样体积为 5 μL ; 流速是 0.3 mL $\cdot$ min⁻¹; 流动相 A 为 0.1% 的甲酸水溶液, 流动相 B 为甲醇. 离子源采用电喷雾离子源 (ESI⁻), 多反应检测 (MRM) 模式分析. 毛细管电压为 -30 V; 喷雾电压为 5 000 V; 管透镜压力为 -50 V; 毛细管温度为 350℃; 鞘层气体流速为 40 arb; 辅助气体流速为 10 arb. 正负离子的梯度洗脱条件见表 2.

1.4 质量保证与控制

本实验使用的玻璃瓶均在重铬酸钾溶液中浸泡 24 h, 去离子水和超纯水各润洗 3 次, 再用烘箱烘干. 样品采用内标法进行定量, 各目标化合物的线性相关系数 $r^2 > 0.99$, 满足要求. 在 1 L 超纯水中加入 50 ng PPCPs 混合标准品, 设置 3 个平行样, 测定 PPCPs 浓度并计算加标回收率, 范围为 66.00% ~ 118.00%, 相对标准偏差为 3.78% ~ 14.30%. 各目标化合物的检出限在 0.01 ~ 0.55 ng $\cdot$ L⁻¹ 之间, 定量

表2 14 种 PPCPs 的正负离子模式下的梯度洗脱条件

Table 2 Gradient elution condition of 14 PPCPs in positive and negative ion models					
时间 /min	正离子		时间 /min	负离子	
	流动相 A /%	流动相 B /%		流动相 A /%	流动相 B /%
0	90	10	0	50	50
1	90	10	1.5	50	50
5	50	50	6	10	90
9	50	50	8	10	90
10	5	95	8.2	50	50
13	5	95	12	50	50
13.5	90	10			
15	90	10			

限在 0.04 ~ 1.85 ng $\cdot$ L⁻¹ 之间. 实验过程中每隔 10 个样品, 设置 1 个空白样品、2 个平行样品. 其中, 空白样品中未检出这 14 种 PPCPs, 平行样品的相对标准偏差在 0.12% ~ 6.28% 之间, 符合实验要求.

1.5 生态风险评价方法

根据欧盟关于生态风险评价的技术指导, 采用风险商值法 (RQs) 评价第三排水沟中的生态风险等级. 具体方法见文献[6]. PPCPs 的毒性数据、评价因子 (AF) 和预测无效应浓度 (PNEC) 值见表 3. RQs 分类方法中, RQs < 0.1 为低风险; 0.1 $\leq$ RQs < 1.0 为中等风险; RQs $\geq$ 1.0 为高风险.

表3 14 种 PPCPs 最敏感物种毒性数据

Table 3 Most sensitive species toxicity data of 14 PPCPs					
PPCPs	最敏感物种	毒性数据 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	评价因子	PNEC /ng $\cdot\text{L}^{-1}$	文献
APAP	大型蚤	2040	1 000	2 040	[7]
DIC	虹鳟鱼	0.46	20	23	[8]
IBU	蚤状钩虾	0.01	20	0.5	[8]
BF	网纹蚤	23	100	230	[9]
GEM	斑马鱼	0.38	20	19	[8]
XMTD	水蚤	35 000	1 000	35 000	ECOSAR
CBZ	蚤状钩虾	0.01	10	1	[8]
CAF	大西洋鲑鱼	0.01	10	1	[8]
BM-DBM	藻类	260	1 000	260	ECOSAR
BP-3	等鞭金藻	14	100	140	[10]
4-MBC	等鞭金藻	171	100	1 710	[10]
TCC	美洲糠虾	0.06	10	6	[8]
TCS	菲律宾蛤仔	0.3	10	30	[8]
DEET	大型蚤	3 440	100	34 400	[11]

2 结果与讨论

2.1 第三排水沟中 PPCPs 的浓度水平

第三排水沟及汇入水样中 14 种 PPCPs 的浓度水平检测结果见表 4. 从中可知, 第三排水沟水样中这 14 种 PPCPs 广泛存在. 检测的 8 种药物中, 降血脂药 GEM 和兴奋剂 CAF 的检出率达到 100%; 3 种抗炎药 APAP、DIC 和 IBU 的检出率在 31% ~ 61% 之间; 另一种降血脂药 BF 只在一个样品中被检出,

说明该药物在当地的使用率不高. 6 种个人护理品中有机紫外防晒剂 BM-DBM、BP-3 和 4-MBC 以及驱虫剂 DEET 的检出率均达 100%; 两种抑菌剂 TCC 和 TCS 的检出率均为 56%. 排水沟水样中这 14 种 PPCPs 的总浓度范围为 117.74 ~ 1 947.64 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中, 检出浓度最高的两种药物依次为 GEM 和 CAF, 浓度最高值分别为 721.84 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 246.86 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 各点位药物浓度存在差异, 二者浓度平均值分别为 145.35 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 124.57 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 个人护理品中检出浓度最高的是 DEET, 浓度最高值为 219.91 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 61.84 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 其次

为 BP-3, 浓度最高值为 150.14 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 97.24 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

13 个汇入水样中, 检出率达到 100% 的 PPCPs 分别为 CAF、BM-DBM、BP-3 和 DEET, 其它检出率大于 50% 的化合物有 GEM、APAP、4-MBC 和 TCC. 汇入水样的 PPCPs 总浓度为 63.94 ~ 4 509.40 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 单种物质平均浓度最大的两种药物依次为 DIC (551.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 CAF (139.73 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$); 浓度最大的两种个人护理品与排水沟水样相同, 依然为 BP-3 和 DEET, 二者浓度平均值分别为 100.03 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 74.80 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 4 第三排水沟及汇入水样中 PPCPs 的检出浓度和频率¹⁾

Table 4 Concentration and frequency of PPCPs detected in the Third Drain

化合物	排水沟水样检出浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$				频率 ($n=18$)/%	汇入水样检出浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$				频率 ($n=13$)/%
	最小值	最大值	平均值	中位数		最小值	最大值	平均值	中位数	
APAP	ND	40.85	12.01	6.38	50	ND	44.69	17.56	13.12	62
DIC	ND	184.72	43.20	7.31	61	ND	2 562.33	551.82	2.50	31
IBU	ND	236.43	67.64	12.55	31	ND	45.36	22.68	22.68	8
BF	ND	4.98	4.98	4.98	6	ND	12.86	6.43	6.43	8
GEM	7.78	721.84	145.35	91.44	100	0	272.73	57.32	24.29	92
XMTD	ND	12.88	7.66	7.66	11	ND	228.19	128.28	128.28	15
CBZ	ND	6.64	3.68	3.74	33	ND	40.94	18.96	8.50	23
CAF	41.74	246.86	124.57	107.19	100	6.97	472.07	139.73	95.86	100
BM-DBM	5.74	81.37	39.93	38.85	100	6.97	82.50	44.81	42.03	100
BP-3	56.92	150.14	97.24	95.26	100	49.22	240.68	100.03	81.92	100
4-MBC	2.39	31.58	13.01	8.79	100	ND	34.18	11.37	7.43	85
TCC	ND	1.73	1.49	1.47	56	ND	7.06	2.30	1.42	54
TCS	ND	7.71	6.60	6.36	56	ND	60.01	17.20	6.59	38
DEET	3.17	219.91	61.84	42.74	100	0.78	405.78	74.80	10.83	100
总和	117.74	1 947.64	629.19	434.70		63.94	4 509.40	1 193.29	451.88	

1) ND 表示未检出

受人类活动、畜禽养殖和水产养殖的影响, 不同地区水体中 PPCPs 的检出率和污染水平存在一定的差异. 总体上, 第三排水沟的 PPCPs 浓度相较于中国其他地区水体处于中等的水平(表 5), GEM、CAF、BP-3 和 DEET 是各采样点污染水平较高的化合物. 本研究检测了两种降血脂药物 BF 和 GEM, 其中 GEM 的检出率和检出浓度均远高于 BF, 说明 GEM 在当地被广泛使用. 比较来看, 第三排水沟中 GEM 的检测浓度(7.78 ~ 721.84 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 高于我国大部分地表水体的污染水平, 但远低于北运河的检出浓度(0 ~ 3 768.70 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12]. CAF 是一类天然物质, 存在于多种植物中, 同时也是一种最普遍使用的精神药品. 该化合物已成为国内外水环境中的主要污染物之一, 可用作人类活动污染的指示剂. 第三排水沟检测到的 CAF 浓度范围为 41.74 ~ 246.86 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 略高于任丙南等^[13]报道的三亚市地表水(4.51 ~ 220.78 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 但最大检出浓度远低于北运河(21 885.60 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12]、白洋淀(2 310.00

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[14] 和九龙江(1 920.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[15]. 关于我国地表水中有机紫外防晒剂污染的报道较少, 第三排水沟中 BP-3 的浓度最大值为 150.14 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于湘江(1.80 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[16], 但明显低于九龙江(532.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[15] 和 黄 浦 江 (5 010.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[17]; 同时在第三排水沟各采样点还检出了 BM-DBM 和 4-MBC 两种紫外防晒剂, 浓度范围依次为 5.74 ~ 81.37 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.39 ~ 31.58 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. DEET 对蚊子、苍蝇、跳蚤等有显著的驱散效果, 被广泛添加在花露水等个人护理品中, 在全球水环境中普遍可见. 第三排水沟中 DEET(3.17 ~ 219.91 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 的污染水平高于太湖(6.53 ~ 19.35 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[18]、洞庭湖(2.12 ~ 11.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19] 和天津市地表水(0 ~ 173.76 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[20], 但远低于北运河(23.20 ~ 2 643.90 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12] 和 骆 马 湖 (95.40 ~ 326.51 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[21].

2.2 第三排水沟中 PPCPs 的空间分布特征

第三排水沟中 PPCPs 的空间分布见图 2. 采样

表 5 目标化合物与国内部分水体中的浓度对比¹⁾/ng·L⁻¹

Table 5 Comparison of the concentrations of target compounds in some water bodies in China/ng·L⁻¹

PPCPs	水体	浓度	PPCPs	水体	浓度
APAP	本研究	ND ~ 40. 85	CBZ	黄河	ND ~ 6. 39 ^[22]
	松花江	ND ~ 6. 00 ^[23]		洞庭湖	ND ~ 0. 11 ^[19]
	白洋淀	ND ~ 71. 95 ^[24]		汉江	0. 99 ~ 6. 68 ^[25]
	北京市地表水	ND ~ 200. 00 ^[1]	CAF	本研究	41. 74 ~ 246. 86
	骆马湖	0 ~ 11. 28 ^[21]		松花江	2. 20 ~ 26. 30 ^[23]
	洞庭湖	ND ~ 3. 04 ^[19]		北运河	0 ~ 21 885. 60 ^[12]
DIC	本研究	ND ~ 184. 72		白洋淀	10. 70 ~ 2310. 00 ^[14]
	松花江	ND ~ 10. 20 ^[23]		北京市地表水	1. 75 ~ 655. 00 ^[1]
	北运河	0 ~ 986. 50 ^[12]		太湖	5. 71 ~ 25. 77 ^[26]
	九龙江	1. 27 ~ 8. 88 ^[15]		大龙湖	32. 00 ~ 71. 00 ^[27]
	淀山湖	ND ~ 22. 67 ^[28]		九龙江	129. 00 ~ 1 920. 00 ^[15]
	黄浦江	ND ~ 25. 00 ^[29]		鄱阳湖	ND ~ 29. 10 ^[30]
	广州市地表水	ND ~ 20. 80 ^[31]		骆马湖	5. 65 ~ 41. 01 ^[21]
	洞庭湖	ND ~ 11. 10 ^[19]		黄浦江	8. 30 ~ 548. 00 ^[32]
	汉江	0 ~ 17. 90 ^[25]		长江	50. 30 ~ 786. 00 ^[30]
	金沙江	ND ~ 4. 20 ^[33]		三亚市地表水	4. 51 ~ 220. 78 ^[13]
IBU	本研究	ND ~ 236. 43	BM-DBM	洞庭湖	2. 76 ~ 4. 23 ^[19]
	松花江	ND ~ 14. 30 ^[23]		湘江	ND ~ 21. 60 ^[34]
	北运河	ND ~ 369. 10 ^[35]		金沙江	8. 72 ~ 507. 15 ^[33]
	太湖	BLD ~ 1. 48 ^[26]		本研究	5. 74 ~ 81. 37
	九龙江	2. 73 ~ 20. 70 ^[15]	BP-3	本研究	56. 92 ~ 150. 14
	淀山湖	ND ~ 13. 02 ^[28]		九龙江	BLD ~ 532. 00 ^[15]
	广州市地表水	ND ~ 32. 60 ^[31]		黄浦江	68. 5 ~ 5010. 00 ^[17]
	金沙江	ND ~ 19. 97 ^[33]		湘江	ND ~ 1. 80 ^[16]
BF	本研究	ND ~ 4. 98	4-MBC	本研究	2. 39 ~ 31. 58
	北运河	0 ~ 713. 90 ^[12]		本研究	ND ~ 1. 73
	白洋淀	BLD ~ 61. 90 ^[14]	TCC	九龙江	1. 77 ~ 12. 60 ^[15]
	三亚市地表水	0. 13 ~ 2. 12 ^[13]		淀山湖	ND ~ 0. 84 ^[28]
GEM	洞庭湖	ND ~ 0. 03 ^[19]		骆马湖	2. 56 ~ 4. 26 ^[36]
	本研究	7. 78 ~ 721. 84		广州市地表水	2. 37 ~ 135. 00 ^[31]
	北运河	0 ~ 3768. 70 ^[12]		汉江	0 ~ 1. 06 ^[25]
	天津市地表水	0 ~ 78. 31 ^[20]		湘江	ND ~ 7. 20 ^[16]
	九龙江	BLD ~ 0. 27 ^[15]		金沙江	ND ~ 0. 02 ^[33]
	骆马湖	29. 00 ~ 45. 00 ^[36]	TCS	本研究	ND ~ 7. 71
	黄浦江	ND ~ 20. 00 ^[29]		松花江	ND ~ 1. 50 ^[23]
	广州市地表水	ND ~ 0. 88 ^[31]		九龙江	0. 298 ~ 1. 08 ^[15]
	洞庭湖	ND ~ 3. 69 ^[19]		淀山湖	ND ~ 6. 44 ^[28]
	汉江	0 ~ 1. 69 ^[25]		广州市地表水	5. 06 ~ 253. 00 ^[31]
XMTD	本研究	ND ~ 12. 88		汉江	0 ~ 26. 35 ^[25]
CBZ	本研究	ND ~ 6. 64		湘江	ND ~ 8. 00 ^[16]
	北运河	0 ~ 788. 70 ^[12]	DEET	本研究	3. 17 ~ 219. 91
	白洋淀	ND ~ 1810. 00 ^[14]		北运河	23. 20 ~ 2 643. 90 ^[12]
	北京市地表水	ND ~ 49. 00 ^[1]		天津市地表水	0 ~ 173. 76 ^[20]
	太湖	0. 63 ~ 1. 86 ^[26]		太湖	6. 53 ~ 19. 35 ^[18]
	骆马湖	1. 41 ~ 8. 54 ^[21]		骆马湖	95. 40 ~ 326. 51 ^[21]
	黄浦江	5. 00 ~ 75. 50 ^[37]		洞庭湖	2. 12 ~ 11. 50 ^[19]
	三亚市地表水	ND ~ 1. 45 ^[13]			

1) ND 表示未检出, BLD 表示低于检出限

点 S1 ~ S4 位于上游贺兰段, PPCPs 的总浓度范围为 205. 00 ~ 1 142. 01 ng·L⁻¹. 其中, 采样点 S2 检测到的 PPCPs 总浓度最高, 占比较大的两种化合物依次为 GEM (721. 84 ng·L⁻¹) 和 DIC (136. 10 ng·L⁻¹), 这可能与周边村庄生活污水的汇入有关, DIC 作为一种非甾体抗炎药, 不仅用于治疗各种炎症, 还广泛

用于畜牧和水产养殖^[38], 因此鱼塘分布是导致该点 DIC 浓度较高的原因之一. 在采样点 S3 (PPCPs 总浓度为 802. 52 ng·L⁻¹) 下游, 有两支污染较小的水流汇入 (W1 和 W2 的 PPCPs 总浓度分别为 239. 72 ng·L⁻¹ 和 281. 80 ng·L⁻¹), 加之化合物在水体流动过程中被吸附和降解, 从而使得采样点 S4 的 PPCPs

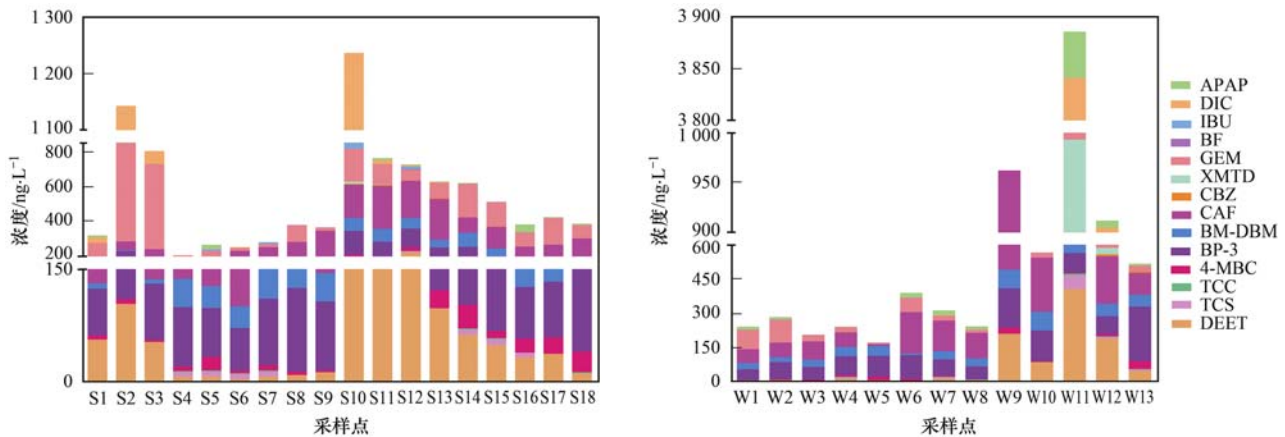


图2 第三排水沟及汇入水中 PPCPs 的浓度水平和分布特征

Fig. 2 Concentration level and distribution characteristics of PPCPs in the Third Drain

总浓度最低,仅为 $205.00 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 采样点 S4 污染贡献最高的化合物为紫外防晒剂 BP-3, 浓度达到 $79.44 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 这也反映出在自然条件下这类化合物相对不易降解.

采样点 S5 ~ S11 位于中游平罗段, PPCPs 总浓度范围在 $250.41 \sim 1\,236.26 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 这 7 个采样点的总浓度变化顺序为: $S10 > S11 > S8 > S9 > S7 > S5 > S6$. 该段 PPCPs 总浓度在采样点 S9 及上游各点波动幅度不大, 但至采样点 S10, 总浓度猛然增加到 $1\,236.26 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 是采样点 S9 的 3 倍以上. 主要原因是排水沟流经平罗县城所在地后, 接纳了县城生活污水(平罗县第一、第二污水处理厂出水, W11, 总浓度为 $3885.43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、循环经济试验园污水处理厂(W9, 总浓度为 $961.80 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)和医药园区污水处理厂(W12, 总浓度为 $910.94 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)的出水. 此外, 接收了暖泉工业园区工业废水和部分生活污水的三二支沟(W10, $565.99 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)也在该区段内汇入, 从而导致采样点 S10 的 PPCPs 污染最为严重. 其中, 占比最大的是 IBU, 浓度达 $236.43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 此外, DIC、GEM、CAF、BP-3 和 DEET 的浓度均高于 $100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 采样点 S11 位于平罗县和惠农区的分界断面, 第三排水沟的第二大支沟——十二分沟(W13, 总浓度为 $516.82 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)在该点上游 6 km 处汇入, PPCPs 总浓度达 $761.47 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, CAF 和 DEET 作为两种主要污染物, 浓度分别为 $246.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $167.39 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. CAF 作为咖啡、茶、功能饮料等的主要成分, 主要来自生活污水, 受十二分沟汇入影响, 采样点 S11 的 CAF 浓度达到最大.

下游惠农段共设置 7 个采样点(S12 ~ S18), PPCPs 总浓度范围在 $378.25 \sim 724.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 随着水流流动, 化合物的总浓度呈现下降趋势. 采样点 S12 的 PPCPs 总浓度为 $724.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, CAF 和 DEET 为两种主要污染物, 浓度分别为 213.30

$\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $219.91 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 第三排水沟未与第五排水沟汇合之前采样点 S17 的 PPCPs 总浓度为 $419.84 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 汇合后经人工湿地处理, 入黄口采样点 S18 的 PPCPs 总浓度下降为 $382.06 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 但是该点的 CAF 浓度($123.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)高于汇合前, 可能是第五排水沟中该化合物浓度较高所致.

2.3 水质指标与 PPCPs 的相关性分析

第三排水沟水样的 pH 的变化区间为 $6.70 \sim 7.39$; 水温的变化区间为 $26.40 \sim 35.80^\circ\text{C}$, 受采样时间影响; EC 的变化区间为 $0.98 \sim 6.55 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; DO 的变化区间为 $2.03 \sim 21.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 的检测结果见图 3. 第三排水沟水样 $\rho(\text{COD})$ 变化区间为 $39.71 \sim 118.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均超过地表水 IV 标准限值, 超标倍数为 $1.32 \sim 3.96$, 其中, 采样点 S13 的 COD 浓度最大. $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 变化区间为 $0.57 \sim 3.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超标率为 39%, 最大浓度和最小浓度分别出现在采样点 S4 和 S1, 其中采样点 S4 的超标倍数为 2.65. $\rho(\text{TN})$ 变化区间为 $1.99 \sim 10.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超标率达到 100%, 最大浓度出现在采样点 S12, 超过标准限值 6 倍以上. $\rho(\text{TP})$ 变化区间为 $0.08 \sim 0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 除采样点 S8 外, 各采样点的 TP 均未超标. 相对于春、冬灌期, 7 月农田退水量较少, 排水沟水质主要受生活污水和工业废水影响. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 一般由有机氮分解产生, 人体排泄物是有机氮的主要排放来源. 第三排水沟中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 超标率不足 40%, 但所有采样点 TN 均超标, 可能是水中有机氮浓度较高所致, 提示在第三排水沟沿途存在未经处理的生活污水被直接排入的现象. 此外, 夏季排水沟中植物长势较好, 可有效吸收水中 N、P 营养物质, 进而使得水中 TP 浓度普遍较低.

为了进一步研究第三排水沟中的 PPCPs 浓度与水质指标的关系, 对水体 PPCPs 的检测浓度与水

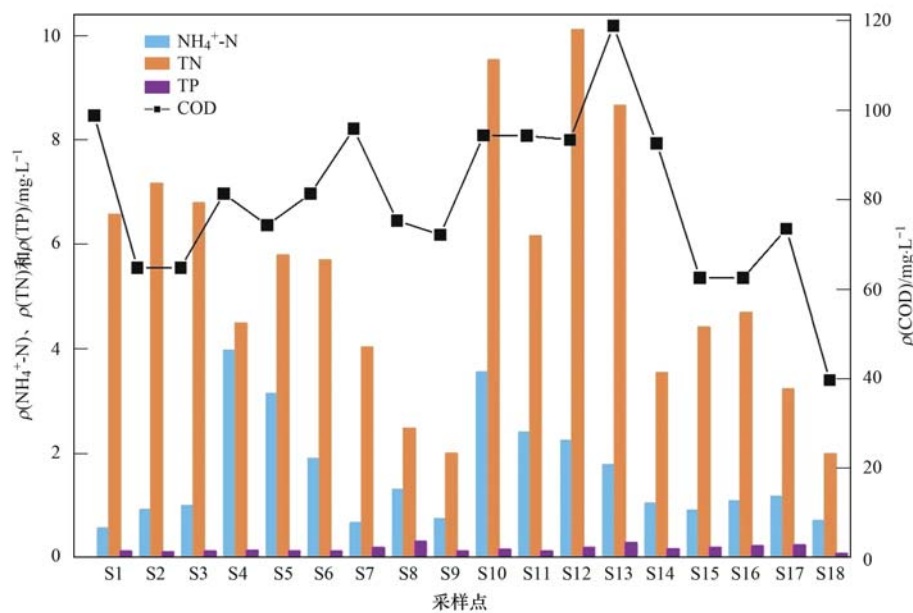


图3 第三排水沟水质指标
Fig. 3 Water quality in the Third Drain

质指标 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 进行相关性分析, 结果见表 6。PPCPs 大多是人造化学物质, 它们的存在与特定的人类和兽医用途有关。第三排水沟中, 4-MBC 浓度与 COD 值呈显著相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.74。COD 反映污水中有机物的污染程度, COD 浓度越高, 有机物污染越严重^[39]。药物 (DIC、IBU、BF、XMTD、CBZ) 和个人护理品 (TCC、TCS、DEET) 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 TN 呈较明显的正相关关系, 表明这些化合物的来源相似, 生活污水可能是它们的共同来源。此外, 所有的 PPCPs 浓度与 TP 均无明显的相关关系, 可能与第三排水沟中 TP 的浓度整体较低有关。

表 6 第三排水沟中 PPCPs 浓度与水质指标的相关性分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis of PPCPs concentration and water quality indexes in the Third Drain

	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP
APAP	0.22	0.05	0.15	0.03
DIC	-0.34	0.22	0.53 *	-0.26
IBU	-0.08	0.48 *	0.44	-0.03
BF	-0.07	0.15	0.48 *	0.08
GEM	-0.21	-0.24	0.25	-0.20
XMTD	-0.08	0.49 *	0.43	-0.07
CBZ	0.03	0.43	0.55 *	0.13
CAF	-0.02	0.17	0.31	0.14
BM-DBM	0.39	0.35	0.12	0.33
BP-3	0.33	-0.02	0.07	0.17
4-MBC	0.74 **	0.05	0.14	0.21
TCC	0.11	0.51 *	0.12	-0.32
TCS	0.19	0.49 *	0.23	-0.07
DEET	-0.03	0.31	0.76 **	0.01

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.4 PPCPs 的生态风险评价

根据已经检测到的 PPCPs 浓度, 计算出相应 RQs 值, 结果见图 4。药物中 APAP、BF、XMTD 在所有采样点的 RQs 值均 < 0.1 , 表明第三排水沟中这些化合物的生态风险可忽略不计。DIC 在采样点 S5、S6、S11、S12 和 S13 的 RQs 值在 0.1 ~ 1.0 之间, 表现为中等风险。GEM 在采样点 S4、S6、S7 和 S9 的 RQs 值介于 0.1 ~ 1.0 之间, 表现为中等风险。DIC 在采样点 S1、S2、S3 和 S10 的 RQs 值大于 1, 表现为高风险。IBU 在采样点 S5、S7、S10 和 S12 的 RQs 值大于 1, 表现为高风险。除采样点 S4、S6、S7 和 S9 外, GEM 在其余 14 个采样点的 RQs 值均大于 1, 表现为高风险。CBZ 在采样点 S10、S11、S12、S13 和 S15 的 RQs 值 > 1.0 , 表现为高风险, 主要原因是在采样点 S10 上游有 3 个污水处理厂 (循环经济试验园污水处理厂、平罗县第一、第二污水处理厂和医药园区污水处理厂) 的出水汇入, 同时三二支沟和十二分沟也分别在采样点 S10 和 S11 上游汇入, 进而使得采样点 S10、S11、S12 和 S13 的 CBZ 检出浓度较高, 生态风险相应地也较高。CAF 在所有采样点的 RQs 值均 > 1.0 , 表现为高风险, 应该引起关注。个人护理品中紫外防晒剂 4-MBC 在所有采样点均表现为低风险; BM-DBM 在采样点 S4 ~ S17 的 RQs 值介于 0.1 ~ 1.0 之间, 属于中风险; BP-3 在采样点 S14 表现为高风险, 其余采样点均表现为中等风险。抑菌剂 TCC 和 TCS 在多数采样点的 RQs 值范围在 0.1 ~ 1.0 之间, 提示具有中风险。驱虫剂 DEET 在所有采样点的 RQs 值均 < 0.1 , 表明第三排水沟中 DEET 的生态风险可忽略不计。

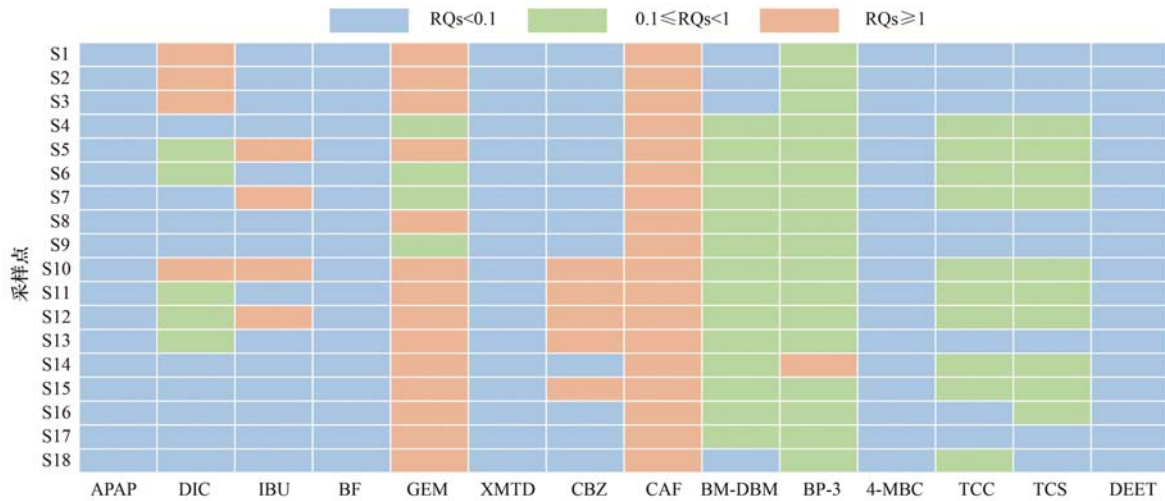


图4 第三排水沟中 PPCPs 的风险商

Fig. 4 RQs of detected PPCPs in the Third Drain

综上,第三排水沟中 APAP、BF、XMTD、4-MBC 和 DEET 表现为低风险; BM-DBM、TCC 和 TCS 表现为中等风险; DIC、IBU、GEM、CBZ、CAF 和 BP-3 则表现为高风险. 本文的生态风险评价基于风险商值法对单一化合物进行生态风险评估. 而水环境中 PPCPs 是多种共存的,目前缺乏对环境中存在的 PPCPs 进行联合风险评价,今后应进行更多化合物和更多级别的复合生态毒理效应的研究.

3 结论

(1)第三排水沟中存在 PPCPs 的污染,水样和汇入水样中均检测到 14 种 PPCPs. 其中,水样中 PPCPs 总浓度范围为 $117.74 \sim 1947.64 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. GEM、CAF、BM-DBM、BP-3、4-MBC 和 DEET 的检出率均达到 100%,检出浓度最高的化合物依次为 GEM($7.78 \sim 721.84 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、CAF($41.74 \sim 246.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、IBU($\text{ND} \sim 236.43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)和 DEET($3.17 \sim 219.91 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$). 汇入水样中 PPCPs 总浓度水平为 $63.94 \sim 4509.39 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,检出率达到 100% 的化合物有 CAF、BM-DBM、BP-3 和 DEET. 检出浓度最高的化合物是 DIC($\text{ND} \sim 2562.33 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$). 从空间分布上来看,PPCPs 总浓度在流经平罗县城后呈上升趋势,并在该段达到最大,随后,呈现下降趋势.

(2)相关性分析结果表明,4-MBC 与 COD 呈显著的正相关关系($P < 0.01$),IBU、XMTD、TCC 和 TCS 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈较明显的正相关关系($P < 0.05$),DIC、BF、CBZ 和 DEET 与 TN 呈较明显的正相关关系($P < 0.05$),但这 14 种 PPCPs 的浓度与 TP 均无明显的相关关系.

(3)利用风险商法对第三排水沟中的 PPCPs 进行风险评价,发现 DIC、IBU、GEM、CBZ、CAF 和

BP-3 具有高风险,BM-DBM、TCC 和 TCS 具有中等风险,其它 PPCPs 的生态风险较低.

参考文献:

- [1] 张盼伟,周怀东,赵高峰,等. 北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1852-1862.
Zhang P W, Zhou H D, Zhao G F, *et al.* Potential risk and distribution characteristics of PPCPs in surface water and sediment from rivers and lakes in Beijing, China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1852-1862.
- [2] Ohoro C R, Adeniji A O, Okoh A I, *et al.* Distribution and chemical analysis of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the Environmental Systems; A Review [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(17), doi: 10.3390/ijerph16173026.
- [3] Gogoi A, Mazumder P, Tyagi V K, *et al.* Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2018, **6**: 169-180.
- [4] Lu G H, Piao H T, Gai N, *et al.* Pharmaceutical and personal care products in surface waters from the inner city of Beijing, China: Influence of hospitals and reclaimed water irrigation[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, **76**(2): 255-264.
- [5] 赵萌,王世军. 银川地区主要入黄排水沟水质演变趋势分析及提升对策[J]. 吉林水利, 2020, (10): 27-30.
Zhao M, Wang S J. Improvement countermeasures and variation tendency analysis on quality of water in main drainage ditches linking with Yellow River in Yinchuan area [J]. Jilin Water Resources, 2020, (10): 27-30.
- [6] 李富娟,高礼,李凌云,等. 宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1394-1403.
Li F J, Gao L, Li L Y, *et al.* Contamination characteristics and ecological risk assessment of antibiotics in the third drain of Ningxia [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1394-1403.
- [7] Mendoza A, Aceña J, Pérez S, *et al.* Pharmaceuticals and iodinated contrast media in a hospital wastewater: A case study to analyse their presence and characterise their environmental risk and hazard[J]. Environmental Research, 2015, **140**: 225-241.
- [8] Liu N, Jin X W, Feng C L, *et al.* Ecological risk assessment of

- fifty pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Chinese surface waters: A proposed multiple-level system [J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105454.
- [9] Isidori M, Nardelli A, Pascarella L, *et al.* Toxic and genotoxic impact of fibrates and their photoproducts on non-target organisms [J]. *Environment International*, 2007, **33**(5): 635-641.
- [10] 高礼. 典型有机紫外防晒剂对模式生物和人体细胞的毒性及其作用机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- Gao L. Toxicity and mechanism study of typical organic UV filters on the model organism and human cells[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [11] Gao X Y, Wang X N, Li J, *et al.* Aquatic life criteria derivation and ecological risk assessment of DEET in China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **188**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109881.
- [12] Meng Y, Zhang J L, Fiedler H, *et al.* Influence of land use type and urbanization level on the distribution of pharmaceuticals and personal care products and risk assessment in Beiyun River, China [J]. *Chemosphere*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132075.
- [13] 任丙南, 耿静. 三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4717-4726.
- Ren B N, Geng J. Occurrence, distribution, and ecological risk assessment of pharmaceutical and personal care products in the aquatic environment of Sanya city, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4717-4726.
- [14] Yang L, Wang T Y, Zhou Y Q, *et al.* Contamination, source and potential risks of pharmaceuticals and personal products (PPCPs) in Baiyangdian Basin, an intensive human intervention area, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144080.
- [15] Sun Q, Li Y, Li M Y, *et al.* PPCPs in Jiulong River estuary (China): Spatiotemporal distributions, fate, and their use as chemical markers of wastewater [J]. *Chemosphere*, 2016, **150**: 596-604.
- [16] Lu J, Li H P, Luo Z F, *et al.* Occurrence, distribution, and environmental risk of four categories of personal care products in the Xiangjiang River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(27): 27524-27534.
- [17] Wu M H, Li J, Xu G, *et al.* Pollution patterns and underlying relationships of benzophenone-type UV-filters in wastewater treatment plants and their receiving surface water [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **152**: 98-103.
- [18] 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 等. 太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5284-5293.
- Lu X Y, Wang F, Zhang L M, *et al.* Nontarget screening and ecological risk assessment of polar organic pollutants in surface water on the west bank of Taihu lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5284-5293.
- [19] Wang Y Q, Liu Y, Lu S Y, *et al.* Occurrence and ecological risk of pharmaceutical and personal care products in surface water of the Dongting Lake, China-during rainstorm period [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(28): 28796-28807.
- [20] 尹承南, 谢培, 焦萌, 等. 天津市地表水体 54 种 PPCPs 分布特征[J]. *环境化学*, 2021, **40**(9): 2820-2831.
- Yin C N, Xie P, Jiao M, *et al.* Distribution characteristics of 54 kinds of PPCPs in surface water in Tianjin [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(9): 2820-2831.
- [21] 陈宇, 王涌涛, 黄天寅, 等. 骆马湖水体中药品及个人护理品的污染特征及风险评估[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(4): 902-909.
- Chen Y, Wang Y T, Huang T Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Luoma Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(4): 902-909.
- [22] Feng J L, Liu Q, Ru X L, *et al.* Occurrence and distribution of priority pharmaceuticals in the Yellow River and the Huai River in Henan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(14): 16816-16826.
- [23] He S M, Dong D M, Zhang X, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of 22 emerging contaminants in the Jilin Songhua River (Northeast China) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(24): 24003-24012.
- [24] Zhang P W, Zhou H D, Li K, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals and personal care products, and their associated environmental risks in a large shallow lake in north China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(4): 1525-1539.
- [25] 高月, 李杰, 许楠, 等. 汉江水相和沉积物中药品和个人护理品 (PPCPs) 的污染水平与生态风险[J]. *环境化学*, 2018, **37**(8): 1706-1719.
- Gao Y, Li J, Xu N, *et al.* Pollution levels and ecological risks of PPCPs in water and sediment samples of Hanjiang River [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(8): 1706-1719.
- [26] 刘娜, 金小伟, 薛荔栋, 等. 太湖流域药物和个人护理品污染调查与生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(9): 3515-3522.
- Liu N, Jin X W, Xue L D, *et al.* Concentrations distribution and ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3515-3522.
- [27] Yu H J, Cao W P. Assessment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) of Dalong Lake in Xuzhou by concentration monitoring and bio-effects monitoring process [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2016, **43**: 209-215.
- [28] Cao S S, Duan Y P, Tu Y J, *et al.* Pharmaceuticals and personal care products in a drinking water resource of Yangtze River delta ecology and greenery integration development demonstration zone in China: Occurrence and human health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137624.
- [29] 王丹, 隋倩, 吕树光, 等. 黄浦江流域典型药物和个人护理品的含量及分布特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1897-1904.
- Wang D, Sui Q, Lv S G, *et al.* Concentrations and distribution of selected pharmaceuticals and personal care products in Huangpu River [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1897-1904.
- [30] Wu C X, Huang X L, Witter J D, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals and personal care products and associated environmental risks in the central and lower Yangtze river, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **106**: 19-26.
- [31] Peng F J, Pan C G, Zhang M, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of emerging organic chemicals in urban rivers: Guangzhou as a case study in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **589**: 46-55.
- [32] Mei X B, Sui Q, Lyu S G, *et al.* Pharmaceuticals and personal

- care products in the urban river across the megacity Shanghai: Occurrence, source apportionment and a snapshot of influence of rainfall[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **359**: 429-436.
- [33] Liu S, Wang C, Wang P F, *et al.* Anthropogenic disturbances on distribution and sources of pharmaceuticals and personal care products throughout the Jinsha River Basin, China [J]. *Environmental Research*, 2021, **198**, doi: 10.1016/j.envres.2020.110449.
- [34] Luo Z F, Tu Y, Li H P, *et al.* Endocrine-disrupting compounds in the Xiangjiang River of China: Spatio-temporal distribution, source apportionment, and risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **167**: 476-484.
- [35] 王博欣, 李炳华, 张大胜, 等. 北运河河水和地下水 PPCPs 污染特征及风险评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, **18**(6): 138-147.
- Wang B X, Li B H, Zhang D S, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Beiyun river and groundwater of North Canal[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, **18**(6): 138-147.
- [36] 张芹, 张圣虎, 汪贞, 等. 骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 162-169.
- Zhang Q, Zhang S H, Wang Z, *et al.* Pollution level, distribution characteristics and risk assessment of 32 PPCPs in surface water of Luomahu lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 162-169.
- [37] Wu M H, Xiang J J, Que C J, *et al.* Occurrence and fate of psychiatric pharmaceuticals in the urban water system of Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **138**: 486-493.
- [38] 崔叶峰. 钦州湾近海及入海河流典型药品与个人护理品 (PPCPs) 污染特征与生态风险评估[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- Cui Y F. Pollution characteristics and ecological risk assessment of typical pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in offshore and coastal rivers of Qinzhou Bay [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [39] 杜木子. 城市污水系统中典型 PPCPs 分布及迁移规律研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- Du M Z. Distribution and migration of typical PPCPs in municipal sewage system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.



CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)