

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

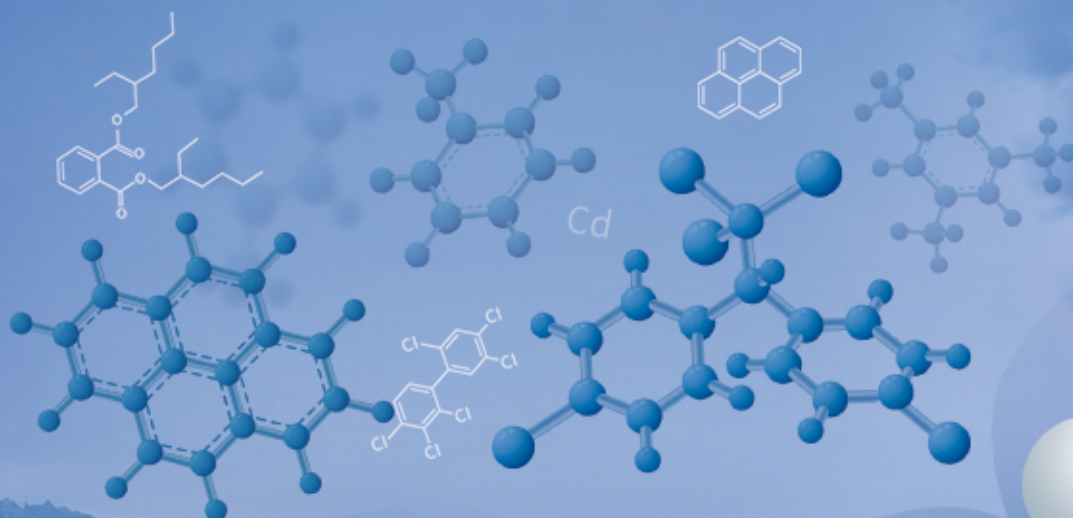
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田土壤地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价

任丙南^{1,2}, 耿静¹

(1. 三亚学院崔明国院士工作站, 三亚 572000; 2. 三亚学院健康产业管理学院, 三亚 572000)

摘要: 环境中药物和个人护理用品 (PPCPs) 污染已引起全球性的关注, 为了解热带滨海旅游城市三亚市的河流及主要海湾中 PPCPs 的污染水平、空间分布特征及其潜在环境风险, 采用固相萃取和高效液相色谱串联质谱测定了三亚市主要河流和海湾中的 11 种典型 PPCPs 类物质。结果表明, 由于三亚市在冬季和夏季接待旅游人数和降雨量的季节性变化, 以及在冬季大量涌入以老年人为主的“候鸟”人口, 使得三亚市主要河流中 PPCPs 浓度的季节性差异显著。冬季 11 种 PPCPs 检出率为 100%, 咖啡因 (CFI) 检出浓度最高为 $1\,449.10\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其次为美托洛尔 (MTP) 检出浓度最高为 $427.06\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和红霉素 (RTM) 检出浓度最高为 $311.59\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 夏季除磺胺甲噁唑 (SMX)、磺胺噻唑 (STZ)、泰乐菌素 (TYL)、MTP 和卡马西平 (CBZ) 的检出率在 87.5%~93.75%, 其余检出率为 100%, CFI、MTP、RTM、红霉素 (ETM) 和氧氟沙星 (OFL) 浓度较高。主要海湾近岸海水中 11 种 PPCPs 均有检出, 其中 SMX、MTP 和 CBZ 的检出率分别为 85.7%、57.1% 和 71.4%, 其余 PPCPs 检出率均为 100%。CFI 检出浓度最高, 最大浓度为 $220.78\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。运用风险商值模型 (RQ) 评价 11 种 PPCPs 在三亚市河流生态环境中的潜在风险, 发现冬季 STZ 在月川桥采样点和 RTM 在凤凰路采样点, 由于附近的医院以及污水处理厂出水排入, RQ 值均 >1 , 对水体的生态环境存在高风险。在夏季 STZ 在三亚大桥采样点、RTM 在红沙码头采样点的 RQ 值介于 0.1~1 之间, 对水体的生态环境具有潜在的中风险。

关键词: 三亚市; 药物及个人护理用品 (PPCPs); 水环境; 分布特征; 环境风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4717-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202102031

Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China

REN Bing-nan^{1,2}, GENG Jing¹

(1. ZHAI Ming-guo Academician Workstation, University of Sanya, Sanya 572000, China; 2. School of Health Industry Management, University of Sanya, Sanya 572000, China)

Abstract: The occurrence, distribution, and risk of 11 typical pharmaceutical and personal care products (PPCPs) were investigated in the major rivers and bay areas of Sanya City. The results showed that the significant seasonal variations in eleven PPCPs in major rivers of the city were affected by intense tourism alongside reduced annual runoff. In winter, all 11 PPCPs had 100% detection frequencies, of which CFI had the highest concentration at $1\,449.10\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. The highest concentration of MTP was $427.06\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ and highest concentration of RTM was $311.59\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. In summer, all 11 PPCPs were again detected, with a lowest detection rate of 87.5%, of which CFI, MTP, RTM, ETM, and OFL were predominant. All 11 PPCPs were also detected in the surface seawater of the main bay areas, with detection frequencies of 85.7%, 57.1%, and 71.4% for SMX, MTP, and CFI respectively; the other eight PPCPs had 100% detection frequencies. CFI had the highest concentration at $220.78\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. An ecological risk assessment of the 11 PPCPs showed that the risk quotients (RQ) of STZ at Yuechuan Bridge and RTM at Fenghuang Road were higher than 1 in winter, posing a high risk to the aquatic ecology. This was mainly attributed to the discharge of water from nearby hospitals and sewage treatment plants. In summer, the RQ of STZ at Sanya Bridge and RTM at Hongsha Wharf was between 0.1 and 1, which indicates a medium level of risk to the aquatic environment in Sanya City.

Key words: Sanya City; pharmaceutical and personal care products (PPCPs); aquatic environment; distribution characteristics; ecological risk

药物和个人护理用品 (pharmaceutical and personal care products, PPCPs) 是人们在日常生活中大量使用且种类繁多的一大类化合物, 其排放与人类日常生活及经济社会发展紧密相关^[1,2], 可以从多种途径排放到水环境中, 如污水处理厂、养殖场、医院和制药厂以及人们对未使用 PPCPs 的随意丢弃^[3,4]。PPCPs 在水环境中的监测浓度较低, 但由于持续的输入和长期存在, 呈现出“持续存在”的状态^[5]。大多数 PPCPs 具有易溶于水、弱挥发性、难降解和生物累积性的特点^[5], 在低剂量长期暴露下将对生物产生内分泌干扰效应、发育毒性和生殖毒

性, 甚至会发生生物积累和放大作用^[6,7], 带来一定环境风险。特别是城镇化程度较高、人口密度较大的地区^[8,9], 以及水资源管理不完善的城市^[6], 环境风险更加显著。因此, PPCPs 在环境中的存在, 及其对生态系统和人类健康的危害已引起全球性的关注^[10,11]。

收稿日期: 2021-02-04; 修订日期: 2021-04-06

基金项目: 海南省自然科学基金项目 (420RC673); 三亚市院地合作科研项目 (2019YD04); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目 (SKLURE2016-2-6)

作者简介: 任丙南 (1978~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染物的污染行为与环境效应, E-mail: renbingnan@126.com

三亚市作为知名的热带旅游城市,旅游度假人口呈现出季节性暴发式涌入的特点,每年 11 月~次年 2 月会吸引大量的旅游人口和外地过冬人口,如 2019 年 2 月 9 日,三亚市旅游委单日人口统计数据显示,常住人口 33.31 万人,但是候鸟人口和旅游人口数量分别高达 35.9 万人和 59.47 万人。此外,海南约 90% 的村庄没有污水处理系统,生活污水和畜禽养殖废水处于无序排放的状态^[12]。这些未经处理的废水是区域 PPCPs 的重要贡献源之一^[13]。三亚市的气候和当地经济产业结构与内陆有显著的差异。在旅游旺季,大量人口涌入、季节性旱季与污水处理设施不足三者叠加会使 PPCPs 环境风险增加。三亚市地区特殊且可替代区域缺乏,开展 PPCPs 的相关研究更具独特性。迄今为止,三亚市水环境中 PPCPs 的存在水平、分布特征和环境风险等尚缺乏深入了解和全面认识,将影响和制约热带旅游城市的生态安全和健康保障。因此,本文选择了 11 种典型 PPCPs 作为目标物,包括磺胺甲噁唑(SMX)、磺胺嘧啶(STZ)、诺氟沙星(NFX)、氧氟沙星(OFL)、罗红霉素(RTM)、脱水红霉素(ETM)、泰乐菌素

(TYL)、美托洛尔(MTP)、苯扎贝特(BZB)、卡马西平(CBZ)和咖啡因(CFI),揭示这些 PPCPs 在三亚市的主要河流、海港中的污染水平和分布特征,对潜在的生态风险进行评价,以期为热带海岛旅游城市河流中 PPCPs 的风险防控及环境健康维持提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究区域位于三亚市,宁远河、三亚河、藤桥河、大茅水和烧旗水是境内的主要水系,其中三亚河在主城区分为三亚西河和三亚东河。根据河流和人类活动关系,结合环保监测断面位置,共设置 23 个采样点,位置如图 1 所示,采样点基本信息见表 1。图 1 中 W1~W4 为宁远河采样点, W5~W7 为三亚西河采样点, W8~W9 为三亚东河采样点, W11~W15 为藤桥河采样点, W10 和 W16 分别为大茅水和烧旗水; P1~P7 为海湾采样点,从西到东依次为 P1 崖州中心渔港、P2 南山港、P3 烧旗港、P4 三亚港、P5 大东海、P6 红沙码头和 P7 龙江港。

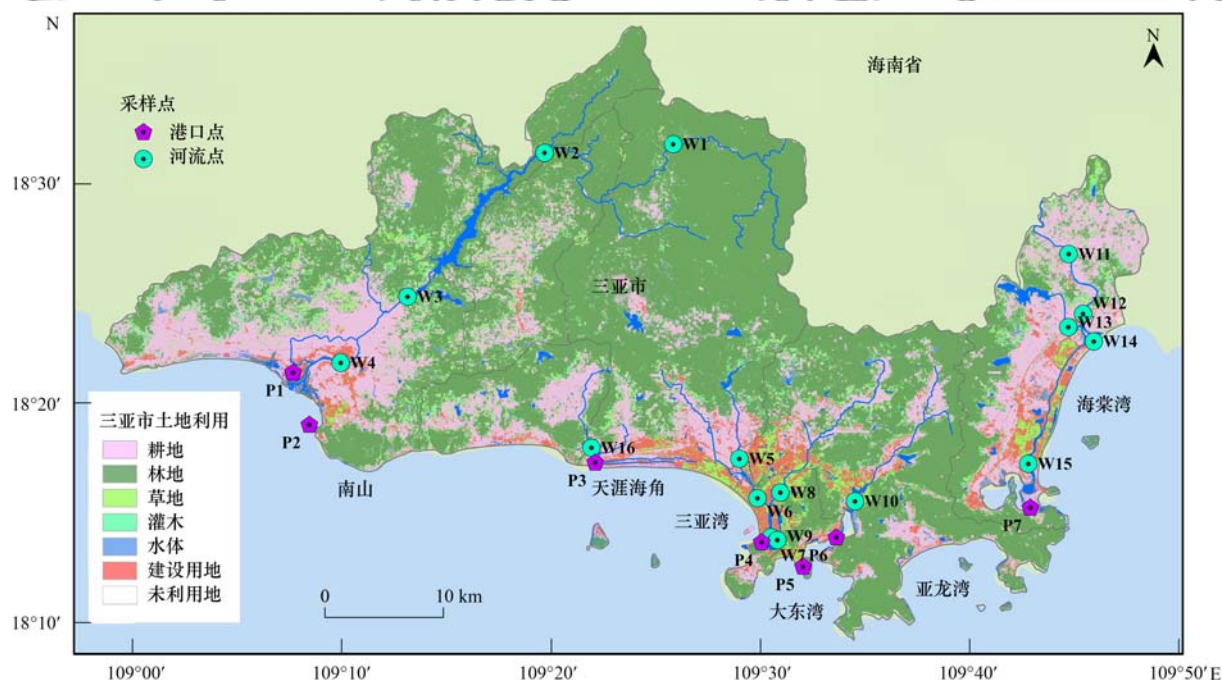


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

根据三亚市旅游人口数量和降雨量的变化特征,样品在夏季(2018 年 7 月)和冬季(2019 年 2 月)共采集 2 期,其中冬季是旅游人口和外来过冬人口最多的时间,降雨量较小;夏季是旅游人数和过冬人数较少的月份,降雨量较大。夏季按照图 1 中所示 23 个位置采样;冬季在受人类活动影响大的主城区中的 6 个位置(W5~W10)采样。水样用不锈

钢采样器在水面下 0.5 m 处采集 1 L 水样,装入水样润洗后的聚乙烯瓶中,同时加入适量甲醇溶液(1%),放入装有冰盒的保温箱中运回实验室,4℃避光保存,并在 48 h 内完成预处理。

1.2 主要仪器和试剂

主要仪器包括:安捷伦 Agilent-1290 液相系统串联 Agilent-6460 三重四级杆质谱系统(Agilent,美

国)；Visiprep 24 孔固相萃取装置(Supelco,美国)；Oasis HLB 固相萃取柱(Waters,美国)；Avanti JXN-26 高速冷冻离心机(Beckman,美国)；N-EVAP 系列氮吹仪(Organomation,美国)；KQ5200 型超声波清洗器(中国昆山),UPR 系列超纯水机(西安优普)。

表 1 采样点地理位置信息

Table 1 Geographical information of the sampling sites			
点位	名称	坐标(E,N)	说明
W1	扎南	109°25'48", 18°32'07"	北部山区林地
W2	那会	109°19'26", 18°31'40"	大隆水库上游
W3	抱古	109°12'56", 18°25'01"	大隆水库出口
W4	崖城大桥	109°09'46", 18°22'00"	崖城镇中心区域,环保局监测断面
W5	育春路	109°28'53", 18°17'46"	三亚河上游,城乡结合部
W6	月川桥	109°29'46", 18°15'58"	城市主干道迎宾路交叉口,环保局监测断面
W7	三亚大桥	109°30'25", 18°14'12"	靠近河口,主城区,环保局监测断面
W8	凤凰路桥	109°30'51", 18°16'15"	城市主干道凤凰路与河流交叉点,城市扩张区
W9	潮见桥	109°30'44", 18°14'04"	游艇码头,临近入海口,环保局监测断面
W10	安罗	109°34'26", 18°15'52"	大茅水,盐场和养殖场较多,环保局监测断面
W11	南田农场	109°44'34", 18°27'14"	三亚-保亭行政区域交界
W12	藤桥东桥	109°45'17", 18°24'30"	藤桥镇,环保局监测断面
W13	藤桥西桥	109°44'35", 18°23'53"	藤桥镇,环保局监测断面
W14	海丰	109°45'48", 18°23'14"	藤桥河入海口
W15	龙江	109°42'42", 18°17'39"	藤桥河支流龙江河入铁炉港处
W16	烧旗沟	109°21'48", 18°18'13"	环保局监测断面
P1	崖州渔港	109°07'30", 18°21'33"	多功能中心渔港,2016 年开始运营
P2	南山港	109°08'18", 18°19'10"	唯一的对外开放海运交通运输业务
P3	烧旗港	109°21'59", 18°17'34"	重要旅游景点(西岛)的陆岛交通门户
P4	三亚港	109°29'59", 18°13'59"	集客运、货运、渔港及旅游的综合性港口(2018 年拆除)
P5	大东海	109°31'58", 18°12'53"	旅游酒店所在区域
P6	红沙码头	109°33'33", 18°14'14"	渔港和 2018 年以前渔排聚集区
P7	龙江港	109°42'49", 18°15'40"	渔港和 2018 年以前渔排聚集区

试剂：11 种 PPCPs 标准物质包括磺胺甲噁唑(SMX)、磺胺噻唑(STZ)、诺氟沙星(NFX)、氧氟沙星(OFL)、罗红霉素(RTM)、脱水红霉素(ETM)、泰乐菌素(TYL)、美托洛尔(MTP)、苯扎贝特(BZB)、卡马西平(CBZ)和咖啡因(CFI)。4 种内标物(Sulfamethazine-¹³C₆、Ofloxacin-D₃、Caffeine-¹³C₃和地美环素)。标准品及内标物纯度均>98%，分别购自德国 Dr. Ehrenstorfer、德国 WITEGA、J&K 百灵威科技有限公司和美国 TOKU-E 公司。使用的甲醇、乙腈和甲酸为色谱纯，硫酸、盐酸、氢氧化钠、磷酸氢二钠(Na₂HPO₄)、乙二胺四乙酸二钠(Na₂EDTA)和柠檬酸(C₆H₈O₇)等试剂均为分析纯，实验用水为超纯水。

1.3 样品前处理

通过玻璃纤维过滤器(GF/F, 47 mm, Whatman, Maidstone, UK)过滤 500 mL 等分水样,添加 40% H₂SO₄ 将水样的 pH 调节至 2.5~3.0,添加 0.1 g Na₂EDTA。将预处理的水样加入 100 ng 内标并混合,然后装入提前活化后的 HLB 萃取柱。目标分析物用 6 mL 甲醇分两次洗脱,用超纯氮气干燥,在 200 μL 甲醇和 300 μL 超纯水中重新溶解,通过 0.2 μm 针式过滤器过滤,并转移到 1.5 mL 棕色玻

璃瓶中待测。

1.4 样品检测及质量控制

样品使用安捷伦 Agilent 1290/6460 HPLC-MS/MS 对目标 PPCPs 进行分离和定量^[14]。色谱条件：流动相由 A 相 0.2% 甲酸水溶液和 B 相乙腈组成。色谱柱为 Agilent Zorbax SB-C18 液相色谱柱(150 mm×2.1 mm, 1.8 μm),柱温 30℃,运行时间 33 min,流速 0.3 mL·min⁻¹,进样量为 5 μL。洗脱程序为[时间(min),流动相 B 比例(%)]:(0,5)、(2,5)、(5,13)、(8,15)、(13,20)、(18,30)、(25,60)、(27,100)、(30,100)、(30.1,5)和(33,5)。质谱条件：采用电喷雾离子化源,正离子电离模式(ESI⁺),多反应检测方式(MRM),毛细管电压 4 000 V,雾化温度 350℃,辅助气(N₂)流量 12 L·min⁻¹,喷雾气压为 35×6.9 kPa。

对取样和目标物提取过程中使用的所有材料进行检查,以避免潜在的污染。每批样品设置现场空白、运输空白、程序空白和溶剂空白,以消除潜在干扰。所有样品中 PPCPs 的定量均采用 10 点内标物定量曲线,标准曲线浓度范围为 0.1~500 ng·L⁻¹。所有目标分析物的回归系数(R²)均大于 0.99。检测限(LOD)和定量限(LOQ)分别定义为产生 3:1 和 10

:1信噪比所需的分析物最小峰值. 11 种 PPCPs 的 LOD 范围为 $0.04 \sim 0.25 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, LOQ 范围为 $0.13 \sim 0.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 基质加标回收率范围为 $(76.7 \pm 8.7)\% \sim (126.2 \pm 2.0)\%$, 具体信息见表 2.

表 2 11 种 PPCPs 的检测限、定量限和基质加标回收率

Table 2 Limit of detection (LOD), limit of quantification (LOQ), matrix spike recovery (MSR), and standard deviation for the 11 PPCPs

目标物	LOD / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	LOQ / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	MSR($n=4$) /%	标准偏差 /%
SMX	0.25	0.50	89.9	3.3
STZ	0.17	0.42	88.1	3.2
NFX	0.17	0.42	96.5	17.2
OFL	0.08	0.25	100.8	3.0
RTM	0.04	0.13	106.0	6.8
ETM	0.08	0.33	108.6	2.6
TYL	0.08	0.33	93.0	5.0
MTP	0.13	0.42	126.2	2.0
BZB	0.13	0.42	79.9	6.3
CBZ	0.04	0.17	76.7	8.7
CFI	0.17	0.42	96.1	3.0

1.5 生态风险评价

根据欧盟技术指导文件关于化合物的风险评价方法,采用风险商值法(RQ)来评估 PPCPs 污染物在三亚市水环境存在的潜在生态风险^[15~17]. 根据 RQ 值的大小,分为 3 个风险等级,RQ 值在 $0.01 \sim 0.1$ 之间为低风险, $0.1 \sim 1.0$ 之间为中等风险,大于 1 为高风险^[18]. 风险商值法的计算公式如下:

$$RQ = MEC/PNEC \quad (1)$$

式中,MEC 为测定的环境浓度,单位为 $(\text{ng}\cdot\text{L}^{-1})$; PNEC 为预测无效应浓度,研究涉及的相关目标物的预测无效应浓度通过文献搜集整理.

2 结果与讨论

2.1 三亚市主要河流表层水中 PPCPs 的污染水平

三亚市主要河流表层水中 11 种典型 PPCPs 在夏季和冬季的含量见表 3.

表 3 三亚市主要河流中 11 种 PPCPs 的含量和检出率¹⁾

Table 3 Concentrations and detection frequencies of 11 PPCPs in the major rivers of Sanya City

目标物	夏季 PPCPs 浓度($n=16$)/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$			冬季 PPCPs 浓度($n=6$)/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$		
	范围	均值	检出率/%	范围	均值	检出率/%
SMX	n. d. ~89.47	9.62	93.75	1.06~91.70	21.29	100
STZ	n. d. ~20.09	2.85	81.25	0.97~132.51	38.49	100
NFX	0.32~2.83	1.11	100	1.71~13	5.03	100
OFL	0.27~3.05	0.83	100	5.74~249.58	73.67	100
RTM	0.09~1.46	0.45	100	4.44~311.59	65.40	100
ETM	1.73~8.62	4.16	100	14.09~269.30	75.97	100
TYL	n. d. ~0.31	0.11	87.5	0.33~0.51	0.40	100
MTP	n. d. ~2.68	0.59	68.75	4.24~427.06	84.61	100
BZB	0.13~2.12	0.42	100	1.32~16.79	5.02	100
CBZ	n. d. ~1.45	0.37	87.5	1.08~28.28	12.89	100
CFI	4.51~220.78	64.20	100	251.00~1 449.10	477.89	100

1)n. d. 表示低于定量限

从表 3 看出, 11 种 PPCPs 在三亚市广泛存在. 三亚市夏季河流表层水体中 PPCPs 的浓度均值范围为 $0.11 \sim 64.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中 SMX、STZ、TYL、MTP 和 CBZ 的检出率在 $68.75\% \sim 93.75\%$, 其余 PPCPs 检出率均为 100% . CFI 的检出浓度最高, 最高浓度达 $220.78 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $64.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 冬季河流表层水体中 PPCPs 的浓度均值范围为 $0.40 \sim 477.89 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 11 种 PPCPs 均有检出, 检出率均为 100% . CFI 的检出浓度最高, 达到 $1 449.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $477.89 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 与北京北运河表层水体中 PPCPs 检出情况类似, 都以中枢神经兴奋剂 CFI 为主^[19]. CFI 常在咖啡、茶、巧克力及可乐型饮料中作为兴奋剂、苦味剂和香料; 也是解热镇痛药复方阿司匹林等药物的主要成分之一. 三亚市常年温度较高, 茶和可乐型饮料的消费量较其它城市大. 由于 CFI 较高的水溶性及难挥发性,

在水环境后会长时间存在^[20]. TYL 是动物用药, 因此在夏季和冬季的平均含量变化不大, 浓度最低, 分别为 $0.11 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.40 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. SMX 物理化学性质较为稳定, 不易降解和水解, 且环境迁移能力较强^[21], 在夏季是仅次于 CFI 的优势污染物, 其污染和渭河^[23]等接近. 磺胺类药物常用于畜禽养殖业, 说明三亚市水环境中存在畜禽养殖废水的排入. RTM、MTP、OFL、CBZ、ETM 和 BZB 等均是人类使用量较大的药物, 随着冬季旅游人数和候鸟人数增加以及降雨量的减小, 冬季浓度明显增加. 与其它研究相比, RTM 在冬季的浓度最大值为 $311.59 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显低于海河 $3 700 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[24], 高于珠江广州某河段^[22]; MTP 与北京北运河的浓度接近, 其浓度范围是 $4.24 \sim 427.06 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[19]; OFL 是人畜两用抗生素, 在人类和动物胃肠道疾病以及呼吸性疾病治疗中被广泛使用, 研究中较渤海湾的 $5 100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 低很

多^[25],与北京北运河的 69.5 ~ 389.00 ng·L⁻¹ 接近^[19],说明水产养殖对水环境中氧氟沙星残留的影响;CBZ 在水环境中具有较高的浓度和持久性,在冬季三亚市地表水中的浓度为 1.08 ~ 28.28 ng·L⁻¹,与美国哈德逊河接近^[26].ETM 在研究中的浓度为 14.09 ~ 269.30 ng·L⁻¹,在西班牙 Madrid 河流中浓度在 30 ~ 40 ng·L⁻¹^[27],在珠江广州某河段最高浓度为 1.54 μg·L⁻¹^[22].BZB 是调节血脂药,在冬季的最高浓度达到 16.79 ng·L⁻¹,高于黄浦江水域的浓度^[28],明显低于西班牙 Madrid 河的浓度^[27].本研究与国内外其他研究的检出结果比较见图 2.

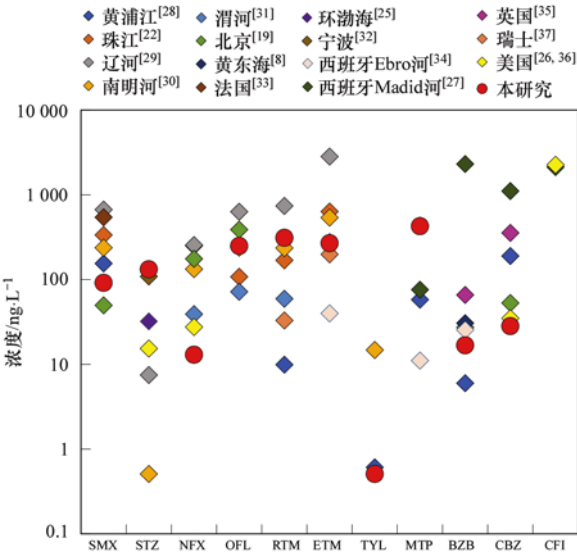


图2 国内外地表水中 PPCPs 浓度对比
Fig. 2 Comparison of maximum concentrations of PPCPs in global surface waters

2.2 三亚市主要河流表层水中 PPCPs 在夏冬两季的变化特征

由于冬季旅游和过冬人口的活动区域在主城区,在比较三亚市主要河流表层水 PPCPs 夏冬两季的变化时,选择主城区的 6 个采样点进行比较(W5 ~ W10).图 3 为夏季和冬季三亚市主要河流的 PPCPs 含量.

从表 3 和图 3 中可以看到,三亚市主要河流表层水中 11 种典型 PPCPs 的含量在夏季和冬季有明显差异,只有动物用药 TYL 和 SMX 增加不大,其余 10 种 PPCPs 增加显著,其中增加最多的 RTM、MTP、OFL、CBZ、ETM 和 BZB 的平均浓度分别增加了 145、143、89、35、18 和 11 倍.CFI 的平均浓度值最高,但只增加了 7 倍.三亚市接待旅游人数的季节性差异明显,冬季采样月比夏季采样月的接待旅游人数多出将近 40 万人.另外据海南政协调研结果显示,2017 年 10 月 1 日至 2018 年 4 月 30 日,三

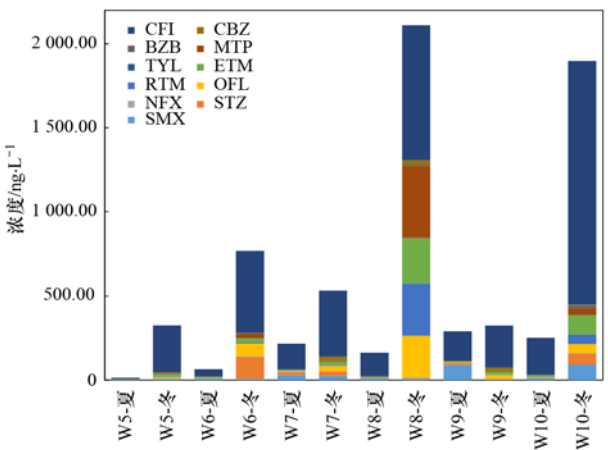


图3 夏季和冬季三亚市主要河流的 PPCPs 含量
Fig. 3 Concentrations of PPCPs in the major rivers in Sanya City in summer and winter

亚市“候鸟”人数达 41 万人,为三亚市户籍人口 (58.56 万人)总数的 70%.“候鸟”人群为避开北方的冬天,选择在春节前后的冬季在三亚市居住,其中 57% 为 60 岁以上老人,29% 为 45 ~ 60 岁人群,而且大部分“候鸟”人口需长期用药.“候鸟”人群很可能是造成夏冬两季 PPCPs 浓度和组成差异明显的原因^[38,39].人数的增加必然导致药物的使用量和排放量增加,而三亚市污水处理厂负荷难以满足处理需求,在 2015 年日产生污水 23 万 t,而污水处理厂负荷只有 15 万 t^[40].三亚市属于海岛季风性气候,夏季采样月的降水量为 514.6 mm,冬季采样月的降水量仅为 3 mm.此外夏冬两季气温差异不像其他研究区域显著,夏季采样月 7 月平均气温 28.1℃,月平均最高气温 31.7℃,平均最低气温 25.6℃,日照时数为 99.9 h.冬季采样月 2 月平均气温 23.5℃,月平均最高气温 28.0℃,平均最低气温 20.8℃,日照时数为 192.6 h^[41,42].因此推断河流径流量变化和冬季人口增加,也是三亚市主要河流表层水中 11 种 PPCPs 在夏冬两季的浓度和组成差异明显的原因.

图 3 中 6 个点位的 ∑ PPCPs 浓度在冬季分别增加了 311.49、706.07、315.80、1 947.35、34.34 和 1 646.18 ng·L⁻¹.W9(潮见桥)采样点位于主城核心区,是三亚市名称的发源地,以居住用地和办公、社会公共服务设施用地为主,包括港门村和商品街等常住人口为主的老社区,因此该点位的夏冬季 ∑ PPCPs 变化不大.W5(育春路)和 W7(三亚大桥)点位的增加值接近,W5 位于主城区边缘,W7 位于三亚大桥,近年来随着城市扩张和更新改造,两个点位所在区域都开发了多个房地产项目,吸引了部分外地人口在冬季聚集.冬季 PPCPs 总浓度在 W8

(凤凰路桥)和W10(安罗)采样点明显高于其它点位,W8采样点在三亚东河上游,周边基本以新开发小区为主,规模较大的如卓达、山屿湖等小区;W10位于红沙码头附近,红沙社区是三亚市较早成立的行政区域,本地常住人口集中,由于靠近大东海也吸引了大量外来人口和旅游候鸟人口在此地居住.此外,W8和W10上游均有污水处理厂出水汇入,因此两个采样点的夏冬季 $\sum$ PPCPs变化最大.MTP是治疗各型高血压及心绞痛的 β -受体阻滞剂,在W6、W8和W10的 $\sum$ PPCPs浓度在冬季增加较多,尤其是W8采样点增加最多.通过不同点位PPCPs的季节变化说明人口季节波动对PPCPs质量浓度有较大的影响.

2.3 三亚市主要河流表层水中 PPCPs 污染的空间分布特征

图4为三亚市夏季主要河流表层水中PPCPs污染的空间分布.

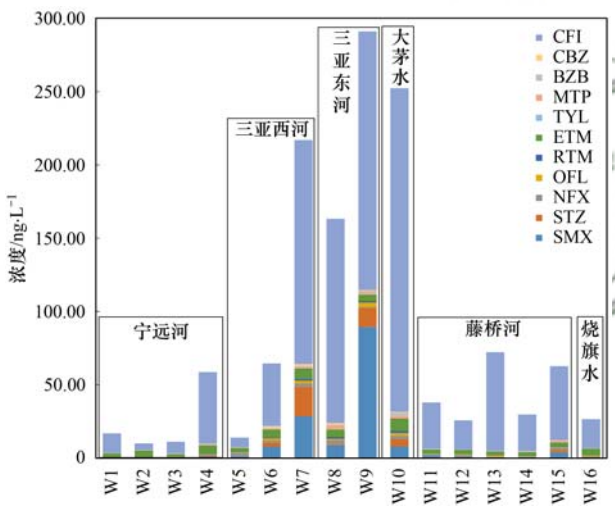


图4 三亚市主要河流中 11 种 PPCPs 的空间分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of 11 PPCPs in major rivers in Sanya City

如图4所示,在夏季不同采样点的PPCPs浓度存在明显的空间差异.穿主城区而过的三亚西河、三亚东河和大茅水采样点的PPCPs浓度较高,远离主城区的宁远河和藤桥河中PPCPs的浓度较低,除了由于主城区人口密集,药物使用较多的原因外,也受到污水处理厂尾水排入河流,以及工业企业排水的影响.三亚河在丰兴隆大桥处接收少量上游来水后为三亚西河,其余继续流动称为三亚东河.上游有污水处理厂出水排入河流,也分布着农业种植区、多家畜禽养殖场,以及超过2万人规模的高校,由于污水处理设施不完善,增加了水体中PPCPs的含量.W10(红沙码头)采样点周边有盐场、船舶修理和制药厂等企业,三亚市最大的污水处理厂也在附

近,还是居民聚集的场所,该点位的PPCPs浓度也较高.从PPCPs的种类、含量及分布情况可以看出三亚市水环境中的PPCPs是污水处理厂、人类用药和畜禽养殖等多种途径排放到水环境中共同作用的结果.需要注意的是宁远河上游北部山区采样点W1,虽然不在城市人口聚集区,大片种植香蕉、芒果和槟榔等经济作物,在夏季检出了7种PPCPs;W2点位于三亚市最大的水源地大隆水库上游附近,也检出了除STZ外的10种PPCPs.

2.4 三亚市主要海湾表层海水中 PPCPs 的污染水平及分布特征

表4为夏季三亚市主要海湾表层海水中PPCPs的污染水平.图5为夏季三亚市主要海湾表层海水中11种PPCPs的空间分布特征.

表4 三亚市主要海湾表层海水中 11 种 PPCPs 的含量水平¹⁾

Table 4 Concentrations of 11 PPCPs in the major bays of Sanya City

目标物	浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$			检出率/%
	最小值	最大值	平均浓度	
SMX	n. d.	190.12	43.24	85.71
STZ	0.03	90.06	20.30	100
NFX	0.28	1.66	0.85	100
OFL	0.24	1.7	0.86	100
RTM	0.09	1.10	0.38	100
ETM	1.60	8.06	4.39	100
TYL	0.09	0.11	0.10	100
MTP	n. d.	5.50	1.14	57.14
BZB	0.09	0.82	0.33	100
CBZ	n. d.	1.45	0.37	71.43
CFI	8.36	127.98	55.68	100

1) n. d. 表示低于定量限

从表4中可以看到,夏季三亚市主要海湾表层海水中11种PPCPs均有检出,其中SMX、MTP和CBZ的检出率分别为85.71%、57.14%和71.43%,

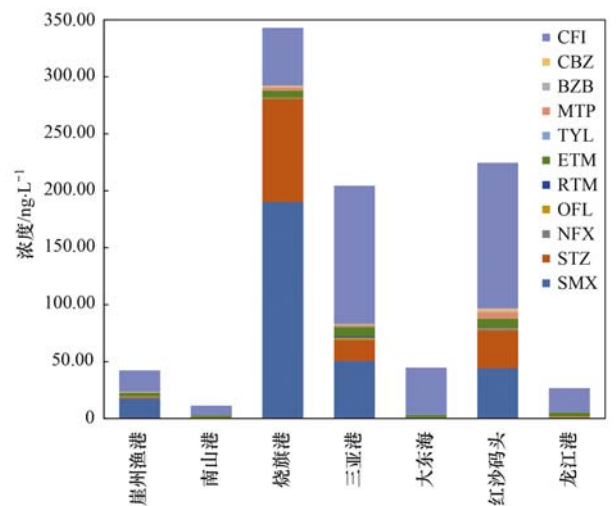


图5 三亚市主要海湾表层海水中 11 种 PPCPs 的空间分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of 11 PPCPs in the major bays of Sanya City

其余 PPCPs 检出率均为 100%。SMX 在三亚市海湾近海的高检出率与其他水域的研究一致^[43], 浓度要高于其它黄海^[8]和南黄海盐城海域^[44], CFI 的浓度与黄海海域接近^[8]。

从表 4 和图 5 中可以看到, SMX 和 STZ 的最高质量浓度在 P3 (烧旗港) 检出。烧旗港是重要旅游景点(西岛)的陆岛交通门户, 以陆岛交通、海上航运和游艇观光为核心, 并配套旅游房地产开发的综合性旅游开发区。在其入海河流上游的 W16 采样点(烧旗沟)中, 除 ETM 和 TYL 较高外, 其它 PPCPs 都很低。而在烧旗港的水样中 SMX 和 STZ 的检出浓度却高出很多, 除了与附近农村和码头各项设施的污水排放有关外, 也可能因为该港出口小, 容易被海中的沙子淤积而与海水交汇较少有关。NFX、MTP、BZB、CBZ 和 CFI 的最高质量浓度在红沙码头, 其它几种 PPCPs 也较高。P6 (红沙码头) 常住人口集中, 附近存在工业废水和污水处理厂出水汇入, 2018 年以前是渔排餐饮的聚集点。在红沙码头入海河流大茅水中的 W10 采样点(安罗桥) $\sum$ PPCPs 较高(见图 4)。同时采样点距离入海口位置较远(军事禁区), 受海水稀释作用较弱。OFL、RTM 和 ETM 的最高质量浓度在 P4 (三亚港) 检出。三亚港曾经是历史最悠久的集客

运、货运、渔港及旅游于一体的综合性港口(2018 年拆迁), 也是三亚市 2018 年之前最繁华的港口, 周边为传统居民区, 三亚港既承接了汇入的三亚西河和三亚东河的污染物, 也受到周边区域的影响。这三个点位都是三亚市长期以来重要的人类生产生活区域, 均处于人类活动频繁区域, 人口众多, 商业繁华, 因此 PPCPs 污染较明显。其余采样点虽浓度不高, 但各种 PPCPs 检出率均较高, 应引起足够重视。如 P2 (南山港) 虽还在建设中, 但除 MTP 和 CBZ 外其它类 PPCPs 均有检出; P5 (大东海) 位于旅游点海滩, 也检出了除 MTP 和 CBZ 外其它类的 PPCPs。

2.5 生态风险评价

为初步评价三亚市水体中 11 种 PPCPs 可能导致的环境风险, 根据最坏情景原则使用 11 种 PPCPs 在夏冬两季的最大检出浓度, 用文献[15, 45~48]中对应的 PNEC 计算在其最大浓度条件下的 RQ 值。目前不同研究报道的部分 PPCPs 的 PNEC 值存在一定差异, 主要是由于在实验中参照生物的 LC₅₀ 或 EC₅₀ 值不同而出现较大的差异, 虽然不能完全代表某种 PPCPs 在目前浓度水平的危害, 但这些数据仍可作为生态风险评价的参考。三亚市主要河流中 PPCPs 的风险商(RQ)值见表 5。

表 5 三亚主要河流水体中 PPCPs 的 RQ
Table 5 RQ for PPCPs in the major rivers of Sanya

目标物	PNEC /ng·L ⁻¹	夏季			冬季			文献
		MEC/ng·L ⁻¹	RQ	风险等级	MEC/ng·L ⁻¹	RQ	风险等级	
SMX	2.00 × 10 ⁴	89.47	4.47 × 10 ⁻³	低风险	91.7	4.59 × 10 ⁻³	低风险	[15]
STZ	27.00	20.09	7.44 × 10 ⁻¹	中风险	132.51	4.91	高风险	[45]
NFX	2.66 × 10 ³	2.83	1.06 × 10 ⁻³	低风险	13	4.89 × 10 ⁻³	低风险	[46]
OFL	5.32 × 10 ²	3.05	5.73 × 10 ⁻³	低风险	249.58	4.69 × 10 ⁻¹	中风险	[45]
RTM	1.00 × 10 ²	1.46	1.46 × 10 ⁻²	中风险	311.59	3.12	高风险	[15]
ETM	2.00 × 10 ³	8.62	4.31 × 10 ⁻³	低风险	269.3	1.35 × 10 ⁻¹	中风险	[47]
TYL	3.40 × 10 ²	0.31	9.12 × 10 ⁻⁴	低风险	0.51	1.50 × 10 ⁻³	低风险	[15]
MTP	7.30 × 10 ³	2.68	3.67 × 10 ⁻⁴	低风险	427.06	5.85 × 10 ⁻²	低风险	[47]
BZB	7.62 × 10 ³	2.12	2.78 × 10 ⁻⁴	低风险	16.79	2.20 × 10 ⁻³	低风险	[48]
CBZ	3.50 × 10 ⁴	1.45	4.14 × 10 ⁻⁵	低风险	28.28	8.08 × 10 ⁻⁴	低风险	[15]
CFI	8.70 × 10 ⁴	220.78	2.54 × 10 ⁻³	低风险	1 449.1	1.67 × 10 ⁻²	低风险	[15]

从表 5 中可以看出, 在冬季, STZ 在 W6 采样点和 RTM 在 W8 采样点的 RQ 值均 >1.0, 对水体的生态环境具有潜在的高风险。OFL 与 ETM 在 W8 采样点的 RQ 值介于 0.1~1.0 之间, 对水体的生态环境具有潜在的中风险。W6 采样点位于月川桥, 流经区域为金鸡岭社区, 由于上游的采样点(W5) STZ 检出浓度较低, 可以排除上游支流农村污水的影响, 推断主要受位于河边的大型三级甲等综合医院的影响。W8 采样点在三亚河凤凰路段, 附近居民区多为近

几年开发项目, 冬季人口增加明显; 不仅是上游污水处理厂出水受纳水体, 同时受上游区域内农业种植区、畜禽养殖场和高校等因素的影响, RTM、OFL 和 ETM 均在该点位表现出较高环境风险。在夏季, STZ 在 W7 采样点、RTM 在 W10 采样点的 RQ 值介于 0.1~1.0 之间, 对水体的生态环境具有潜在的中风险。W7 位于三亚大桥附近, 商业繁华, 人口密集, 上游存在医院废水的排入。W10 采样点红沙码头周边有盐场、船舶修理和制药厂等企业, 也有三亚市

最大的污水处理厂,同时也是本地居民集中居住的区域.从分析可以看到,三亚市水环境中存在中、高风险的 PPCPs,均为人类常用抗生素,抗生素的分布和人类活动有很大关系^[49],三亚市居住人口的季节性变化以及旅游活动频繁导致在冬季的 PPCPs 风险较高.此外抗生素类药物的频繁使用,导致该类 PPCPs 在三亚市水环境中的生态风险最高,这一点和以往研究报道的环境中抗生素是高风险的新型污染物的结论一致^[50].在水环境中的 PPCPs 是多种共存的,目前缺乏对环境中存在的 PPCPs 联合风险研究,有学者利用简单叠加模型计算联合毒性风险^[51,52],但简单叠加模型可能会高估联合毒性风险^[53],应进行更多化合物及更多级别生物的复合生态毒理效应的研究^[53].

3 结论

(1) 11 种 PPCPs 在三亚市水环境中均有检出.三亚市夏季河流表层水体中 PPCPs 的浓度均值范围为 $0.11 \sim 64.20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,其中 SMX、STZ、TYL、MTP 和 CBZ 的检出率在 68.75%~93.75%,其余 PPCPs 检出率均为 100%.CFI 在水样中的检出浓度最高,达到 $220.78 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.冬季河流表层水体中 PPCPs 的浓度均值范围为 $0.40 \sim 477.89 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,11 种 PPCPs 的检出率均为 100%.CFI 在水样中的检出浓度最高,达到 $1449.10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $477.89 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.从 PPCPs 的种类、含量及分布情况可以看出三亚市水环境中的 PPCPs 是污水处理厂、人类用药、农村污水和畜禽养殖等多种途径排放到水环境中共同作用的结果.

(2) 三亚市主要河流表层水中 11 种典型 PPCPs 的含量在夏季和冬季有明显差异.在冬季和夏季接待旅游人数、降雨量的季节性差异明显,以及在冬季大量涌入以老年人为主的“候鸟”人口,使得主要河流表层水中除动物用药 TYL 外,其它 10 种 PPCPs 在冬季明显增加.不同采样点位 PPCPs 的季节变化说明人口季节波动对 PPCPs 质量浓度有较大的影响.需要注意的是宁远河上游北部山区采样点 W1 检出了 7 种 PPCPs,位于三亚市水源地大隆水库上游的 W2 点检出了除 STZ 外的 10 种 PPCPs.

(3) 夏季三亚市主要海湾近岸表层海水中,11 种 PPCPs 均有检出,除 SMX、MTP 和 CBZ 的检出率分别为 85.71%、57.14% 和 71.43%,其余 PPCPs 检出率均为 100%.PPCPs 检出浓度不高,其中 SMX 和 CFI 分别为 $190.12 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $127.98 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.海湾近岸表层海水中的 PPCPs 主要受周边区域以及入海河流的影响,人类活动频繁的烧旗港、红沙码头

和三亚港水中的 PPCPs 污染较明显.需要引起注意的是,还在建设中的南山港和热门旅游点大东海检出了除 MTP 和 CBZ 外其它类的 PPCPs.

(4) 运用 RQ 模型对三亚市主城区河流中 11 种 PPCPs 的潜在风险进行评价.在冬季,STZ 在月川桥采样点和 RTM 在凤凰路采样点,由于受附近的医院以及污水处理厂出水排入,对水体的生态环境存在高风险.在夏季,STZ 在三亚大桥采样点、RTM 在红沙码头采样点,对水体的生态环境具有潜在的中风险.三亚市水环境中存在中、高风险的 PPCPs 均为人类常用抗生素,居住人口的季节性变化以及旅游活动频繁导致在冬季的 PPCPs 风险较高.

参考文献:

- [1] Zhang Y Z, Duan L, Wang B, *et al.* Wastewater-based epidemiology in Beijing, China: prevalence of antibiotic use in flu season and association of pharmaceuticals and personal care products with socioeconomic characteristics [J]. *Environment International*, 2019, **125**: 152-160.
- [2] Yang L, Zhou Y Q, Shi B, *et al.* Anthropogenic impacts on the contamination of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the coastal environments of the Yellow and Bohai seas [J]. *Environment International*, 2020, **135**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105306.
- [3] Zhao W X, Yu G, Blaney L, *et al.* Development of emission factors to estimate discharge of typical pharmaceuticals and personal care products from wastewater treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144556.
- [4] Bu Q W, Cao H M, He X F, *et al.* Is disposal of unused pharmaceuticals as municipal solid waste by landfilling a good option? a case study in China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **105**(5): 784-789.
- [5] Fonseca E, Hernández F, Ibáñez M, *et al.* Occurrence and ecological risks of pharmaceuticals in a Mediterranean river in Eastern Spain [J]. *Environment International*, 2020, **144**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106004.
- [6] Yang H B, Lu G H, Yan Z H, *et al.* Occurrence, spatial-temporal distribution and ecological risks of pharmaceuticals and personal care products response to water diversion across the rivers in Nanjing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113132.
- [7] Tang J P, Wang S, Tai Y P, *et al.* Evaluation of factors influencing annual occurrence, bioaccumulation, and biomagnification of antibiotics in planktonic food webs of a large subtropical river in South China [J]. *Water Research*, 2020, **170**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115302.
- [8] 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 等. 典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 194-204.
Chen X, Zhang C J, Yang G P, *et al.* Detection method, distribution, and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in the yellow sea and the east China sea [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 194-204.
- [9] Liu M, Yin H W, Wu Q. Occurrence and health risk assessment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in tap water of Shanghai [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **183**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109497.

- [10] Lulijwa R, Rupia E J, Alfaro A C. Antibiotic use in aquaculture, policies and regulation, health and environmental risks: a review of the top 15 major producers[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, **12**(2): 640-663.
- [11] Bu Q W, Cao Y B, Yu G, *et al.* Identifying targets of potential concern by a screening level ecological risk assessment of human use pharmaceuticals in China[J]. *Chemosphere*, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125818.
- [12] 邓小刚. 海南农村生活污水治理探索与思考[J]. *环境保护*, 2017, **45**(12): 26-28.
Deng X G. Exploration and consideration on rural domestic sewage treatment in Hainan province [J]. *Environmental Protection*, 2017, **45**(12): 26-28.
- [13] Zhang R J, Zhang R L, Yu K F, *et al.* Occurrence, sources and transport of antibiotics in the surface water of coral reef regions in the South China Sea: potential risk to coral growth [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **232**: 450-457.
- [14] Zhou Y Q, Meng J, Zhang M, *et al.* Which type of pollutants need to be controlled with priority in wastewater treatment plants: traditional or emerging pollutants? [J]. *Environment International*, 2019, **131**, doi: 10.1016/j.envint.2019.104982.
- [15] 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[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1852-1862.
- [16] Guruge K S, Goswami P, Tanoue R, *et al.* First nationwide investigation and environmental risk assessment of 72 Pharmaceuticals and personal care products from Sri Lankan surface waterways[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 683-695.
- [17] 周颖, 吴东海, 陆光华, 等. 河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 159-165.
Zhou Y, Wu D H, Lu G H, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of PPCPs in drinking water sources of Henan province[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 159-165.
- [18] Yan Z H, Yang H H, Dong H K, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of organic micropollutants in the lower reaches of the Yangtze River, China: a case study of water diversion[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 223-232.
- [19] 秦伟, 白文荣, 周明月, 等. 北运河表层水体中微量有机污染物分布特征及潜在风险[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 649-658.
Qin W, Bai W R, Zhou M Y, *et al.* Potential risk and distribution characteristics of trace organic pollutants in surface water of Beiyun River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 649-658.
- [20] Szymczycha B, Borecka M, Białk-Bielińska A, *et al.* Submarine groundwater discharge as a source of pharmaceutical and caffeine residues in coastal ecosystem: bay of Puck, southern Baltic Sea case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136522.
- [21] Kurwadkar S T, Adams C D, Meyer M T, *et al.* Effects of sorbate speciation on sorption of selected sulfonamides in three loamy soils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, **55**(4): 1370-1376.
- [22] 叶计朋, 邹世春, 张干, 等. 典型抗生素类药物在珠江三角洲水体中的污染特征[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 384-388.
- Ye J P, Zou S C, Zhang G, *et al.* Characteristics of selected antibiotics in the aquatic environment of the Pearl River Delta, south China[J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(2): 384-388.
- [23] 王嘉玮, 魏红, 杨小雨, 等. 渭河西安段磺胺类抗生素的分布特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(12): 2574-2583.
Wang J W, Wei H, Yang X Y, *et al.* Occurrence and ecological risk of sulfonamide antibiotics in the surface water of the Weihe Xi'an section [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(12): 2574-2583.
- [24] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [25] 叶赛, 张奎文, 姚子伟, 等. 环渤海海域磺胺类药物的含量特征[J]. *大连海事大学学报*, 2007, **33**(2): 71-74.
Ye S, Zhang K W, Yao Z W, *et al.* Occurrence of sulfonamide pharmaceuticals in water column around Bohai sea[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2007, **33**(2): 71-74.
- [26] Cantwell M G, Katz D R, Sullivan J C, *et al.* Spatial patterns of pharmaceuticals and wastewater tracers in the Hudson River Estuary[J]. *Water Research*, 2018, **137**: 335-343.
- [27] Valcárcel Y, Alonso S G, Rodríguez-Gil J L, *et al.* Analysis of the presence of cardiovascular and analgesic/anti-inflammatory/antipyretic pharmaceuticals in river-and drinking-water of the Madrid Region in Spain [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(7): 1062-1071.
- [28] 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, Lu 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.
- [29] 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 等. 辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4553-4561.
Zhang X J, Bai Y W, Zhang Y, *et al.* Occurrence, distribution, and ecological risk of antibiotics in surface water in the Liaohe River Basin, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4553-4561.
- [30] 王娅南, 彭洁, 黄合田, 等. 贵阳市城市河流典型抗生素的分布特征[J]. *环境化学*, 2018, **37**(9): 2039-2048.
Wang Y N, Peng J, Huang H T, *et al.* Distribution characteristics of typical antibiotics in Urban Rivers of Guiyang City [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(9): 2039-2048.
- [31] 魏红, 王嘉玮, 杨小雨, 等. 渭河关中段表层水中抗生素污染特征与风险[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2255-2262.
Wei H, Wang J W, Yang X Y, *et al.* Contamination characteristic and ecological risk of antibiotics in surface water of the Weihe Guanzhong section[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2255-2262.
- [32] 王瑞杰, 裘钱玲琳, 李国祥, 等. 宁波月湖水体中抗生素的分布与生态风险评价[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1616-1624.
Wang R J, Qiuqian L L, Li G X, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of selected

- antibiotics in Moon Lake, Ningbo City [J]. *Journal of Lake Science*, 2018, **30**(6): 1616-1624.
- [33] Tamtam F, Mercier F, Bot B L, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics in the Seine River in various hydrological conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **393**(1): 84-95.
- [34] da Silva B F, Jelic A, López-Serna R, *et al.* Occurrence and distribution of pharmaceuticals in surface water, suspended solids and sediments of the Ebro river basin, Spain [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(8): 1331-1339.
- [35] Kasprzyk-Hordern B, Dinsdale R M, Guwy A J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK [J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3498-3518.
- [36] Arikan O A, Rice C, Codling E. Occurrence of antibiotics and hormones in a major agricultural watershed [J]. *Desalination*, 2008, **226**(1-3): 121-133.
- [37] McArdell C S, Molnar E, Suter M J F, *et al.* Occurrence and fate of macrolide antibiotics in wastewater treatment plants and in the glatt valley watershed, Switzerland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5479-5486.
- [38] Mandaric L, Diamantini E, Stella E, *et al.* Contamination sources and distribution patterns of pharmaceuticals and personal care products in Alpine rivers strongly affected by tourism [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **590-591**: 484-494.
- [39] Ren B N, Geng J, Wang Y, *et al.* Emission and ecological risk of pharmaceuticals and personal care products affected by tourism in Sanya City, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**: 3083-3097.
- [40] 人民网. 央视曝光三亚内河污染 专家: 检测出强致癌物 [EB/OL]. http://news.cnr.cn/native/gd/20150413/t20150413_518302939.shtml, 2015-04-13.
- [41] 三亚市气候中心. 2019 年 2 月三亚市城市气候监测公报 [EB/OL]. <http://www.sanya.gov.cn/sanyasite/gggs/201903/6217488ce6b946f6adcdc65be82531fc.shtml>, 2019-03-05.
- [42] 三亚市气候中心. 2018 年 7 月三亚市城市气候监测公报 [EB/OL]. <http://www.sanya.gov.cn/sanyasite/gggs/201808/903493a3855e499092623c10a2dfe374.shtml>, 2018-08-09
- [43] 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.
- [44] Du J, Zhao H X, Liu S S, *et al.* Antibiotics in the coastal water of the South Yellow Sea in China: occurrence, distribution and ecological risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 521-527.
- [45] 周志洪, 赵建亮, 魏晓东, 等. 珠江广州段水体抗生素的复合污染特征及其生态风险 [J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- Zhou Z H, Zhao J L, Wei X D, *et al.* Co-occurrence and ecological risk of antibiotics in surface water of Guangzhou section of Pearl River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- [46] Grung M, Källqvist T, Sakshaug S, *et al.* Environmental assessment of Norwegian priority pharmaceuticals based on the EMEA guideline [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **71**(2): 328-340.
- [47] Ma R X, Wang B, Yin L N, *et al.* Characterization of pharmaceutically active compounds in Beijing, China: occurrence pattern, spatiotemporal distribution and its environmental implication [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **323**: 147-155.
- [48] Rosal R, Rodea-Palomares I, Boltes K, *et al.* Ecotoxicity assessment of lipid regulators in water and biologically treated wastewater using three aquatic organisms [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(1): 135-144.
- [49] Li W H, Gao L H, Shi Y L, *et al.* Occurrence, distribution and risks of antibiotics in urban surface water in Beijing, China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(9): 1611-1619.
- [50] Verlicchi P, Aukidy M A, Zambello E. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **429**: 123-155.
- [51] Backhaus T, Faust M. Predictive environmental risk assessment of chemical mixtures: a conceptual framework [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(5): 2564-2573.
- [52] Hu Y, Yan X, Shen Y, *et al.* Antibiotics in surface water and sediments from Hanjiang River, Central China: occurrence, behavior and risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **157**: 150-158.
- [53] Chen H Y, Jing L J, Teng Y G, *et al.* Characterization of antibiotics in a large-scale river system of China: occurrence pattern, spatiotemporal distribution and environmental risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 409-418.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i>	(4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i>	(4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i>	(4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i>	(4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i>	(4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i>	(4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i>	(4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i>	(4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i>	(4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i>	(4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi	(4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i>	(4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i>	(4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing	(4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i>	(4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i>	(4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i>	(4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i>	(4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i>	(4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen	(4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai	(4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i>	(4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun	(4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i>	(4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei	(4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i>	(4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i>	(4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i>	(4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i>	(4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i>	(4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i>	(4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e	(4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i>	(4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i>	(4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i>	(4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i>	(4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i>	(4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i>	(4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i>	(4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i>	(4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i>	(5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i>	(5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i>	(5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei	(5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi	(5046)