

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 ..... 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 ..... 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 ..... 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 ..... 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 ..... 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 ..... 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 ..... 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM<sub>1</sub> 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017年) ..... 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 中二次无机离子特征及生成机制 ..... 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 ..... 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征和来源解析 ..... 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 ..... 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 ..... 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 ..... 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 ..... 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 ..... 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 ..... 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 ..... 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 ..... 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 ..... 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 ..... 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 ..... 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 ..... 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 ..... 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 ..... 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 ..... 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 ..... 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 ..... 韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 ..... 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 ..... 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 ..... 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 ..... 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 ..... 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 ..... 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响 ..... 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 ..... 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 ..... 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 ..... 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 ..... 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 ..... 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 ..... 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 ..... 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 ..... 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 ..... 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 ..... 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 ..... 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 ..... 罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济关系 ..... 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 ..... 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

# 广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价

罗嘉豪<sup>1,2</sup>, 王煜凯<sup>3</sup>, 原珂<sup>4</sup>, 卢耀斌<sup>1,2</sup>, 罗丽娟<sup>1,2\*</sup>, 栾天罡<sup>1,2,5</sup>

(1. 广东工业大学生态环境与资源学院, 广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室, 广州 510006; 2. 化学与精细化工广东省实验室揭阳分中心, 揭阳 515200; 3. 广东省毒品实验技术中心, 广东省精神活性物质监测与安全重点实验室, 广州 510232; 4. 中山大学海洋科学学院, 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 珠海 519082; 5. 中山大学生命科学学院, 水产动物疫病防控与健康养殖全国重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 随着药物活性化合物(PhACs)的大量生产和使用, PhACs已成为环境中的一类新污染物. 为了调查 PhACs 在广东省的污染特征, 采集了全广东省 21 个城市, 包括 178 个乡镇及行政区, 共 186 个污水厂的原始污水. 采用全自动固相萃取仪和高效率液相色谱-三重四级杆质谱联用仪, 分析了污水厂进水中 10 种典型 PhACs 的污染水平, 全面揭示了 PhACs 在广东省的空间分布特征, 并对 PhACs 的潜在生态风险进行评价. 调查结果表明, 全部污水厂均有 PhACs 检出, 各污水厂进水中  $\sum$  PhACs 质量浓度范围为 21.00 ~ 9 558.25 ng·L<sup>-1</sup>, 其中美托洛尔、对乙酰氨基酚、苯扎贝特和咖啡因是广东省污水厂进水中的主要污染物. 在空间分布上, 广东省各区域  $\sum$  PhACs 质量浓度平均值呈现珠三角 > 粤北 > 粤东 ≈ 粤西的分布特征. 根据污水厂的处理工艺, 对  $\sum$  PhACs 质量浓度超过 2 500 ng·L<sup>-1</sup> 的污水厂的出水质量浓度进行估算, 并根据估算的出水进行 PhACs 的生态风险评价. 结果表明, 广东省 PhACs 的生态风险较低, 苯扎贝特在韶关、江门和深圳呈现出中风险,  $\sum$  PhACs 生态风险最高的地区为韶关.

**关键词:** 污水处理厂; 进水; 药物活性化合物(PhACs); 空间分布特征; 生态风险评价

**中图分类号:** X131.2; X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)11-6149-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202212060

## Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province

LUO Jia-hao<sup>1,2</sup>, WANG Yu-kai<sup>3</sup>, YUAN Ke<sup>4</sup>, LU Yao-bin<sup>1,2</sup>, LUO Li-juan<sup>1,2\*</sup>, LUAN Tian-gang<sup>1,2,5</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Jieyang Branch of Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory (Rongjiang Laboratory), Jieyang 515200, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Monitoring and Safety of Psychoactive Substances, Guangdong Drug Experimental Technology Center, Guangzhou 510232, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 5. State Key Laboratory of Biocontrol, School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Pharmaceutically active compounds (PhACs) have become a class of new pollutants in the environment after extensive production and use of PhACs in China. To investigate the pollution characteristics of PhACs in Guangdong Province, raw sewage was collected from 186 sewage treatment plants in 21 cities, including 178 townships and administrative districts in Guangdong Province. The pollution levels of ten typical PhACs in influent water of sewage treatment plants were analyzed using automatic solid phase extraction and high performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry. The spatial distribution characteristics of PhACs in Guangdong Province were fully revealed, and the potential ecological risks of PhACs were evaluated. The results showed that PhACs were detected in all wastewater plants, and the mass concentration of PhACs ranged from 21.00 to 9 558.25 ng·L<sup>-1</sup>. Metoprolol, acetaminophen, bezafibrate, and caffeine were the main pollutants. In terms of spatial distribution, the average mass concentration of  $\sum$  PhACs in various regions of Guangdong Province was in the following order: Pearl River Delta > North Guangdong > East Guangdong ≈ West Guangdong. When the mass concentration of  $\sum$  PhACs was over 2 500 ng·L<sup>-1</sup> in the influent water of sewage treatment plants, the concentration of PhACs in effluent was estimated according to the sewage disposal technology. The ecological risk of PhACs was carried out based on the effluent. The results revealed that the ecological risk of PhACs was low in Guangdong Province, and the risk of bezafibrate was moderate in the cities of Shaoguan, Jiangmen, and Shenzhen. The highest ecological risk of  $\sum$  PhACs was located in Shaoguan.

**Key words:** sewage treatment plant; influent water; pharmaceutical active compounds(PhACs); spatial distribution characteristics; ecological risk assessment

药物活性化合物 (pharmaceutically active compounds, PhACs) 作为环境中新兴的有机污染物, 主要来自于医药产业及生物体的代谢废物, 这类污染物包括非甾体抗炎药、心血管药、中枢神经系统药、抗癌药、呼吸药和抗菌药等<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着 PhACs 在我国的大量生产与应用, 相当数量的

收稿日期: 2022-12-07; 修订日期: 2023-02-05

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111350003); 广东引进创新创业团队项目(2019ZT08L213); 科技部重点领域创新团队项目(SQ2019RA4E000052); 广东省重点实验室项目(2019B121203011)

作者简介: 罗嘉豪(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境新污染物的监测分析, E-mail: luojiahao2020gdut@163.com

\* 通信作者, E-mail: luolij3@gdut.edu.cn

PhACs 及其代谢产物排入自然环境中,对水生生物及人类的健康安全造成威胁<sup>[2-5]</sup>. 发达国家已经开始关注并持续监测污水处理厂及地表水体中 PhACs 的污染特征,并对环境中的药品建立了风险评估数据库和风险排名<sup>[6-8]</sup>. 而中国目前对 PhACs 的监控主要以抗生素和抗性基因为主<sup>[9]</sup>,对抗生素以外的药物污染特征的研究还比较缺乏<sup>[10,11]</sup>.

本研究采集了广东省 21 个地级市主要城区中 186 个污水厂的原始污水,分析了污水处理厂进水中的 10 种典型的 PhACs 的污染特征,并与国内外污水厂中 PhACs 的污染水平进行对比,同时采用风险商值(RQ)法对污水进行了生态风险评价,以期为我国污水处理厂中 PhACs 的污染水平提供数据,并为相关高风险药物的管控提供数据支撑和理论基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

采用高效液相色谱-三重四级杆质谱联用仪(QTRAP5500,美国,AB SCIEX)、高通量全自动固相萃取仪(Fotector Plus,中国,睿科集团股份有限公司)、真空离心浓缩仪(JM50-Plus,中国,北京吉艾姆科技有限公司)、固相萃取小柱(Oasis HLB,6 mL,500 mg,美国,Waters)、超纯水仪(Milli-Q Advantage,美国,Milli Pore).

本研究使用的化学溶剂甲酸、乙酸铵和甲醇均

为色谱级,购自上海阿拉丁公司. PhACs 标准品及回收率指示物的纯度均大于 98%,PhACs 标准品及回收率指示物的种类、中英文名称、缩写、分子式、相对分子质量和来源见表 1.

### 1.2 样品采集

本研究采集了广东省 186 个污水厂的原始污水,采样点覆盖了省内 21 个城市,178 个乡镇及行政区. 样品和污水厂基本信息来源于广东省精神活性物质监测与安全重点实验室. 污水厂使用自动样品采样器采集污水厂进水口的 24 h 复合水样 600 mL,随后将污水样品冷链运输至实验室,于 -20℃ 冰箱冷冻储存,待实验分析. 样品采集时间为 2020 年 11 月 11 ~ 15 日,每个污水厂连续采样 3 d,一共获得 630 个污水样品. 采样点位置如图 1 所示.

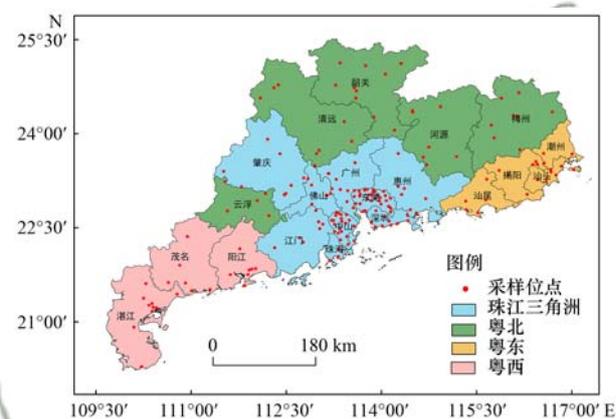


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Schematic distribution of sampling sites

表 1 PhACs 标准品及回收率指示物的种类、中英文名称、缩写、分子式、相对分子质量和来源

Table 1 Category, Chinese and English name, abbreviation name, molecular formula, molecular weight, and source of PhACs and surrogate standards

种类	中文名	英文名	缩写	分子式	相对分子质量	来源
H2 受体拮抗剂	兰索拉唑	lansoprazole	LPZ	C <sub>16</sub> H <sub>14</sub> F <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub> S	369.36	北京海岸鸿蒙公司
	索他洛尔	sotalol	STL	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S	272.36	北京海岸鸿蒙公司
β 受体拮抗剂	美托洛尔	metoprolol	MEP	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub> NO <sub>3</sub>	267.36	天津阿尔塔公司
	阿替洛尔	atenolol	ATL	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	361.82	北京海岸鸿蒙公司
消炎镇痛剂	对乙酰氨基酚	acetaminophen	ATP	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	151.16	武汉恒标公司
	异丙安替比林	propylantipyrine	APY	C <sub>14</sub> H <sub>18</sub> N <sub>2</sub> O	230.30	武汉恒标公司
血脂调节剂	美伐他汀	mevastatin	MVS	C <sub>23</sub> H <sub>34</sub> O <sub>5</sub>	390.51	北京海岸鸿蒙公司
	苯扎贝特	bezafibrate	BEZ	C <sub>19</sub> H <sub>20</sub> ClNO <sub>4</sub>	361.82	武汉恒标公司
其它 PhACs	双异丙吡胺	disopyramide	DPM	C <sub>21</sub> H <sub>29</sub> N <sub>3</sub> O	339.47	天津阿尔塔公司
	咖啡因	caffeine	CAF	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	194.19	北京海岸鸿蒙公司
回收率指示物	咖啡因碳 13	caffeine- <sup>13</sup> C <sub>3</sub>	CAF- <sup>13</sup> C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub> <sup>13</sup> C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	197.15	美国 Sigma-Aldrich 公司

### 1.3 样品前处理

将储存的水样在室温下解冻,摇匀,使用 0.45 μm 水系滤膜过滤. 过滤后的水样取 80 mL,采用高通量全自动固相萃取仪进行萃取浓缩. 固相萃取使用 HLB 小柱,主要流程包括活化、上样、淋洗和洗脱. 具体流程如下:先用 10 mL 甲醇和 10 mL 超纯水

对 HLB 小柱进行活化,将过滤的水样以 4 mL·min<sup>-1</sup> 流速通过小柱,水样中的目标物 PhACs 被吸附于 HLB 小柱中. 然后用 5 mL 超纯水淋洗吸附柱,洗去其中的水溶性杂质,真空干燥 5 min 后,用 8 mL 甲醇分两次将小柱中的目标物洗脱,收集洗脱液于 15 mL 离心管中. 最后使用真空浓缩仪(40℃,1500

$r \cdot \text{min}^{-1}$ , 0 Pa), 将样品浓缩至近干, 用超纯水定容至 1 mL. 溶液经 0.22  $\mu\text{m}$  有机相滤膜过滤后转移到 2 mL 棕色进样瓶中, 于  $-20^\circ\text{C}$  冰箱保存, 等待上机分析.

#### 1.4 色谱和质谱条件

样品采用高效液相色谱-三重四级杆质谱联用仪 (LC-MS/MS) 进行分析. 色谱条件: 色谱柱为 Agilent ZORBAX Eclipse Plus C18 (50 mm  $\times$  3.0 mm, 1.8  $\mu\text{m}$ ), 前接保护柱 (Eclipse Plus C18, 3.0  $\times$  5

mm, 1.8  $\mu\text{m}$ ); 柱温  $40^\circ\text{C}$ , 进样体积 5  $\mu\text{L}$ , 流速为 0.3 mL  $\cdot$  min $^{-1}$ ; 流动相 A 为 5 mmol  $\cdot$  L $^{-1}$  乙酸铵 + 0.1% 甲酸的水溶液, 流动相 B 为纯甲醇.

质谱条件: 采用电喷雾离子源 (ESI), 正离子电离模式, 多反应监测模式分析. 喷雾气 (GSI) 气压为 241.32 kPa, 离子源温度为  $300^\circ\text{C}$ , 离子化电压为 3 000 V, 鞘气温度为  $250^\circ\text{C}$ , 鞘气气压为 241.32 kPa; 碰撞气和辅助气均为氮气. 目标 PhACs 的母离子、子离子和碰撞能列于表 2.

表 2 10 种 PhACs 的母离子、子离子、碰撞能、回收率、相对标准偏差 (RSD)、定性检测限 (LOD) 和定量检测限 (LOQ)

Table 2 Precursor ion, sub-ion ions, collision energy, recovery, relative standard deviation (RSD),

limit of detection (LOD), and limit of quantification (LOQ) of ten PhACs

PhACs	母离子	子离子 <sup>1)</sup> (碰撞能/V)	回收率/%	RSD/%	LOD/ng $\cdot$ L $^{-1}$	LOQ/ng $\cdot$ L $^{-1}$
LPZ	370.1	<b>251.9</b> (17), 119.1 (21)	75.3	7.7	0.0125	0.050
STL	272.7	255.0 (17), <b>213.0</b> (26)	74.9	2.0	0.0250	0.175
MEP	268.6	159.2 (28), <b>132.9</b> (36)	76.9	15.3	0.0125	0.125
ATL	267.6	145.1 (36), <b>74</b> (30)	107.0	1.6	0.0125	0.125
ATP	152.0	93.0 (30), <b>64.8</b> (39)	123.6	12.1	0.0375	0.188
APY	231.0	189.1 (53), <b>76.9</b> (63)	102.6	8.6	0.0125	0.050
MVS	392.0	274.0 (23), <b>188.0</b> (27)	80.1	8.1	0.0250	0.088
BEZ	360.2	231.0 (19), <b>130.0</b> (28)	98.6	9.9	0.5000	1.250
DPM	340.6	239.2 (25), <b>195.0</b> (42)	86.5	15.3	0.0038	0.010
CAF	195.0	138.0 (27), <b>110.0</b> (32)	116.6	1.4	0.0250	0.125
CAF- $^{13}\text{C}_3$	198.1	140.1 (27), <b>112.0</b> (32)	115.7	4.3	0.0875	0.250

1) 黑体字为定量离子

#### 1.5 质量控制与保证

在水样中加入 CAF- $^{13}\text{C}_3$  作为回收率指示物对实验过程进行监控, 添加浓度为 0.125  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . 将 10 种 PhACs 的混合标准溶液用甲醇稀释, 分别得到质量浓度为 0.01、0.05、0.1、0.5、1、5、10、20、50、100 和 250  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  的混合标准溶液, 使用 LC-MS/MS 进行测定并绘制标准曲线, 所有目标化合物的回归系数 ( $R^2$ ) 均大于 0.99. 向 80 mL 超纯水中准确加入 10 种 PhACs 标准混合溶液做加标回收实验, 加标浓度为 0.125  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 设 3 个平行样. 方法的回收率为 74.9% ~ 123.6%, 相对标准偏差 (RSD) 为 1.4% ~ 15.3% (表 2). 以目标物质信噪比为 3 倍 ( $S/N = 3$ ) 和 10 倍 ( $S/N = 10$ ) 的物质浓度作为仪器的定性检测限 (limit of detection, LOD) 和定量检测限 (limit of quantification, LOQ). 根据样品的浓缩倍数, 计算出目标分析物的方法 LOD 和 LOQ 分别为 0.0038 ~ 0.5000 ng  $\cdot$  L $^{-1}$  和 0.010 ~ 1.250 ng  $\cdot$  L $^{-1}$  (表 2). 为了监测 LC-MS/MS 的仪器稳定性, 每 50 个样品之间插入一个标准样品作为质量控制样品.

#### 1.6 生态风险评价

采用风险商值法 (risk quotients, RQ), 评价各区域污水中 PhACs 的潜在生态风险. RQ 法是基于实

验室毒理数据从化学响应角度对污染物的生态毒性及风险水平进行评估. RQ 值是污染物实际检出浓度 (measured environmental concentration, MEC) 与预测无影响浓度 (predicted environmental concentration, PNEC) 的比值, 其计算公式见式 (1) 和式 (2)<sup>[10]</sup>. 各污染物的毒理数据和预测无效应浓度值见表 3. 因不同研究中药物毒理性数据不同, 本文根据保守的原则, 对同一种药物选用查阅资料中最小的毒性终点值. 对于缺乏实验毒理数据的药物, 采用美国环保署发布的预测模型 (ECOSAR) 来确定其毒性<sup>[12]</sup>.

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

$$\text{PNEC} = \frac{\text{LC}_{50} \text{ or } (\text{EC}_{50}) \text{ or } \text{NOEC}}{\text{AF}} \quad (2)$$

式中, MEC 为化合物的实测浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; PNEC 为预测无效应浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\text{LC}_{50}$  为半致死浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\text{EC}_{50}$  为半数效应浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; NOEC 为无观察效应浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; or 表示根据化合物不同的毒性浓度选择不同的评价因子; AF 为评价因子, 根据欧盟水框架指令确定<sup>[13]</sup>.

环境中通常有多种污染物共同存在, 忽视污染物的混合风险可能会低估其对生态环境的影响<sup>[14]</sup>.

当多种污染物共存时,各采样点 PhACs 的综合生态风险用  $RQ_i$  来表示,详见式(3).

$$RQ_i = \sum_{j=1}^n \frac{MEC_{ij}}{PNEC_j} \quad (3)$$

式中, $RQ_i$  为样品  $i$  中全部目标化合物的综合生态风险商值;  $MEC_{ij}$  为样品  $i$  中化合物  $j$  的实测浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $PNEC_j$  为化合物  $j$  的预测无效应浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

表 3 PhACs 的毒性数据和 PNEC 值

Table 3 Toxicity data and PNEC values of PhACs

目标污染物	受试物种	种群	毒性终点	毒性终点浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	AF 值	PNEC 值 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
LPZ	— <sup>1)</sup>	鱼类	ChV <sup>2)</sup>	47	10	4.700	[12]
STL	<i>Daphnia similis</i>	蚤类	EC <sub>50</sub>	325 200	1 000	325.200	[6]
MEP	—	藻类	EC <sub>50</sub>	7 900	1 000	7.900	[15]
ATL	<i>Daphnia magna</i>	蚤类	NOEC	1 480	10	148	[16]
ATP	—	蚤类	EC <sub>50</sub>	9 200	1 000	9.200	[15]
APY	—	鱼类	LC <sub>50</sub>	706	1 000	0.706	[12]
MVS	—	藻类	EC <sub>50</sub>	1 190	1 000	1.190	[12]
BEZ	—	藻类	EC <sub>50</sub>	1 873	1 000	1.873	[15]
DPM	—	藻类	EC <sub>50</sub>	1 350	1 000	1.350	[12]
CAF	—	藻类	EC <sub>50</sub>	46 000	1 000	46	[17]

1) “—”表示原文献中未明确说明受试物种; 2) ChV 表示慢性毒性浓度

## 2 结果与讨论

### 2.1 广东省污水厂进水中 PhACs 的浓度特征

PhACs 在广东省 4 个区域的污水厂进水中均有不同程度的检出[图 2(a)]. 10 种目标药物中, MEP、ATL、ATP、APY 和 CAF 这 5 种药物在广东省 4 个区域的污水厂进水中检出率均达到 80% 以上. CAF 作为被普遍使用的精神药品, 检出率最高, 达到 100%. 其余 5 种药物(LPZ、STL、MVS、BEZ 和 DPM) 的检出率为 30.2%~60.3%.

大部分药物在 4 个区域的检出率无明显差异, 但是 LPZ、STL 和 MVS 这 3 种药物在不同区域中的检出率差异较为明显. LPZ 作为一种常见的处方

药, 在粤西的检出率明显低于其它三地. 胃病作为一种慢性病, 在老年人群中发生的概率较大. 滕晓霞等<sup>[18]</sup>对粤西地区老年人口慢性病情况调查中显示, 慢性胃病只占调查人口患病情况的 12.12%, 这与 LPZ 在粤西的低检出率情况相一致. STL 的检出率从大到小排列为: 珠三角 > 粤东 > 粤西 > 粤北, 呈现梯度性差异. STL 作为抗心律失常的处方药, 对堵塞性心肌病有较好的治疗效果, 其检出率的梯度性差异也揭示了环境因素对心脏性疾病的影响, 珠三角城市中一些受污染的土壤或水体或许会增加心脏病的患病风险<sup>[19]</sup>. MVS 作为一类降胆固醇的药物, 在粤东的检出率显著低于其它三地, 推测可能与粤东人们的生活习惯有关. 粤东地区以潮汕人为主, 普遍具有喝茶的习俗, 相对省内其它地区人群更不易患上高血脂和高胆固醇症<sup>[20,21]</sup>, 因此对于 MVS 这类药物具有更少的消费量.

各类 PhACs 的整体质量浓度水平如图 2(b) 所示, 并与国内外污水厂进水中 PhACs 的质量浓度(表 4)相比较. 广东省各地区所有检出的 PhACs 在污水中的质量浓度平均值为 0.004~7 112.4  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 其中, 质量浓度最高的是 ATP, 在不同城市的质量浓度平均值是 12.96~1 732.96  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占总 PhACs 的 48.85%. ATP 作为一种消炎镇痛剂, 其质量浓度水平与广州市消炎止痛药的消费量整体情况相一致<sup>[22]</sup>. 该浓度小于北京某污水厂的进水质量浓度<sup>[23]</sup>, 推测原因是北京检测的是服务 80 万人口的大型污水处理厂, 且采样方法是收集 24 h 的复合废水, 因此检出的药物质量浓度较大. APY 作为另一种非处方止痛药, 检出质量浓度范围为 ND~

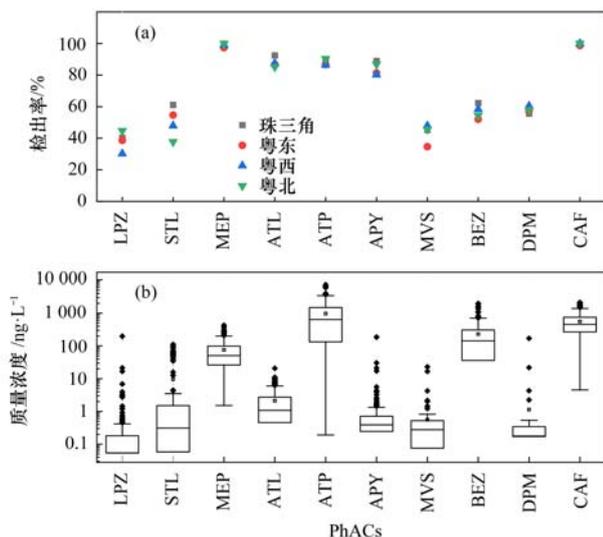


图 2 广东省污水厂进水中 PhACs 的检出率和质量浓度( $n=186$ )

Fig. 2 Detection rate and mass concentration of PhACs in the influent water of sewage plants in Guangdong Province( $n=186$ )

186.53 ng·L<sup>-1</sup>,远小于 ATP,这一情况或许与中国医疗政策有关.在2019年版的《国家基本医疗保险、工伤保险和生育保险药品目录》<sup>[24]</sup>中,以对乙酰氨基酚(ATP)为主要成分的7类止痛药被纳入了西药

名单,而 APY 则不在其中.根据国内外研究调查,水杨酸也是检出频率与浓度非常高的一类止痛药<sup>[25,26]</sup>,这解释了为何西班牙的12种消炎止痛药物的检出总质量浓度如此大<sup>[27]</sup>.

表4 国内外污水厂进水中 PhACs 的质量浓度对比

Table 4 Comparison of PhACs mass concentration in influent water of sewage plants at home and abroad

物质名称	PhACs 质量浓度 <sup>1)</sup> /ng·L <sup>-1</sup>						
	广东(本研究)	北京 <sup>[23]</sup>	天津 <sup>[28]</sup>	突尼斯 <sup>[26]</sup>	西班牙 <sup>[27]</sup>	瑞士 <sup>[29]</sup>	世界范围 <sup>[30]</sup>
LPZ	ND ~ 197.20	—	—	—	ND ~ 3 200 <sup>2)</sup>	—	—
STL	ND ~ 111.52	35	—	—	—	320	—
MEP	1.51 ~ 428.48	612	16.69 ~ 71.52	120 ~ 250	100 ~ 2 500 <sup>3)</sup>	240	50.20 ~ 122
ATL	ND ~ 20.80	45.50	—	2 400 ~ 5 900	—	2 170	5 176
ATP	0.19 ~ 7 112.44	12 669	243.86 ~ 2 157.03	—	10 000 ~ 70 000 <sup>4)</sup>	—	39 ~ 11 600
APY	ND ~ 186.53	—	—	—	0 ~ 400	—	—
MVS	ND ~ 22.99	—	—	—	ND	—	—
BEZ	ND ~ 1 982.63	—	—	—	2 000 ~ 40 000	—	106.24 ~ 3 105
DPM	ND ~ 170.39	—	—	—	—	—	—
CAF	4.54 ~ 2 127.43	12 555	40.97 ~ 872.54	139 900 ~ 439 400	—	—	—

1)“—”表示文献中没有相关数据,ND表示未检出;2)H2受体拮抗剂的总质量浓度;3)包括MET、ATL和STL在内的 $\beta$ 受体拮抗剂的总质量浓度;4)包括ATP在内的12种消炎止痛药的总质量浓度

LPZ作为H2受体拮抗剂一类的胃药,检出率(39.37%)与检出质量浓度(ND~197.20 ng·L<sup>-1</sup>)都偏低,这可能与LPZ作为处方药有关.而作为与LPZ作用相近的另外3种非处方药,西咪替丁、雷尼替丁和法莫替丁在污水厂中有着较高的检出水平<sup>[31]</sup>. $\beta$ 受体拮抗剂中,MEP的质量浓度(1.51~428.48 ng·L<sup>-1</sup>)最高,与国内外其它污水厂的检出质量浓度相当(表4);而STL和ATL的检出质量浓度则远低于国外污水厂<sup>[26,29]</sup>,与国内污水厂检出质量浓度相当<sup>[23,28]</sup>.国内外不同种类的 $\beta$ 受体拮抗剂之间的浓度差异反映了国内外用药习惯的差异.

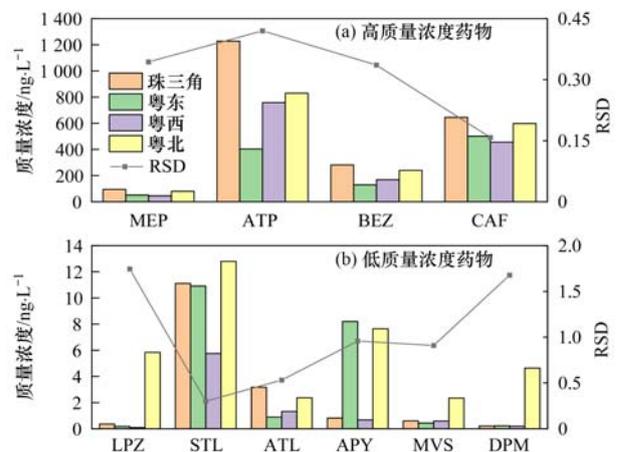
MVS的检出质量浓度较低,为ND~22.99 ng·L<sup>-1</sup>,而国内外对这类药物的报道较少,在西班牙污水厂的进出水中也均未检出<sup>[27]</sup>,这或许与它的替代品普伐他汀有关.普伐他汀是MVS的衍生物且已被证实比MVS在治疗高胆固醇方面更有效<sup>[32]</sup>,因此作为普伐他汀的原料,MVS在市场中的消费量和用量较少.另一种降脂药BEZ的检出质量浓度较大,为ND~1 982.63 ng·L<sup>-1</sup>,总体质量浓度小于西班牙污水厂<sup>[27]</sup>.

DPM质量浓度平均值较小,范围是ND~170.39 ng·L<sup>-1</sup>,在国内外污水厂研究中未见报道(表4).CAF作为各类饮品中最为常见的精神药品,在许多研究中均有对污水中CAF的报道.本研究中CAF的质量浓度范围为4.54~2 127.43 ng·L<sup>-1</sup>,这与之前天津的研究中的CAF质量浓度相当<sup>[28]</sup>,但小于2017年珠三角地区报道的CAF质量浓度<sup>[33]</sup>.值得注意的是根据现有报道,中国污水厂

中检出的CAF质量浓度普遍低于国外污水厂<sup>[34~36]</sup>.这一现象或许与国内外饮食差异有关,西方人对咖啡的偏好使得排入污水厂中的CAF质量浓度普遍在10<sup>4</sup> ng·L<sup>-1</sup>以上,有时能达到10<sup>5</sup> ng·L<sup>-1</sup><sup>[26]</sup>,而中国的污水厂中CAF质量浓度基本维持在5×10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup> ng·L<sup>-1</sup>的水平<sup>[33]</sup>.

## 2.2 广东省污水厂进水中 PhACs 的空间分布特征

广东省污水厂进水中的PhACs空间分布特征和组成如图3~5所示.在空间分布上,10种PhACs的总质量浓度( $\sum$  PhACs质量浓度)呈现出广州>深圳>珠三角其它城市>剩余其它城市的分布特



高质量浓度药物表示在全省质量浓度平均值>60 ng·L<sup>-1</sup>,低质量浓度药物表示在全省质量浓度平均值<60 ng·L<sup>-1</sup>,RSD值表示各药物在广东4个区域检出质量浓度的相对标准偏差

图3 广东省不同区域污水厂进水中 PhACs 的质量浓度平均值  
Fig. 3 Average mass concentration of PhACs in influent of sewage plants in different regions of Guangdong Province

征. 在全省范围内, ATP 和 CAF 的质量浓度水平在  $\sum$  PhACs 中质量分数较高, 为广东省污水厂进水中的主要污染物.

在图 3 中, 将 10 种 PhACs 根据质量浓度的大小分为高质量浓度药物(在全省质量浓度平均值  $> 60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和低质量浓度药物(在全省质量浓度平均值  $< 60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 高质量浓度药物包括 MEP、ATP、BEZ 和 CAF, 其中 ATP 为全省质量浓度平均值最高的药物, 为  $804.92 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其在珠三角的质量浓度平均值达到  $1228.04 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ . 值得注意的是, 在高质量浓度药物中, ATP 是在广东省不同区域中质量浓度相差最大的一种药物. 其在 4 个区域质量浓度平均值的相对标准偏差(RSD) 值达到 0.42, 其中珠三角和粤东地区的 ATP 质量浓度相差最大, 粤西与粤北无明显差距. 原因可能是, 珠三角作为人口稠密、经济发达的区域, 对消炎止痛一类的药品消费量巨大. 而图 4 中潮州市的药物比例则解释了粤东 ATP 浓度低的原因: 大部分城市中, ATP 的质量分数在 50% 左右, 而潮州市的 ATP 质量分数只有 4%, 甚至低于 MEP(6%) 和 BEZ(5%). 同样为高浓度药物的 CAF, 在广东省各区域中质量浓度相差不大, 其 RSD 值为 0.16. MEP 和 BEZ 在全省质量浓度平均值分别为  $67.81 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $204.82 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 这两种药在不同区域中质量浓度相差不大.

低浓度药物包括 LPZ、STL、ATL、APY、MVS 和 DPM[图 3(b)], 其中多种低浓度药物呈现明显的区域分布差异. LPZ、STL、MVS 和 DPM 这 4 种药

物在粤北检出的质量浓度显著高于其它三地, 其中 LPZ 和 DPM 的 RSD 值是所有药物中最大的两个, 分别达到 1.74 和 1.68, 这也许与粤北地区的人口组成及经济发展水平有关. 粤北地区较低的城镇化率和较多的农村人口使得药物滥用情况更为普遍. STL 在粤西地区检出的质量浓度明显小于其它三地, 而在粤北地区检出的质量浓度最大. 但从图 2(a) 中可看出 STL 在粤北地区的检出率是 4 地中最小的, 只有 37.72%, 约为珠三角地区检出率(61.16%) 的一半, 说明粤北地区中只在少数几个污水厂检出大质量浓度的 STL. 通过与原始数据进行比对, 发现粤北地区 STL 检出的质量浓度前 6 位分别为 72.0、62.5、61.5、60.8、59.9 和  $58.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 远大于粤北地区 STL 质量浓度平均值( $12.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 以上 6 个数据分别于韶关市曲江、河源市龙川县、清远市连山县、清远市阳山县、梅州市丰顺县和韶关市翁源县检出, 说明以上地区的药物滥用情况值得重点关注. 考虑到粤北地区的城镇化率较低, 乡镇较多, 而目前我国多数乡镇污水处理厂存在工艺较为落后, 管理不当等问题, 多种药物经过一般的活性污泥二级处理后转化率小于 50%<sup>[37-39]</sup>, 很大一部分仍附着在活性污泥上或随废水一起排出. 因此粤北地区环保部门需要重点关注当地污水厂存在的问题, 以降低新污染物带来的生态风险.

各城市不同 PhACs 的质量分数如图 4 所示, 总体而言, 全省污水厂中, 质量分数最高的 4 种 PhACs

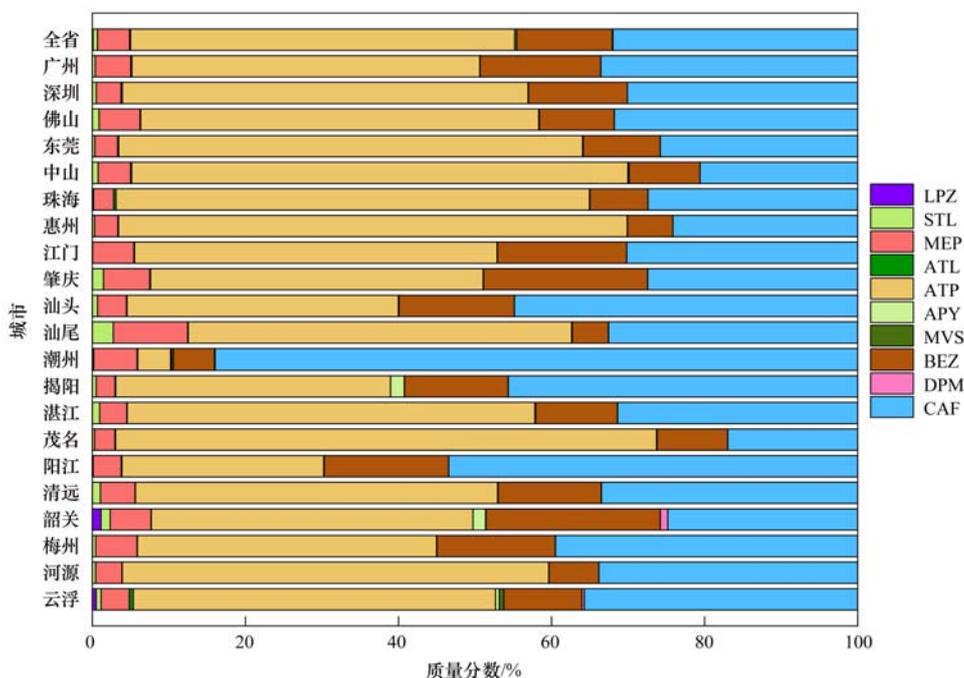


图 4 广东省各城市不同 PhACs 的质量分数

Fig. 4 Mass fraction of PhACs in different cities of Guangdong Province

分别是 ATP、CAF、BEZ 和 MEP, 质量分数分别为 50%、32%、13% 和 4%, 这 4 种 PhACs 质量分数达到 99%, 其余 PhACs 则不足 1%。各市污水厂中污染物构成比例没有太大差别。在茂名市污水厂中, ATP 质量分数为全省最高, 达到 71%, 而 CAF 则为全省最低, 为 17%。在潮州市污水厂中则相反, CAF 质量分数为全省最高, 达到 84%, ATP 则为全省最低, 为 4%, 说明粤西地区非甾体抗炎药的滥用情况较为严重, 也反映了粤西粤东两地在含 CAF 的饮品消费量上有较大差别。在汕尾市中, MEP 质量分数为全省最高, 达到 10%。值得注意的是粤北地区的污水厂中 PhACs 构成比例较为不同, 韶关市中 LPZ、STL、APY 和 DPM 质量分数分别达到了 1.1%、1.2%、2% 和 1%, 粤北其它市中也出现了低浓度药物质量分数大于全省平均质量分数的情况, 这一现象反映了粤北地区的用药情况较复杂。

各城市及各污水厂的  $\sum$  PhACs 质量浓度平均值如图 5 所示。广州和深圳是  $\sum$  PhACs 质量浓度平均值最大的两个城市, 分别为  $3\ 104.01\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $3\ 268.40\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。全省浓度最大的采样点位于深圳市龙岗区的布吉水质净化厂,  $\sum$  PhACs 为  $9\ 558.25\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。深圳市有多个点位的  $\sum$  PhACs 大于  $4\ 000\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 远高于全省平均水平 ( $1\ 647.80\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )。总体而言, 珠三角城市的  $\sum$  PhACs 质量浓度平均值远高于其它城市。东莞市的  $\sum$  PhACs 质量浓度平均值只有  $1\ 480.49\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 低于全省平均水平, 与汕头市的质量浓度水平相当 ( $1\ 490.02\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )。粤东与粤西地区各市的  $\sum$  PhACs 质量浓度平均值相差不多, 而粤北地区的整体质量浓度水平则高于粤东与粤西, 尤其在一些点位中呈现出明显高于地区

平均水平的质量浓度, 值得引起当地环保部门的注意。

### 2.3 广东省 PhACs 的生态风险

污水厂的出水是自然水体中污染物的重要来源。Gros 等<sup>[27]</sup>的研究表明现有污水厂的活性污泥工艺并不能有效去除所有药物, 多种药物的平均去除率只有 50% 左右。Verlicchi 等<sup>[37]</sup>也统计了欧洲地区的 264 家污水处理厂在二级处理后对 118 种药物的去除情况, 结果也显示部分药物在经过污水厂二级处理后浓度并无明显变化, 在出水或接纳水体中仍有很高浓度的残留。甚至有研究发现, 污水厂处理单元中发生的酶促反应可将卡马西平葡萄糖苷酸与其它结合的代谢物转化为母体化合物, 导致卡马西平在内的部分药物出水质量浓度大于其进水质量浓度<sup>[40,41]</sup>。

污水厂采用不同工艺对药物的去除率会有明显差异, 可以根据不同污水厂的处理工艺估算其 PhACs 的出水质量浓度, 从而计算接纳水体及排放地区的生态风险。通过综合比较各种处理工艺的平均去除率<sup>[23,26,27,29,42~44]</sup>, 统计了 60 个进水中  $\sum$  PhACs 质量浓度较高的污水厂 ( $\sum$  PhACs 质量浓度  $>2\ 500\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 后面统称高质量浓度污水厂) 所用工艺, 将采样污水厂工艺的去除率由低到高大致分为 3 个类别: 传统活性污泥或其变形工艺、厌氧-缺氧-好氧生物处理工艺 (AAO) 或氧化沟工艺、先进工艺 (二级处理后接三级处理)。分类估算出 60 个高质量浓度污水厂的出水质量浓度, 并对相关地区进行生态风险评价。

高浓度污水厂存在的生态风险和在各市达到的风险等级如图 6 和图 7 所示, 其中风险等级的划分根据欧盟委员会的指导文件确定<sup>[13]</sup>。总体而言, 所有地区均未达到高生态风险。在各市中存在生态风险的药物是 MEP、APY、BEZ 和 DPM, 其中 BEZ 在韶关、江门和深圳三市中达到了中风险。韶关共有 4 种 PhACs 存在生态风险 (MEP、APY、BEZ 和 DPM), 为所有地市中最多。对于多种药物的综合生态风险,  $\sum$  PhACs 在除惠州以外的地区均呈现出中低生态风险。

在图 7 中可以看到 LPZ、MEP、APY、BEZ 和 DPM 这 5 种药物在少数几个污水厂中存在生态风险, 其中 BEZ 的生态风险最高, 达到中生态风险, 位于韶关市丰城镇生活污水处理厂。在各污水厂  $\sum$  PhACs 的 RQ 值排名中, 排名前 2 的污水厂均位于韶关, 其次是广州、深圳等地的污水厂。因此需要

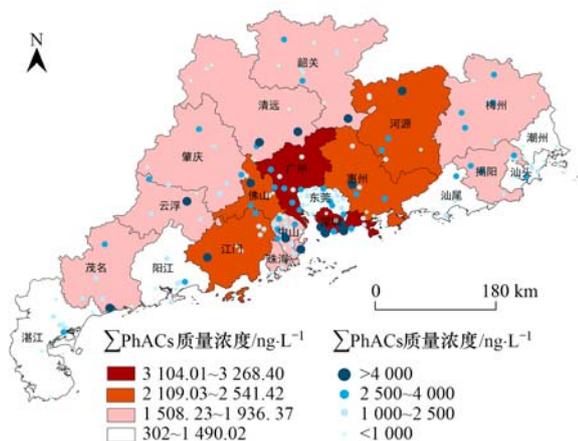


图 5 各城市污水中的  $\sum$  PhACs 质量浓度

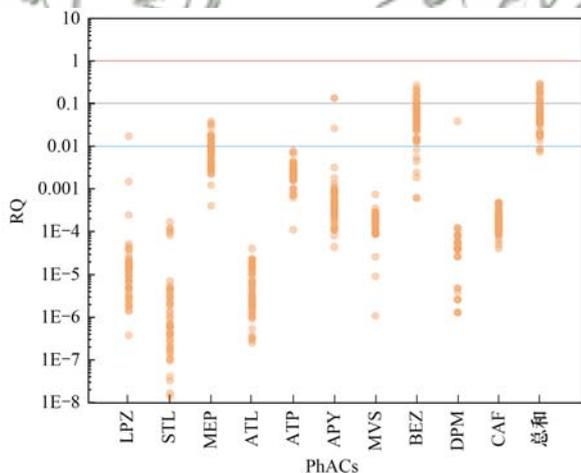
Fig. 5 Mass concentration of  $\sum$  PhACs in sewage of different cities in Guangdong



图6 广东省各城市的PhACs生态风险评价

Fig. 6 Ecological risk assessment of PhACs in different cities of Guangdong Province

对粤北尤其是韶关地区的药物污染情况进行持续监测,同时对当地污水厂的工艺进行改造升级,以提高对新污染物的去除率。



0.01 ≤ RQ < 0.1 为低风险, 0.1 ≤ RQ < 1 为中风险,  
1 ≤ RQ 为高风险

图7 广东省PhACs的RQ值

Fig. 7 RQ values of PhACs in Guangdong Province

有研究表明未经处理的污水对北京城市河流中PhACs的贡献超过了35%<sup>[45]</sup>,在我国城市郊区和农村地区,污水直接排放的现象更加严重.基于以上原因,某些受纳水体中PhACs质量浓度会高于污水厂出水<sup>[23]</sup>.同时其他研究者对广东省污水厂中新污染物的研究也表明,除PhACs之外,污水厂中的内分泌干扰物、苯系物和芳香胺等其它有机污染物也具有一定的生态风险<sup>[46,47]</sup>.因此各污水厂实际的PhACs生态风险可能会高于本研究。

### 3 结论

(1) 广东省污水厂进水中,ATP、CAF、MEP、ATL和APY的检出率均超过85%. $\sum$ PhACs质量浓度范围在21.00 ~ 9 558.25 ng·L<sup>-1</sup>,其中检出质量浓度最高的两种化合物是ATP和CAF,质量浓度最大值分别为7 112.44 ng·L<sup>-1</sup>和2 127.43 ng·L<sup>-1</sup>.

(2) 在空间分布上,各污水厂进水中的 $\sum$ PhACs质量浓度呈现出珠三角 > 粤北 > 粤东 ≈ 粤西的分布特征, $\sum$ PhACs的质量浓度最大值出现在深圳市龙岗区的布吉水质净化厂。

(3) 广东省PhACs的生态风险较低,BEZ在韶关、江门和深圳呈现出中风险,10种PhACs的综合生态风险最大地区为韶关。

#### 参考文献:

- [1] Farré M L, Pérez S, Kantiani L, et al. Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2008, 27(11): 991-1007.
- [2] Kim J W, Ishibashi H, Yamauchi R, et al. Acute toxicity of pharmaceutical and personal care products on freshwater crustacean (*Thamnocephalus platyurus*) and fish (*Oryzias latipes*) [J]. The Journal of Toxicological Sciences, 2009, 34(2): 227-232.
- [3] Godoy A A, Domingues I, Nogueira A J A, et al. Ecotoxicological effects, water quality standards and risk assessment for the anti-diabetic metformin [J]. Environmental Pollution, 2018, 243: 534-542.
- [4] 王硕, 刘建超, 郑超亚, 等. 尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险[J]. 环境科学, 2019, 40(4):

- 1797-1802.
- Wang S, Liu J C, Zheng C Y, *et al.* Distribution and environmental risk of pharmaceutically active compounds in the traditionally aqueous phase of effluent-receiving rivers [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1797-1802.
- [ 5 ] 温智皓, 段艳平, 孟祥周, 等. 城市污水处理厂及其受纳水体中 5 种典型 PPCPs 的赋存特征和生态风险[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 927-932.
- Wen Z H, Duan Y P, Meng X Z, *et al.* Occurrence and risk assessment of five selected PPCPs in municipal wastewater treatment plant and the receiving water [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 927-932.
- [ 6 ] Godoy A A, Domingues I, de Carvalho L B, *et al.* Assessment of the ecotoxicity of the pharmaceuticals bisoprolol, sotalol, and ranitidine using standard and behavioral endpoints [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(5): 5469-5481.
- [ 7 ] Cooper E R, Siewicki T C, Phillips K. Preliminary risk assessment database and risk ranking of pharmaceuticals in the environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 26-33.
- [ 8 ] Cravo A, Silva S, Rodrigues J, *et al.* Understanding the bioaccumulation of pharmaceutical active compounds by clams *Ruditapes decussatus* exposed to a UWWTP discharge [J]. *Environmental Research*, 2022, **208**, doi: 10.1016/j.envres.2021.112632.
- [ 9 ] He L X, He L Y, Gao F Z, *et al.* Antibiotics, antibiotic resistance genes and microbial community in grouper mariculture [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **808**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152042.
- [ 10 ] 褚莹倩, 陈溪, 张晓林, 等. 中国地表水环境中药物与个人护理品生态风险评价的研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2021, **16**(4): 80-92.
- Chu Y Q, Chen X, Zhang X L, *et al.* Ecological risk assessment of pharmaceutical and personal care products in the surface water of China: a review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(4): 80-92.
- [ 11 ] 王朋华, 袁涛, 谭佑铭. 水环境中药物污染及迁移转化行为研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(9): 57-61.
- Wang P H, Yuan T, Tan Y M. Review on pollution and transfer-transformation behaviors of pharmaceuticals in aquatic environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(9): 57-61.
- [ 12 ] USEPA. Ecological structure activity relationships (ECOSAR) predictive model [EB/OL]. <https://www.epa.gov/tsca-screening-tools/ecological-structure-activity-relationships-ecosar-predictive-model>, 2022-08-08.
- [ 13 ] 马丁·格里菲斯. 欧盟水框架指令手册[M]. 高兴洪, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [ 14 ] Cui Y F, Wang Y H, Pan C G, *et al.* Spatiotemporal distributions, source apportionment and potential risks of 15 pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Qinzhou Bay, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **141**: 104-111.
- [ 15 ] Yan Q, Gao X, Chen Y P, *et al.* Occurrence, fate and ecotoxicological assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater and sludge from wastewater treatment plants in Chongqing, the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 618-630.
- [ 16 ] Grill G, Khan U, Lehner B, *et al.* Risk assessment of down-the-drain chemicals at large spatial scales: model development and application to contaminants originating from urban areas in the Saint Lawrence River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 825-838.
- [ 17 ] Sanderson H, Johnson D J, Wilson C J, *et al.* Probabilistic hazard assessment of environmentally occurring pharmaceuticals toxicity to fish, daphnids and algae by ECOSAR screening [J]. *Toxicology Letters*, 2003, **144**(3): 383-395.
- [ 18 ] 滕晓霞, 胡伟, 吴志伟, 等. 粤西地区老年人口卫生服务需求及利用水平调查研究[J]. *现代医院*, 2022, **22**(1): 143-146.
- Teng X X, Hu W, Wu Z W, *et al.* A survey on the demand and utilization of health services for the elderly in western Guangdong under the background of aging [J]. *Modern Hospitals*, 2022, **22**(1): 143-146.
- [ 19 ] Liu X, Zhang D, Wu X L, *et al.* Urinary metals as influencing factors of coronary heart disease among a population in Guangzhou, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **241**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113746.
- [ 20 ] d'Abbs P. Tea art as everyday practice: Gongfu tea in Chaoshan, Guangdong, today [J]. *The Asia Pacific Journal of Anthropology*, 2019, **20**(3): 213-231.
- [ 21 ] Zhou F, Li Y L, Zhang X, *et al.* Polyphenols from fu brick tea reduce obesity via modulation of gut microbiota and gut microbiota-related intestinal oxidative stress and barrier function [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, **69**(48): 14530-14543.
- [ 22 ] 秦胜萍. 2015-2016 年广州某社区卫生服务中心药品消耗情况分析[J]. *中国社区医师*, 2017, **33**(20): 9-11.
- Qin S P. Analysis of drug consumption in a community health service center in Guangzhou during the past 2015-2016 years [J]. *Chinese Community Doctors*, 2017, **33**(20): 9-11.
- [ 23 ] Zhang Y Z, Duan L, Wang B, *et al.* Efficient multiresidue determination method for 168 pharmaceuticals and metabolites: optimization and application to raw wastewater, wastewater effluent, and surface water in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114113.
- [ 24 ] 中华人民共和国国家医疗保障局. 国家医保局 人力资源社会保障部关于印发《国家基本医疗保险、工伤保险和生育保险药品目录(2021 年)》的通知 [EB/OL]. [http://www.nhsa.gov.cn/art/2021/12/3/art\\_37\\_7429.html](http://www.nhsa.gov.cn/art/2021/12/3/art_37_7429.html), 2021-12-03.
- [ 25 ] Al-Rifai J H, Khabbaz H, Schäfer A I. Removal of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in a water recycling process using reverse osmosis systems [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, **77**(1): 60-67.
- [ 26 ] Afsa S, Hamden K, Lara Martin P A, *et al.* Occurrence of 40 pharmaceutically active compounds in hospital and urban wastewaters and their contribution to Mahdia coastal seawater contamination [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(2): 1941-1955.
- [ 27 ] Gros M, Petrović M, Ginebreda A, *et al.* Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes [J]. *Environment International*, 2010, **36**(1): 15-26.
- [ 28 ] 殷哲云, 闵露娟, 金立涛, 等. HPLC-MS/MS 测定 3 类污水处理厂污泥及污水中的 8 种药物 [J]. *环境化学*, 2018, **37**(8): 1720-1727.
- Yin Z Y, Min L J, Jin L T, *et al.* HPLC-MS/MS determination of eight PPCPs in sewage and sludge from three types of sewage treatment plants [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(8): 1720-1727.
- [ 29 ] Alder A C, Schaffner C, Majewsky M, *et al.* Fate of  $\beta$ -blocker

- human pharmaceuticals in surface water: comparison of measured and simulated concentrations in the Glatt Valley Watershed, Switzerland[J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 936-948.
- [30] Couto C F, Lange L C, Amaral M C S. Occurrence, fate and removal of pharmaceutically active compounds(PhACs) in water and wastewater treatment plants - a review[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, **32**, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100927.
- [31] Kristofco L A, Brooks B W. Global scanning of antihistamines in the environment: analysis of occurrence and hazards in aquatic systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 477-487.
- [32] Syed M B, Ponnusamy T. Bioconversion of mevastatin to pravastatin by various microorganisms and its applications - a review[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2018, **13**: 62-74.
- [33] Yang Y Y, Liu W R, Liu Y S, *et al.* Suitability of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and artificial sweeteners(ASs) as wastewater indicators in the Pearl River Delta, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **590-591**: 611-619.
- [34] Balakrishna K, Rath A, Praveenkumarreddy Y, *et al.* A review of the occurrence of pharmaceuticals and personal care products in Indian water bodies [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **137**: 113-120.
- [35] Behera S K, Kim H W, Oh J E, *et al.* Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants of the largest industrial city of Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(20): 4351-4360.
- [36] Deblonde T, Cossu-Leguille C, Hartemann P. Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2011, **214**(6): 442-448.
- [37] Verlicchi P, Al Aukidy M, 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.
- [38] Yao L, Chen Z Y, Dou W Y, *et al.* Occurrence, removal and mass loads of antiviral drugs in seven wastewater treatment plants with various treatment processes [J]. *Water Research*, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117803.
- [39] 檀雅琴. 我国乡镇污水处理模式的探讨[J]. *净水技术*, 2021, **40**(3): 88-91.
- Tan Y Q. Discussion on the township wastewater treatment modes at home[J]. *Water Purification Technology*, 2021, **40**(3): 88-91.
- [40] Göbel A, McArdell C S, Joss A, *et al.* Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **372**(2-3): 361-371.
- [41] Vieno N, Tuhkanen T, Kronberg L. Elimination of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Finland[J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1001-1012.
- [42] Majewsky M, Gallé T, Yargeau V, *et al.* Active heterotrophic biomass and sludge retention time(SRT) as determining factors for biodegradation kinetics of pharmaceuticals in activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(16): 7415-7421.
- [43] Chen Y, Vymazal J, Březinová T, *et al.* Occurrence, removal and environmental risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in rural wastewater treatment wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **566-567**: 1660-1669.
- [44] Rivera-Jaimes J A, Postigo C, Melgoza-Alemán R M, *et al.* Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 1263-1274.
- [45] Dai G H, Wang B, Fu C C, *et al.* Pharmaceuticals and personal care products(PPCPs) in urban and suburban rivers of Beijing, China: occurrence, source apportionment and potential ecological risk[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, **18**(4): 445-455.
- [46] Xue F F, Tang B, Bin L Y, *et al.* Residual micro organic pollutants and their biotoxicity of the effluent from the typical textile wastewater treatment plants at Pearl River Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 696-703.
- [47] Jiang R R, Liu J H, Huang B, *et al.* Assessment of the potential ecological risk of residual endocrine-disrupting chemicals from wastewater treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136689.

## CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method .....	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China .....	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas .....	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China .....	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China .....	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing .....	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation .....	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China .....	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM <sub>1</sub> Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017 .....	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group .....	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM <sub>2.5</sub> During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China .....	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou .....	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing .....	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City .....	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River .....	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area .....	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin .....	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake .....	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed .....	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine .....	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City .....	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County .....	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake .....	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake .....	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project .....	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province .....	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu <sup>2+</sup> .....	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment .....	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water .....	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin .....	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies .....	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jun-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change .....	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems .....	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi .....	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil .....	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil .....	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism .....	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project .....	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing .....	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile .....	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area .....	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems .....	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering .....	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River .....	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region .....	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere .....	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure .....	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i> .....	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil .....	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index .....	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years .....	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)