

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

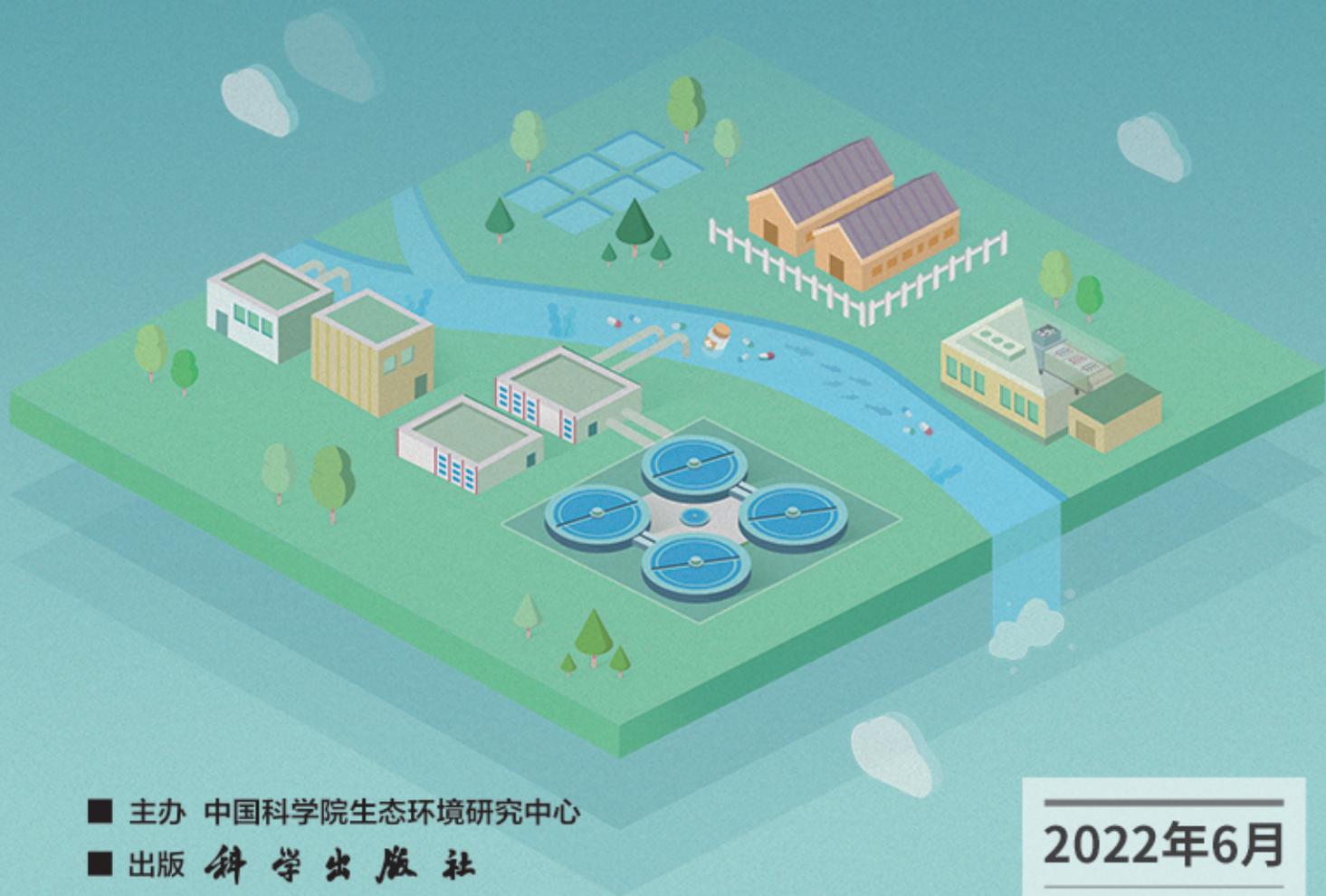
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响 ..... 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM<sub>2.5</sub> 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 ..... 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度变化及来源解析 ..... 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 ..... 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM<sub>2.5</sub> 来源 ..... 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势特征及其影响来源分析 ..... 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 ..... 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM<sub>2.5</sub> 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 ..... 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 ..... 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 ..... 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染特征及气象影响分析 ..... 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 ..... 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 ..... 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 ..... 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 ..... 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 ..... 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 ..... 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下水-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 ..... 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 ..... 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 ..... 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 ..... 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 ..... 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 ..... 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 ..... 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 ..... 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 ..... 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 ..... 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 ..... 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 ..... 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 ..... 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 ..... 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 ..... 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 ..... 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 ..... 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 ..... 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 ..... 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 ..... 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 ..... 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 ..... 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 ..... 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 ..... 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 ..... 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 ..... 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 ..... 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 ..... 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 ..... 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 ..... 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 ..... 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 ..... 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 ..... 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 ..... 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 ..... 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 ..... 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 ..... 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 ..... 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

# 长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅<sup>1</sup>, 魏琳<sup>2</sup>, 彭晶倩<sup>2</sup>, 何鹏<sup>1,3</sup>, 施鸿媛<sup>1,3</sup>, 汤冬梅<sup>1,4</sup>, 吴振斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉市生态环境科技中心, 武汉 430015; 3. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 4. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 采用固相萃取-高效液相色谱/串联质谱方法, 分析长江中游典型饮用水水源中药物的季节变化和空间分布; 结合风险熵方法, 评价其对水生生物的生态风险。结果表明, 80% 的目标药物在饮用水水源中检出, 浓度平均值在 0.07 ~ 13.00 ng·L<sup>-1</sup> 之间, 与国内报道的其他饮用水水源相比, 检出浓度处于中等偏低水平。不同药物表现出不同的时空分布, 一般冬季的检出水平高于夏季, 上下游之间没有显著性差异, 可能与药物的季节性/区域性使用排放、流量对稀释作用的影响和温度对生物降解的影响有关。与新冠肺炎疫情前相比, 长江中游典型饮用水水源中药物检出浓度较低, 原因可能在于疫情防控一定程度上减少药物的使用排放, 以及较高的降水量和径流量加强水流的稀释作用。目标药物特别是抗生素对水生生物(特别是藻类)具有中等或低风险, 考虑到药物的生态风险、遗传毒性以及抗生素抗性基因的潜在风险, 建议加强水环境中药物的调查、评估、治理和管控。

**关键词:** 饮用水水源; 抗生素; 抗炎药; 季节变化; 空间分布; 生态风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2996-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109051

## Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River

WU Jun-mei<sup>1</sup>, WEI Lin<sup>2</sup>, PENG Jing-qian<sup>2</sup>, HE Peng<sup>1,3</sup>, SHI Hong-yuan<sup>1,3</sup>, TANG Dong-mei<sup>1,4</sup>, WU Zhen-bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Wuhan Science and Technology Center of Ecology and Environment, Wuhan 430015, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The seasonal variation and spatial distribution of pharmaceuticals in typical drinking water sources in the middle reaches of the Yangtze River were analyzed using the solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry methods. Combined with the risk entropy method, the corresponding ecological risks for aquatic organisms were evaluated. The results showed that 80% of the target pharmaceuticals were detected in the drinking water sources, with average concentrations of 0.07-13.00 ng·L<sup>-1</sup>. The concentrations of the target pharmaceuticals were lower than or comparable with those in other drinking water sources reported in China. The spatiotemporal distribution of different pharmaceuticals varied. Generally, the detection level in winter was higher than that in summer, and there was no significant difference between that upstream and that downstream. This might be mainly attributed to seasonal/regional use and emissions of the pharmaceuticals, the impact of flow rate on dilution, and the impact of temperature on biodegradation. Compared with those before the COVID-19 epidemic, the detection concentrations of the target pharmaceuticals were relatively low. The reason for this might be that the prevention and control of the epidemic reduced the use and emission of the pharmaceuticals to a certain extent, and the high rainfall and runoff strengthened the dilution of water flow. The target pharmaceuticals, especially antibiotics, posed medium or low risks to aquatic organisms (especially algae). Considering the ecological risks and genotoxicity of pharmaceuticals and the potential risks of antibiotic-resistant genes, it is suggested to strengthen the investigation, evaluation, treatment, and control of pharmaceuticals in the water environment.

**Key words:** drinking water sources; antibiotics; anti-inflammatory drugs; seasonal variation; spatial distribution; ecological risk

药物广泛应用于人类医疗健康和养殖疾控增产, 由于不能被人或动物完全吸收, 因此大部分药物在使用后通过污水处理和水产养殖尾水、污泥粪肥还田渗滤等进入水环境。虽然药物可以不同程度地自然降解, 但是由于持续使用, 导致呈现“假持续性”现象。药物在水系统中残留及抗生素残留诱导抗性基因对水生态系统和人类健康具有潜在风险<sup>[1-4]</sup>。我国是全球第二大药物市场<sup>[5]</sup>, 其中抗生素生产和使用量全球最大<sup>[6]</sup>。现有研究表明, 至少有 155 种药物和个人护理用品在我国地表水和沉积物中检出<sup>[4]</sup>, 其中有 94 种抗生素在水环境中检出, 且大多数浓度与其他国家相似或略高<sup>[2]</sup>。

长江是我国 5 亿多人的饮用水水源地, 也是我

国水环境中药物研究的热点区域之一<sup>[3,4]</sup>。目前大部分关于饮用水水源中药物的研究集中在长江上游或下游, 如重庆段水源<sup>[7]</sup>、南京水源地<sup>[8-11]</sup>、江苏省某市水源<sup>[12]</sup>、江苏省骆马湖流域水源地<sup>[13]</sup>、南京至苏州段水源地<sup>[14]</sup>、华东地区某水源地<sup>[15]</sup>、长江三角洲某水源地<sup>[16]</sup>和上海水源地<sup>[17,18]</sup>等, 然而长江中游饮用水水源中药物研究较少。本研究根据我国产(用)量高、水环境检出率和浓度高以及生态环

收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-11-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类, XDA23040401); 湖北省自然科学基金项目(2020CFB442); 中国科学院水生生物研究所青年人才专项(Y955040101); 武汉市环境保护科学研究院项目(HKY-2020-KY14)

作者简介: 武俊梅(1985~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为新污染物生态效应及控制技术, E-mail: wujunmei@ihb.ac.cn

境风险大等原则,结合现有研究数据和优先污染物<sup>[2-4,6,19-22]</sup>,筛选 8 种抗生素和 2 种抗炎药作为目标药物,分析长江中游典型饮用水水源中药物的季节变化和空间分布,评价其对水生生物的生态风险,以期为我国饮用水水源中药物残留提供基础数据,并为药物残留风险防控提供可靠信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样品采集

根据供水能力大于 20 万 t·d<sup>-1</sup> 筛选 10 个饮用水水源(图 1),代表长江中游某市 75% 以上的集中式饮用水水源,服务 850 多万人,其中 6 个位于长江干流(以支流汇入口为界, S1 ~ S4 为干流上游, S5 ~ S6 为干流下游), 4 个位于长江支流(S7 ~ S10)。于 2020 年 5 月至 2021 年 1 月采集饮用水水源季节

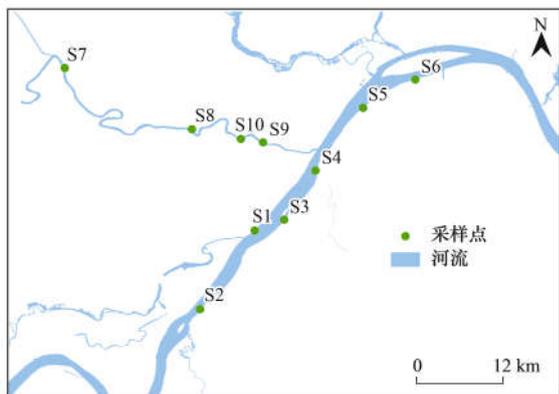


图 1 长江中游典型饮用水水源采样点示意  
Fig. 1 Sampling sites in typical drinking water sources in the middle reaches of the Yangtze River

性水样 4 次. 每次采用有机玻璃采水器采集 4 L 水样,采集深度为 0.5 m 左右,置于清洗干净并用水样润洗 3 次的棕色玻璃瓶中,低温避光保存, 12 h 内运回实验室 4℃ 保存,并于 3 d 内完成水样预处理。

### 1.2 仪器与试剂

超高效液相色谱-三重四级杆质谱联用仪 (ACQUITY UPLC H-class-Xevo TQ MS, Waters, USA); 固相萃取装置 (Visiprep™ DL, SPUELCO, USA); 可视孔氮吹仪 (NK200-1B, 杭州米欧仪器有限公司); 玻璃纤维滤膜 (GF/F, 0.7 μm, Whatman, UK); 固相萃取小柱 (Oasis HLB cartridge, 6 cc/500 mg, Waters, USA); 有机相针式滤器 (0.22 μm, 上海安谱实验科技股份有限公司)。

药物标准品均购自德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH (表 1), 包括 2 种大环内酯类抗生素: 红霉素 (erythromycin, ERY) 和罗红霉素 (roxithromycin, RTM); 2 种喹诺酮类抗生素: 环丙沙星 (ciprofloxacin, CPX) 和氧氟沙星 (ofloxacin, OFX); 2 种磺胺类抗生素: 磺胺嘧啶 (sulfadiazine, SDZ) 和磺胺甲噁唑 (sulfamethoxazole, SMX); 2 种四环素类抗生素: 氧四环素 (oxytetracycline, OTC) 和四环素 (tetracycline, TC); 2 种抗炎药: 布洛芬 (ibuprofen, IBF) 和萘普生 (naproxen, NPX)。甲酸、甲醇和乙腈均为色谱纯,购自美国 Tedia 公司; 乙二胺四乙酸四钠和乙酸铵均为分析纯,购自上海国药集团化学试剂有限公司; 本实验用超纯水取自 Milli-Q 纯水仪 (Millipore, USA)。

表 1 药物的理化性质、检出限、定量限和回收率

Table 1 Physicochemical properties, limits of detections, limits of quantifications, and recoveries of the pharmaceuticals

药物	pK <sub>a</sub> <sup>(1)</sup>	lgK <sub>ow</sub> <sup>(1)</sup>	检出限/ng	定量限/ng	回收率/%
红霉素 (ERY)	8.88	3.06	5.54	16.63	96.40
罗红霉素 (RTM)	—	2.75	2.14	6.42	87.64
环丙沙星 (CPX)	6.09	0.28	0.29	0.88	72.75
氧氟沙星 (OFX)	5.97, 9.28 <sup>2)</sup>	-0.39	0.08	0.25	88.06
磺胺嘧啶 (SDZ)	6.36	-0.09	0.77	2.30	104.99
磺胺甲噁唑 (SMX)	1.60, 5.70 <sup>2)</sup>	0.89	0.06	0.19	94.10
氧四环素 (OTC)	3.27	-0.90	2.29	6.86	86.56
四环素 (TC)	3.30	-1.30	1.62	4.86	90.06
布洛芬 (IBF)	4.91	3.97	0.25	0.76	118.10
萘普生 (NPX)	4.15	3.18	0.20	0.60	87.79

1) 数据来源于 <https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/chemidlite.jsp>; 2) 数据来源于 <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

### 1.3 样品预处理与分析

水样预处理采用固相萃取方法<sup>[23]</sup>. 首先水样经过 0.7 μm 玻璃纤维滤膜进行过滤,取 1 L 过滤后的水样加入 0.5 g 乙二胺四乙酸四钠充分溶解,用甲酸调节 pH 至 3.0 左右. 然后 HLB 小柱用 12 mL 甲醇和 12 mL 超纯水分两次进行活化,水样以 5

mL·min<sup>-1</sup> 的流速进行富集, HLB 小柱分两次加入 10 mL 超纯水淋洗,抽真空干燥 0.5 h. 接着用 10 mL 甲醇洗脱,收集的洗脱液氮气吹干,用有机试剂(体积比为 80:20 的 0.1% 甲酸和甲醇)复溶至 1 mL,涡旋混匀 2 min 后用 0.22 μm 有机相针式滤器转移到进样瓶,仪器分析前 -20℃ 保存。

水样分析采用超高效液相色谱-三重四级杆质谱联用仪<sup>[23]</sup>. 药物在 ACQUITY UPLC BEH C18 (1.7  $\mu\text{m}$ , 2.1 mm  $\times$  50 mm) 色谱柱进行分离, 柱温为 40 $^{\circ}\text{C}$ , 流速为 0.25 mL $\cdot$ min $^{-1}$ , 进样体积为 20  $\mu\text{L}$ . 正离子模式的流动相 A 为 0.1% 甲酸, 流动相 B 为 0.1% 甲酸甲醇. 负离子模式的流动相 A 为 10 mmol $\cdot$ L $^{-1}$  乙酸铵, 流动相 B 为 5:95 (体积比) 的 10 mmol $\cdot$ L $^{-1}$  乙酸铵和乙腈. 不同离子模式下的洗脱梯度见表 2. 药物的质谱检测在多反应检测模式下进行, 其中抗生素采用正离子模式, 抗炎药采用负离子模式, 其毛细管电压分别为 3.0 kV 和 2.5 kV, 离子源温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ , 脱溶剂温度为 350 $^{\circ}\text{C}$ , 脱溶剂流量为 650 L $\cdot$ h $^{-1}$ , 氩碰撞气体流量为 0.12 mL $\cdot$ min $^{-1}$ .

表 2 不同离子模式下的洗脱梯度

Table 2 Elution gradient in different ion modes

正离子 ESI <sup>+</sup>			负离子 ESI <sup>-</sup>		
时间 /min	流动相 A /%	流动相 B /%	时间 /min	流动相 A /%	流动相 B /%
0.0	80	20	0.0	75	25
2.5	48	52	3.0	20	80
5.0	12	88	3.1	75	25
5.1	80	20	4.5	75	25
6.5	80	20			

#### 1.4 质量控制

药物定量采用外标法<sup>[7-11,17]</sup>, 定量曲线在 0.05 (或者 0.50) ~ 500  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内线性关系良好, 相关系数在 0.997 5 ~ 0.999 9 之间. 以 3 倍和 10 倍信噪比计算药物的方法检出限和定量限, 其范围分别为 0.06 ~ 5.54 ng $\cdot$ L $^{-1}$  和 0.19 ~ 16.63 ng $\cdot$ L $^{-1}$  (表 1). 将 50、100 和 200 ng $\cdot$ L $^{-1}$  药物标准品加入 1 L 超纯水中, 按药物计算平均回收率范围为 72.75% ~ 118.10% (表 1). 另外, 水样测定时添加空白对照和空白回收, 并设置 3 个平行提高质量控制<sup>[9,11]</sup>.

#### 1.5 生态风险评价

采用风险熵方法对长江中游典型饮用水水源中药物进行生态风险评价<sup>[9-11,13,14,16]</sup>, 风险熵 (RQ) 计算公式如下:

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

$$\text{PNEC} = \text{Min}(\text{NOEC}, \text{LOEC}, \text{IC}_{50}, \text{EC}_{50}, \text{LC}_{50})/\text{AF} \quad (2)$$

式中, MEC 为药物的环境实测浓度, ng $\cdot$ L $^{-1}$ , 根据最大风险控制原理, 本研究选用药物的最高浓度. PNEC 为预测无效应浓度, ng $\cdot$ L $^{-1}$ , 本研究以 3 类水生生物为测试物种进行生态风险评价, 包括藻类、无脊椎动物和鱼类. NOEC 为最大无影响浓度, LOEC 为最低有影响浓度, IC<sub>50</sub> 为半抑制浓度, EC<sub>50</sub> 为半效应浓度, LC<sub>50</sub> 为半致死浓度, 这些数据来源于

文献中急性毒理实验或 ECOSAR 模型; 由于不同测试物种、不同实验过程和 ECOSAR 模型得到的数据不同, 本研究选用最低毒理学数据以评价 3 类水生生物最敏感物种的生态风险 (表 3)<sup>[23]</sup>. AF 为评估因子, 其值设定为 1 000. 生态风险分级标准如下: RQ  $\leq$  0.01 时, 生态风险可忽略; 0.01 < RQ  $\leq$  0.1 时, 低生态风险; 0.1 < RQ  $\leq$  1 时, 中等生态风险; RQ > 1 时, 高生态风险.

表 3 药物对水生生物的最低预测无效应浓度<sup>1)</sup>

Table 3 Minimum PNEC of the pharmaceuticals for aquatic organisms

药物	水生生物类别	最敏感生物	EC <sub>50</sub> /mg $\cdot$ L $^{-1}$	文献
ERY	藻类	羊角月牙藻	0.010 3 (NOEC)	[24]
	无脊椎动物	大型蚤	7.80 <sup>2)</sup>	[25]
	鱼类	黑头呆鱼	61.00 <sup>2)</sup>	[25]
RTM	藻类	近头状尖胞藻	0.010 (NOEC)	[26]
	无脊椎动物	大型蚤	6.00 <sup>2)</sup>	[25]
	鱼类	黑头呆鱼	50.00 <sup>2)</sup>	[25]
CPX	藻类	铜绿微囊藻	0.005	[27]
	无脊椎动物	大型蚤	60 (NOEC)	[27]
	鱼类	斑马鱼	100 (NOEC)	[27]
OFX	藻类	聚球藻	0.016	[28]
	无脊椎动物	模糊网纹蚤	17.41	[29]
	鱼类	斑马鱼	1 000 (LC <sub>33.5</sub> )	[29]
SDZ	藻类	铜绿微囊藻	0.135	[30]
	无脊椎动物	大型蚤	212	[31]
	鱼类	— <sup>3)</sup>	—	—
SMX	藻类	聚球藻	0.026 8	[28]
	无脊椎动物	大型蚤	4.50 <sup>2)</sup>	[25]
	鱼类	青鳉	562.5 (LC <sub>50</sub> )	[32]
OTC	藻类	羊角月牙藻	0.183 (NOEC)	[24]
	无脊椎动物	模糊网纹蚤	18.65	[29]
	鱼类	青鳉	110.1 (LC <sub>50</sub> )	[33]
TC	藻类	铜绿微囊藻	0.09	[34]
	无脊椎动物	大型蚤	550.00 <sup>2)</sup>	[25]
	鱼类	黑头呆鱼	16.00 <sup>2)</sup>	[25]
IBF	藻类	羊角月牙藻	26.00 <sup>2)</sup>	[25]
	无脊椎动物	丰年虫	19.59 (LC <sub>50</sub> )	[35]
	鱼类	黑头呆鱼	5.00 <sup>2)</sup>	[25]
NPX	藻类	羊角月牙藻	22.00 <sup>2)</sup>	[25]
	无脊椎动物	大型蚤	15.00 <sup>2)</sup>	[25]
	鱼类	黑头呆鱼	34.00 <sup>2)</sup>	[25]

1) NOEC 为最大无影响浓度, IC<sub>50</sub> 为半抑制浓度, EC<sub>50</sub> 为半效应浓度, LC<sub>50</sub> 为半致死浓度; 2) 数据来源于 ECOSAR 模型; 3) “—” 表示无数据

#### 1.6 统计分析

实验数据采用 SPSS 23.0 (IBM, USA) 进行统计分析, 药物之间的相关性采用 Spearman 检验, 季节差异性采用 Friedman 相关样本检验, 空间差异性采用 Kruskal-Wallis H 独立样本检验, 新冠肺炎疫情前后药物的差异性采用 Wilcoxon 相关样本检验.

## 2 结果与讨论

### 2.1 饮用水水源中药物的检出水平

在长江中游典型饮用水水源中检出 8 种目标药

物,浓度平均值在  $0.07 \sim 13.00 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  之间,浓度最大值布洛芬最高 ( $112.03 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),氧四环素次之 ( $19.03 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),其他在  $< \text{LOD} \sim 9.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  之间. 与国内报道的其他饮用水水源相比,检出浓度处于中等偏低水平(表 4). 大环内酯类抗生素应用于人类医疗和畜禽养殖,红霉素和罗红霉素检出浓度最大值低于检出限. 喹诺酮类抗生素环丙沙星主要应用于畜禽养殖,而氧氟沙星在食品动物中停止使用<sup>[36]</sup>,这可能是环丙沙星 (5.13%) 和氧氟沙星 (66.67%) 检出率差别较大的原因. 磺胺嘧啶和磺胺甲噁唑是应用较早的抗生素,目前常应用于人类医疗和水产养殖; 由于稳定性较高,迁移性较强,在我国水环境中检出率和检出浓度较高<sup>[9,12,15,16,23]</sup>; 本研究中磺胺甲噁唑的检出率为 100%. 四环素类抗生素由于价格低廉,广泛应用于人类医疗和畜禽养殖; 由于容易水解、光解和吸附到沉积物中,检出水平一般不是很高<sup>[7,9,13,23,37]</sup>; 本研究中四环素类抗生素的检出率均为 5.13%,氧四环素和四环素的浓度平均值分别为  $0.58 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.30 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 然而,长江南京段和三角洲水源地四环素类抗生素检出水平较高<sup>[10,16,38]</sup>,可能与地域性的用药习惯有关; 值得注意的是,四环素由于副作用比较明显,已经较少使用. 抗炎药用于治疗疼痛和炎症,布洛芬主要用于人类医疗,萘普生应用于人类医疗和畜禽养殖;

据中国医药统计年报显示,2019 年我国布洛芬和萘普生的产量/消耗量分别为  $11\,039 \text{ t}/2\,127 \text{ t}$  和  $561 \text{ t}/176 \text{ t}$ <sup>[39]</sup>; 本研究中布洛芬和萘普生的检出率分别为 87.18% 和 48.72%,布洛芬浓度最大值远高于萘普生 ( $4.32 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),可能与产(用)量有关<sup>[17]</sup>.

Spearman 检验结果表明,环丙沙星、氧四环素和四环素极强相关 ( $r = 1.0, P < 0.01$ ),磺胺甲噁唑和磺胺嘧啶强相关 ( $0.6 < r < 0.8, P < 0.01$ ),表明同类抗生素由于相似的理化特性,检出水平具有一定的相似性,这与已有的研究结果一致<sup>[10,23]</sup>. 总体而言,药物在饮用水水源中的检出水平取决于它们在人类医疗健康和养殖疾控增产方面的使用以及在水环境中的持久性.

## 2.2 饮用水水源中药物的时空分布

在长江中游饮用水水源中,红霉素、罗红霉素、环丙沙星、氧四环素和四环素没有显著性季节差异,可能是由于检出率较低; 其他药物存在显著性季节差异(氧氟沙星  $P < 0.05$ ,其他药物  $P < 0.01$ ,图 2). 秋季磺胺甲噁唑的浓度平均值 ( $3.02 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 显著高于春夏季 ( $1.05 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.35 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),冬季 ( $1.60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 显著高于夏季. 冬季氧氟沙星和布洛芬的浓度平均值高于其他季节. 总体而言,冬季药物的检出水平高于夏季,这与报道的研究结果(或者为旱季高于雨季)一致<sup>[12,14~18,38]</sup>,一般

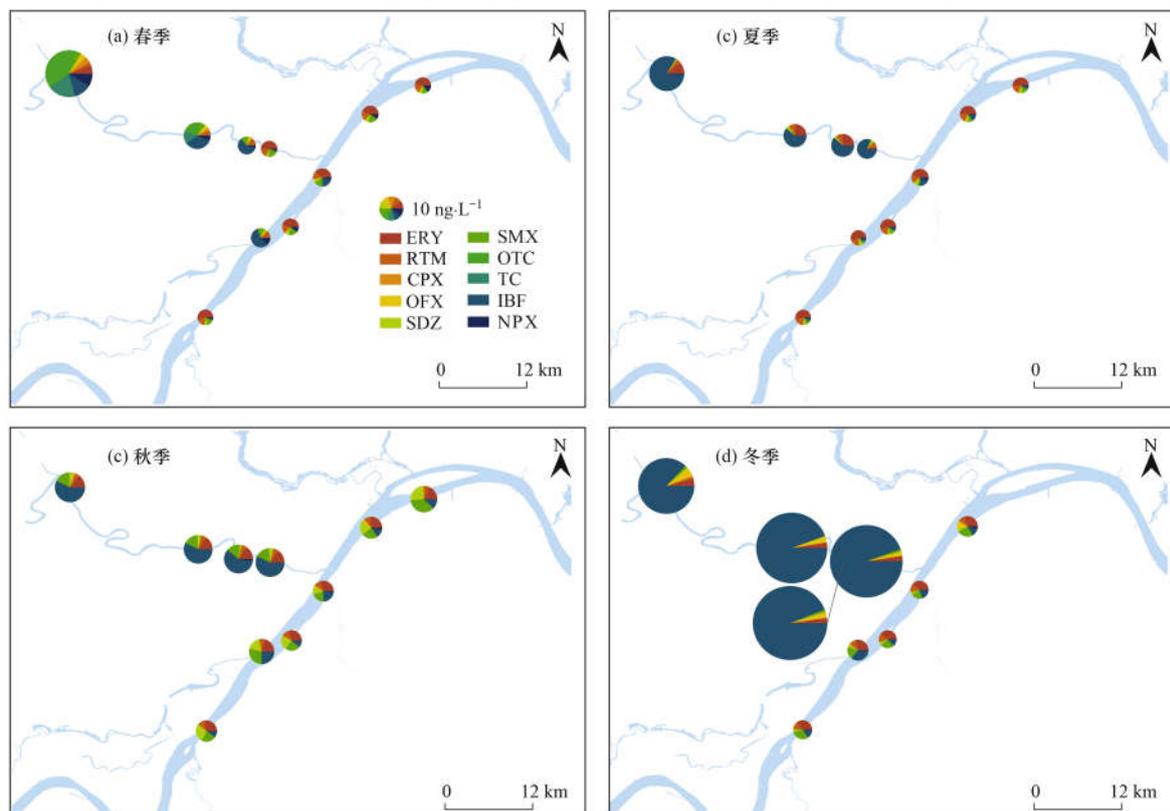


图 2 饮用水水源中药物的时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of the pharmaceuticals in drinking water sources

表 4 饮用水水源中药物的检出水平及国内比较<sup>1)</sup>

Table 4 Detection frequencies and concentrations of the pharmaceuticals in drinking water sources and the comparison in China

样点	年份	样点数	统计值	ERY	RTM	CPX	OFX	SDZ	SMX	OTC	TC	IBF	NPX	文献	
长江中游水源	2020	10	检出率 <sup>2)</sup> /%	0.00	0.00	5.13	66.67	20.51	100.00	5.13	5.13	87.18	48.72		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	<LOD	ND	ND	<LOD	<LOQ	ND	ND	ND	ND	ND	
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	<LOD	2.12	3.94	3.93	5.48	19.03	9.10	112.03	4.32	本研究	
			中位值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	<LOD	ND	<LOQ	<LOD	1.10	ND	ND	1.91	<LOD		
			平均值 <sup>3)</sup> /ng·L <sup>-1</sup>	2.49	1.07	0.07	0.49	0.73	1.50	0.58	0.30	13.00	0.36		
长江中游水源	2019	10	检出率/%	33.33	70.00	30.00	73.33	83.33	100.00	6.67	0.00	50.00	100.00		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	<LOD	ND	ND	<LOD	1.02	ND	ND	ND	<LOQ		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	26.40	19.15	46.68	48.92	18.60	118.60	17.16	ND	ND	44.42	3.23	[23]
			中位值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	6.76	ND	0.39	4.64	39.20	ND	ND	1.09	2.24		
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	6.86	6.27	7.29	7.01	5.23	35.09	1.10	0.00	6.90	1.83		
重庆段水源	—	9	检出率/%	66.67	66.67	0.00	0.00	0.00	22.22	0.00	0.00	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—	—	[7]
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	9.2	31.4	ND	ND	ND	25.5	ND	ND	—	—		
			中位值/ng·L <sup>-1</sup>	2.74	9.62	ND	ND	ND	4.28	ND	ND	—	—		
南京水源	2012	3	检出率/%	11	0	—	67	56	44	22	33	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—	—		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	5.4	ND	—	5.5	8.5	12.5	9.2	14.9	—	—	[8]	
南京段水源地	2017	17	检出率/%	—	<50.00	41.18	55.82	<50.00	64.71	<50.00	52.94	—	—		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	317.6	147.6	—	8.20	—	43.20	—	—	[10]	
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	15.26	—	0.98	—	12.72	—	—		
南京段水源地	2018	16	检出率/%	—	43.75	0.00	6.25	75.00	75.00	0.00	0.00	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	—	5.10	ND	2.25	6.41	9.67	ND	ND	—	—	[9]	
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	—	2.04	ND	0.14	3.44	6.55	ND	ND	—	—		
南京段水源地	2017	16	检出率/%	—	6.25	0.00	31.25	0.00	0.00	0.00	6.25	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	—	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—	—		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	—	0.44	ND	35.20	ND	ND	ND	11.68	—	—		
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	—	0.03	ND	3.14	ND	ND	ND	0.73	—	—		
			检出率/%	0.00	64.29	0.00	57.14	14.29	64.29	0.00	0.00	—	—		
南京段水源地	2018	14	最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—	—		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	1.37	ND	12.26	0.67	3.83	ND	ND	—	—	[11]	
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	0.37	ND	2.16	0.08	1.98	ND	ND	—	—		
江苏省某市水源	2013	3	检出率/%	0.00	100.00	0.00	93.75	81.25	0.00	0.00	6.25	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	0.53	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—	—		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	1.74	ND	11.57	25.90	ND	ND	11.30	—	—		
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	1.05	ND	4.80	16.37	ND	ND	0.71	—	—		
江苏省骆马湖流域水源地	2019	44	检出率/%	33	0	—	67	78	67	44	11	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	ND	—	ND	0.8	ND	ND	ND	—	—	[12]	
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	4.0	ND	—	13.2	52.7	8.6	15.4	2.3	—	—		
			中位值/ng·L <sup>-1</sup>	ND	ND	—	0.9	2.7	2.4	ND	ND	—	—		
江苏省骆马湖流域水源地	2019	44	检出率/%	0	54.6	4.6	9.1	11.4	36.4	0	0	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	—	—	[13]	
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	566.78	12.56	22.79	1.53	5.52	<LOD	<LOD	—	—		
			中位值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	15.30	11.30	3.02	1.22	0.47	<LOD	<LOD	—	—		
南京至苏州段水源地	2016	28	平均值/ng·L <sup>-1</sup>	<LOD	40.87	11.30	7.50	1.18	1.19	<LOD	<LOD	—	—		
			检出率/%	—	—	—	—	—	—	10.71	10.71	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	—	—	—	ND	ND	—	—	[14]
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	—	—	—	18.98	11.16	—	—	
华东地区某水源地	2015	18	中位值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
			检出率/%	—	—	—	—	82	100	—	—	—	—		
			最小值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	ND	8.71	—	—	—	—		
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	5.97	107.0	—	—	—	—	[15]	
长江三角洲某水源地	2014	2	中位值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	1.98	13.7	—	—	—	—		
			平均值/ng·L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	2.35	21.0	—	—	—	—		
			检出率/%	—	50.76	45.55	72.44	92.31	100.00	72.52	75.83	—	—		
长江三角洲某水源地	2014	2	最小值/ng·L <sup>-1</sup>	—	ND	ND	ND	ND	1.26	ND	ND	—	—	[16]	
			最大值/ng·L <sup>-1</sup>	—	2.35	176.14	18.95	20.82	51.86	241.50	94.66	—	—		

续表 4

样点	年份	样点数	统计值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	ERY	RTM	CPX	OFX	SDZ	SMX	OTC	TC	IBF	NPX	文献	
上海水源地	2011 ~ 2013	17	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	0.06	17.91	9.87	6.08	14.52	34.19	21.39	—	—	[17]	
			检出率/%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100.00		>80.00
			最小值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.60		ND
			最大值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72.80		39.80
			平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23.30		12.30
上海淀山湖水源地	2017	10	检出率/%	—	—	—	—	—	100	—	—	25	42.5	[18]	
			最小值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	0.11	—	—	ND	ND		
			最大值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	1.30	—	—	13.02	1.59		
			中位值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	0.40	—	—	0	0		
			平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	—	0.48	—	—	2.04	0.34		
中国主要河流流域饮用水源	2012 ~ 2013	25	检出率/%	100.00	93.00	4.00	35.00	50.00	63.00	0.00	0.00	43.00	35.00	[37]	
			最大值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	27.4	—	—	—	—	—	ND	ND	—		—
			中位值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	—	0.9	—	—	—	—	—	ND	ND	—		—
厦门莲花水库	2018	5	检出率/%	0	40	60	50	10	0	55	65	—	—	[38]	
			最小值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—		—
			最大值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	72.58	83.66	54.03	11.96	0.00	40.93	155.05	—	—		—
			中位值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	ND	ND	1.07	ND	ND	ND	3.43	1.60	—	—		—
			平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	8.14	13.86	6.53	0.73	0.00	8.25	24.53	—	—		—
东莞东江水源	—	11	检出率/%	100	81.8	54.5	100	100	100	100	100	—	—	[40]	
			最小值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	27.17	0.00	0.00	0.93	0.80	8.03	5.97	6.12	—	—		
			最大值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	45.07	7.39	15.53	3.32	3.04	11.36	9.42	9.27	—	—		
			中位值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	30.73	1.69	1.78	1.53	1.44	9.55	6.66	7.25	—	—		

1) “—”表示未检测或无数据,“ND”表示未检出; 2) 以大于等于检出限的样本量为原则计算检出率; 3) 计算平均值时未检出按浓度为 0 处理, 低于检出限按检出限的 1/2 处理, 低于定量限按定量限的 1/2 处理

而言,夏季温度高,处于丰水期;生物降解快,稀释作用大.然而,不同药物表现出不同的季节分布<sup>[8,11,23,37]</sup>,本研究中磺胺嘧啶和磺胺甲噁唑秋季浓度平均值最高,萘普生春季最高,一方面可能与不同药物的季节性使用不同有关,另一方面丰水期降雨也可能增加雨污溢流和农业径流中药物的排放量.

布洛芬在长江中游干流和支流之间存在显著性差异( $P < 0.01$ ,图 2),干流浓度平均值( $1.23 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )低于支流( $29.91 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),然而,支流汇入干流后,下游和上游之间没有显著性差异.可能的解释是布洛芬在支流排放量较高,而长江中游干流的流量远高于支流,据长江泥沙公报显示,2020 年长江中游干流的年径流量是支流的 22 倍<sup>[41]</sup>.Wen 等<sup>[17]</sup>的研究发现布洛芬在黄浦江从上游到下游浓度逐渐升高,解释为消耗量较多;而萘普生相反,解释为萘普生可能更广泛用于畜禽养殖,未经处理的废水直接排入黄浦江上游支流.因此,不同药物的空间分布可能主要与区域排放和水流流量有关.其他药物在长江中游干流上下游和支流之间没有显著性差异( $P > 0.05$ ),这与报道的研究结果一致<sup>[11,14,23]</sup>,表明沿河分散药物污染负荷可能比研究区域上游背景污染负荷的影响更大<sup>[14,23]</sup>,以及河流的自净作用可能在药物的自然衰减中发挥重要作用<sup>[23]</sup>.

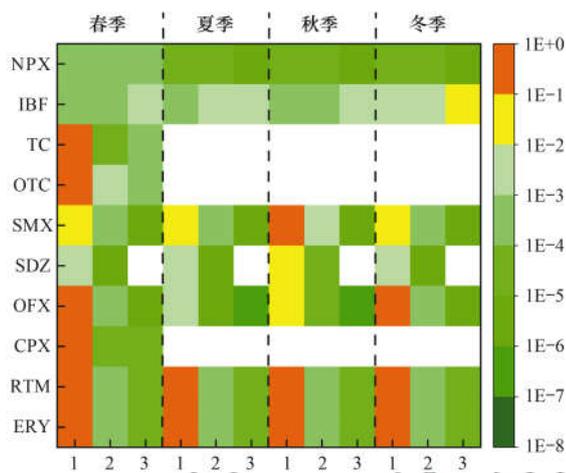
### 2.3 新冠肺炎疫情前后对比分析

与 2019 年相比(表 4)<sup>[23]</sup>,2020 年长江中游典型饮用水水源中药物检出率无显著性差异,浓度平均值显著较低( $P < 0.05$ ).其中罗红霉素、磺胺嘧啶和萘普生检出水平较低,氧氟沙星和磺胺甲噁唑检出浓度较低,而布洛芬检出水平较高.新冠肺炎疫情的流行并未加剧长江中游典型饮用水水源中药物污染,这与报道的研究结果一致<sup>[42]</sup>;相反,2020 年药物检出浓度较低.原因可能在于:一方面受新冠肺炎疫情影响,养殖业暂停 3 个月产量降低,药品管控加强一定程度上减少药物的使用和排放;另一方面据武汉市水资源公报显示 2020 年降水量( $1928.3 \text{ mm}$ )远大于 2019 年( $1003.3 \text{ mm}$ )<sup>[43,44]</sup>,2020 年长江中游干流的年径流量比 2019 年多 23%<sup>[41]</sup>,水流的稀释作用降低了药物的检出浓度<sup>[14,16,17]</sup>.

### 2.4 饮用水水源中药物的生态风险评价

水生生物中,藻类对抗生素最敏感,PNEC 在  $5 \sim 183 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间;无脊椎动物对萘普生最敏感,鱼类对布洛芬最敏感(表 3 和图 3).对于藻类,四季的红霉素及罗红霉素、春季的环丙沙星,氧氟沙星,氧四环素及四环素、秋季的磺胺甲噁唑和冬季的氧氟沙星具有中等风险,春、夏、秋三季的磺胺甲噁唑和秋季的氧氟沙星及磺胺嘧啶具有低风险.冬季的布洛芬对鱼类具有低风险.表明我国饮用水水源中药

物特别是抗生素对水生生物(特别是藻类)具有不同程度的生态风险<sup>[10,13,38,40]</sup>。另外,一方面药物的慢性生态毒性很可能高于急性生态毒性<sup>[28,29]</sup>,水环境中不同药物可能存在相加/协同效应<sup>[24,26,31]</sup>,氧氟沙星、磺胺甲噁唑和布洛芬等药物还具有遗传毒性<sup>[29,45]</sup>;另一方面,即使非常低水平抗生素的选择压力也会显著增加抗性基因丰度<sup>[46]</sup>,其潜在风险不容忽视,建议加强水环境中药物的调查、评估、治理和管控。



白色表示未检出或无数据; 1. 藻类, 2. 无脊椎动物, 3. 鱼类

图3 饮用水水源中药物对水生生物的生态风险熵

Fig. 3 Ecological risk entropy of the target pharmaceuticals in drinking water sources for three classes of aquatic organisms

### 3 结论

(1) 长江中游典型饮用水水源中检出 80% 的目标药物,布洛芬浓度最高 ( $112.03 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),与国内报道的其他饮用水水源相比,检出浓度处于中等偏低水平.药物的检出水平取决于它们在人类医疗健康和养殖疾控增产方面的使用以及在水环境中的持久性。

(2) 不同药物表现出不同的时空分布,一般冬季的检出水平高于夏季,上下游之间没有显著性差异,可能与药物的季节性/区域性使用排放和流量对稀释作用的影响有关.另外,季节分布还与温度对生物降解的影响有关,空间分布受沿河分散污染的影响大于上游背景负荷。

(3) 与新冠肺炎疫情前相比,长江中游典型饮用水水源中药物检出率无显著性差异,检出浓度较低.原因可能在于疫情防控一定程度上减少药物的使用和排放,以及较高的降水量和径流量加强水流的稀释作用。

(4) 目标抗生素对藻类具有中等或低风险,布洛芬对鱼类具有低风险,考虑到药物的生态风险、遗传毒性以及抗生素抗性基因的潜在风险,建议加

强水环境中药物的调查、评估、治理和管控。

### 参考文献:

- [1] 王琦, 武俊梅, 彭晶倩, 等. 饮用水系统中药物和个人护理用品的研究进展[J]. 环境化学, 2018, **37**(3): 453-461. Wang Q, Wu J M, Peng J Q, *et al.* Research advances in pharmaceuticals and personal care products in drinking water system[J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(3): 453-461.
- [2] Li Z, Li M, Zhang Z Y, *et al.* Antibiotics in aquatic environments of China: a review and meta-analysis [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **199**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110668.
- [3] Lyu J, Yang L S, Zhang L, *et al.* Antibiotics in soil and water in China—a systematic review and source analysis[J]. Environmental Pollution, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115147.
- [4] Xiang Y, Wu H H, Li L, *et al.* A review of distribution and risk of pharmaceuticals and personal care products in the aquatic environment in China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112044.
- [5] Aruvian Research. Market for active pharmaceutical ingredients in China - forecast and analysis 2018 [EB/OL]. [https://www.marketresearch.com/Aruvian-s-R-search-v3456/Active-Pharmaceutical-Ingredients-China-Forecast-11908632/\(2018\)](https://www.marketresearch.com/Aruvian-s-R-search-v3456/Active-Pharmaceutical-Ingredients-China-Forecast-11908632/(2018)), 2021-08-08.
- [6] Li Y, Zhang L Y, Liu X S, *et al.* Ranking and prioritizing pharmaceuticals in the aquatic environment of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **658**: 333-342.
- [7] Feng L, Cheng Y R, Zhang Y Y, *et al.* Distribution and human health risk assessment of antibiotic residues in large-scale drinking water sources in Chongqing area of the Yangtze River [J]. Environmental Research, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109386.
- [8] 胡冠九, 穆肃, 赵永刚, 等. 南京典型县区饮用水源抗生素含量特征[J]. 环境化学, 2015, **34**(1): 192-193.
- [9] 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 等. 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5286-5293. Feng M J, Zhang Q, Song N H, *et al.* Occurrence characteristics and risk assessment of antibiotics in source water of the Nanjing reach of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5286-5293.
- [10] 李辉, 陈瑀, 封梦娟, 等. 南京市饮用水源地抗生素污染特征及风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1269-1277. Li H, Chen Y, Feng M J, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in Nanjing drinking water sources [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(4): 1269-1277.
- [11] Liu Y H, Feng M J, Wang B, *et al.* Distribution and potential risk assessment of antibiotic pollution in the main drinking water sources of Nanjing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(17): 21429-21441.
- [12] 胡冠九, 陈素兰, 穆肃, 等. 江苏省某市典型饮用水水源中抗生素质量浓度特征[J]. 水资源保护, 2016, **32**(3): 84-88. Hu G J, Chen S L, Mu S, *et al.* Characteristics of concentrations of antibiotics in typical drinking water sources in a city in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection, 2016, **32**(3): 84-88.
- [13] Kong M, Bu Y Q, Zhang Q, *et al.* Distribution, abundance, and risk assessment of selected antibiotics in a shallow freshwater body used for drinking water, China [J]. Journal of

- Environmental Management, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111738.
- [14] Wang Z Y, Chen Q W, Zhang J Y, *et al.* Characterization and source identification of tetracycline antibiotics in the drinking water sources of the lower Yangtze River [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **244**: 13-22.
- [15] 金磊, 姜蕾, 韩琪, 等. 华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2515-2521.
- Jin L, Jiang L, Han Q, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of thirteen sulfonamides antibiotics in a drinking water source in east China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2515-2521.
- [16] Cui C Z, Han Q, Jiang L, *et al.* Occurrence, distribution, and seasonal variation of antibiotics in an artificial water source reservoir in the Yangtze River delta, East China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(20): 19393-19402.
- [17] Wen Z H, Chen L, Meng X Z, *et al.* Occurrence and human health risk of wastewater-derived pharmaceuticals in a drinking water source for Shanghai, East China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **490**: 987-993.
- [18] Cao S S, Duan Y P, Tu Y J, *et al.* Pharmaceuticals and personal care products in a drinking water resource of Yangtze River Delta Ecology and Greenery Integration Development Demonstration Zone in China: occurrence and human health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137624.
- [19] Zhang Q Q, Ying G G, Pan C G, *et al.* Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(11): 6772-6782.
- [20] Li Y, Zhang L Y, Ding J, *et al.* Prioritization of pharmaceuticals in water environment in China based on environmental criteria and risk analysis of top-priority pharmaceuticals[J]. Journal of Environmental Management, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109732.
- [21] Guo J H, Liu S, Zhou L, *et al.* Prioritizing pharmaceuticals based on environmental risks in the aquatic environment in China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111479.
- [22] 周力, 刘珊, 郭家骅, 等. 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2748-2757.
- Zhou L, Liu S, Guo J H, *et al.* Screening and sequencing high-risk antibiotics in China's water environment based on ecological risks[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2748-2757.
- [23] He P, Wu J M, Peng J Q, *et al.* Pharmaceuticals in drinking water sources and tap water in a city in the middle reaches of the Yangtze River: occurrence, spatiotemporal distribution, and risk assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(2): 2365-2374.
- [24] Eguchi K, Nagase H, Ozawa M, *et al.* Evaluation of antimicrobial agents for veterinary use in the ecotoxicity test using microalgae[J]. Chemosphere, 2004, **57**(11): 1733-1738.
- [25] 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.
- [26] Yang L H, Ying G G, Su H C, *et al.* Growth-inhibiting effects of 12 antibacterial agents and their mixtures on the freshwater microalga *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, **27**(5): 1201-1208.
- [27] Halling-Sørensen B, Holten Lützhøft H C, Andersen H R, *et al.* Environmental risk assessment of antibiotics: comparison of mecillinam, trimethoprim and ciprofloxacin [J]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2000, **46**(S1): 53-58.
- [28] Ferrari B, Mons R, Vولات B, *et al.* Environmental risk assessment of six human pharmaceuticals: are the current environmental risk assessment procedures sufficient for the protection of the aquatic environment? [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, **23**(5): 1344-1354.
- [29] Isidori M, Lavorgna M, Nardelli A, *et al.* Toxic and genotoxic evaluation of six antibiotics on non-target organisms[J]. Science of the Total Environment, 2005, **346**(1-3): 87-98.
- [30] Holten Lützhøft H C, Halling-Sørensen B, Jørgensen S E. Algal toxicity of antibacterial agents applied in Danish fish farming[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, **36**(1): 1-6.
- [31] De Liguoro M, Fioretto B, Poltronieri C, *et al.* The toxicity of sulfamethazine to *Daphnia magna* and its additivity to other veterinary sulfonamides and trimethoprim [J]. Chemosphere, 2009, **75**(11): 1519-1524.
- [32] Kim Y, Choi K, Jung J, *et al.* Aquatic toxicity of acetaminophen, carbamazepine, cimetidine, diltiazem and six major sulfonamides, and their potential ecological risks in Korea [J]. Environment International, 2007, **33**(3): 370-375.
- [33] Park S, Choi K. Hazard assessment of commonly used agricultural antibiotics on aquatic ecosystems[J]. Ecotoxicology, 2008, **17**(6): 526-538.
- [34] Halling-Sørensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming[J]. Chemosphere, 2000, **40**(7): 731-739.
- [35] 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.
- [36] 农业农村部. 中华人民共和国农业部公告第 2292 号[EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/nyqgb/2015/jiuqi/201712/120171219\\_6103873.htm](http://www.moa.gov.cn/nyqgb/2015/jiuqi/201712/120171219_6103873.htm), 2021-11-09.
- [37] Sun J, Luo Q, Wang D H, *et al.* Occurrences of pharmaceuticals in drinking water sources of major river watersheds, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **117**: 132-140.
- [38] 廖杰, 魏晓琴, 肖燕琴, 等. 莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4081-4087.
- Liao J, Wei X Q, Xiao Y Q, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in Lianhua reservoir [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4081-4087.
- [39] 工业和信息化部. 2019 中国医药统计年报[M]. 北京: 工业和信息化部, 2020.
- [40] 谢全模, 陈云, 万金泉, 等. 东莞市饮用水源地中抗生素分布特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 166-178.
- Xie Q M, Chen Y, Wan J Q, *et al.* Occurrence, distribution and risk assessment of antibiotics in drinking water source in Dongguan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(1): 166-178.
- [41] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2020[M]. 武汉: 长江出版社, 2021.

- [42] Chen X P, Lei L, Liu S T, *et al.* Occurrence and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) against COVID-19 in lakes and WWTP-river-estuary system in Wuhan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148352.
- [43] 徐照彪, 王沫. 2019年武汉市水资源公报[R]. 武汉: 武汉市水务局, 2020.
- [44] 徐照彪, 王沫. 2020年武汉市水资源公报[R]. 武汉: 武汉市水务局, 2021.
- [45] 刘娜, 金小伟, 王业耀, 等. 我国地表水中药物与个人护理品污染现状及其繁殖毒性筛查[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(6): 1-12.
- Liu N, Jin X W, Wang Y Y, *et al.* Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) caused reproductive toxicity in surface water of China: a review [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(6): 1-12.
- [46] 苗荪, 陈磊, 左剑恶. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4925-4932.
- Miao S, Chen L, Zuo J E. Correlation analysis among environmental antibiotic resistance genes abundance, antibiotics concentrations, and heavy metals concentrations based on Web of Science searches [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4925-4932.

## 欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE;Scopus;化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM <sub>2.5</sub> Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region .....	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China .....	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> During COVID-19 Control in Suzhou .....	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 .....	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing .....	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM <sub>2.5</sub> in Baoding City in Winter .....	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> in Jiangbei New Area, Nanjing .....	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi .....	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example .....	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis .....	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 .....	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province .....	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn .....	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan .....	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City .....	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China .....	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River .....	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia .....	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism .....	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors .....	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai .....	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake .....	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks .....	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area .....	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin .....	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water .....	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 .....	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City .....	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years .....	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China .....	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data .....	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution .....	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution .....	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water .....	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing .....	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Autochthonic Photoelectron .....	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System .....	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions .....	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis .....	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland .....	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau .....	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China .....	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province .....	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey ( <i>Rhinopithecus roxellana</i> ) Habitat in Shennongjia Mountains .....	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation .....	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice .....	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments .....	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai .....	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops .....	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing .....	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 .....	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data .....	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)