

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价

严祺

(上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082)

摘要: 通过监测饮用水新型污染物从源头到龙头的分布情况, 研究明确了藻毒素、内分泌干扰物和抗生素三类新型污染物在各供水环节中的浓度情况, 并对各类新型污染物对人体的健康风险开展评价工作. 结果表明, 进厂水中的藻毒素主要以 MC-RR 和 MC-LR 为主, 内分泌干扰物仅为双酚 S 和雌酮两种. 经过水厂处水工艺后, 上述污染物可得到有效的去除. 监测期间, 除 2020 年 1 月检出磺胺类抗生素, 其余时段的抗生素类型主要以氟甲砜霉素 (FF) 为主. FF 的去除效果对氯的形态有较明显的相关性, 自由氯消毒相对于化合氯消毒, 对 FF 的去除效果较为良好. 藻毒素的风险度、内分泌干扰物的非致癌风险值和抗生素的风险商值均远小于 1, 尤其在二次供水环节, 表明这三类饮用水新型污染物对人体健康均不构成直接威胁.

关键词: 从源头到龙头; 藻毒素; 内分泌干扰物; 抗生素; 健康风险评价

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2136-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202203016

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai

YAN Qi

(Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: By monitoring the distribution of emerging contaminants in drinking water from the source to the tap, the concentration of algal toxins, endocrine disruptors, and antibiotics in each water supply link were determined, and the health risks of emerging contaminants to the human body were evaluated. The results showed that algal toxins in the waterworks inflow were mainly MC-RR and MC-LR, whereas the only endocrine disruptors in the waterworks inflow were bisphenol-s and estrone. The algal toxins, endocrine disruptors, and antibiotics were removed effectively after the water treatment process in the waterworks. During the monitoring period, florfenicol (FF) was mainly detected, except in January 2020 when a large number of sulfa antibiotics were detected. The removal effect of FF was obviously correlated with the form of chlorine. Compared with that of combined chlorine disinfection, free chlorine disinfection had a better effect on the removal of FF. The health risk numbers of algal toxins, endocrine disruptors, and antibiotics were far less than 1, especially in the secondary water supply. The results showed that the three emerging contaminants in drinking water did not pose a direct threat to human health.

Key words: from raw water to drinking water; algal toxins; endocrine disruptors; antibiotics; health risk assessment

随着经济社会发展和人口增长,越来越多的医药和化学品用于人类的生活与生产,并通过农用、医用兽用和生产废水排放等多种途径进入环境水体,进而威胁公众的饮用水安全和人类健康^[1~3]. 抗生素作为一种典型的新型污染物^[4],其在水体中的残留与去除已引起国内外学者的广泛关注和研究. 20 世纪 80 年代, Watts 等^[5]首次报道在地表水中检测到了 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的红霉素、磺胺甲唑和四环素,水环境中的抗生素开始引起高度关注^[6]. 水厂作为饮用水处理最为关键的环节,因此,大多数的研究也集中于水厂对抗生素的去除效果中. 姚宏等^[7]以美国常用的 CLA、ERY、LEV、SUL 和 TRI 抗生素为去除目标,研究了水厂各处理单元和不同采样季节目标抗生素的去除规律;姜蕾等^[8]通过对饮用水厂的采样检测,初步研究了原水中磺胺类、喹诺酮类和大环内酯类典型抗生素在水厂的去除特点,并分析出了水厂中抗生素的健康风险现状. 然而,抗生素在供水环节(尤其是市政管网和二次供水环

节)中的赋存情况仍缺乏相应地调查和研究.

水库型水源的投入和使用,可将区域内原水的分散取水改变为集约化取水,进一步保证了该区域内的供水安全. 然而,部分水库型水源的来水周边养殖业相对密集和抗生素使用量较大,同时河网密集,受上游污染排放影响较大,存在抗生素和内分泌干扰物等新型污染物风险^[9,10]. 此外,若水库中水动力较弱,则有利于藻类的生成^[11],也存在藻类生长而导致藻毒素浓度升高的风险. 因此,亟需开展调查研究,明确现阶段相关水库内各类型抗生素、内分泌干扰物和藻毒素的浓度情况. 在水厂环节,区域内水厂处理工艺存在差异,因此不同水厂对抗生素、内分泌干扰物和藻毒素的去除效果也亟待对比研究.

本研究选取抗生素 32 项、内分泌干扰物 14 项

收稿日期: 2022-03-02; 修订日期: 2022-07-07

作者简介: 严祺(1990~),男,硕士,主要研究方向为饮用水安全保障, E-mail: yanqi12390@126.com

和藻毒素 9 项作为水质指标,分析上述新型污染物在 原水、出厂水、管网末梢水和二次供水的供水全流 程中的浓度情况,进一步了解其在供水环节中的分 布特征和健康风险.

1 材料与方法

1.1 主要试剂与仪器

藻毒素、内分泌干扰物和抗生素标准品,用甲 醇溶解,配置成 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 储备溶液, -20°C 保 存,标准工作溶液现用现配. 甲酸、甲醇和乙腈均为 色谱纯,购于 Merck (Darmstadt, Germany). 乙二胺 四乙酸二钠 (Na_2EDTA , $\geq 99\%$), 购于 Amresco (Solon, OH, USA). 试验用纯水取自 Milli-Q 纯水仪 (Millipore, Bedford, MA, USA). 其他药品试剂为分 析纯.

$0.7\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜 (GF/F, Whatman, England),用于水样过滤. 固相萃取装置 (Supelco, USA), Oasis HLB 固相萃取柱 ($500\text{ mg}/6\text{ mL}$,

Waters, USA),用于水样净化富集. Turbo Vap II 氮 气自动浓缩仪 (Caliper, USA),用于富集后样品浓 缩. $0.22\text{ }\mu\text{m}$ PVDF 针式滤膜 (Millipore, USA),用 于浓缩后样品过滤. 安捷伦液相色谱-串联质谱仪 (Agilent 1260 HPLC 液相色谱仪系统, Agilent 6430 Triple Quad 三重四级杆串联质谱仪,电喷雾电离 源),用于新型污染物的检测分析.

1.2 监测方案和水厂工艺简介

1.2.1 监测指标

针对 1 号水源受上游来水水质影响,存在氨氮 浓度和有机污染物浓度偏高的风险^[12],本研究选 取的新型污染物监测指标如表 1 所示. 藻毒素 9 项,其中微囊藻毒素 7 项、节球藻毒素和柱孢藻毒 素; 内分泌干扰物 14 项,为化工原料类 5 项、雌 激素类 6 项和雄激素类 3 项; 抗生素 32 项,为林 可酰胺类 1 项、磺胺类 13 项、喹诺酮类 6 项、四 环素类 5 项、大环内酯类 3 项、 β -内酰胺类 1 项和 氯霉素类 3 项.

表 1 新型污染物监测指标
Table 1 Monitoring index of emerging contaminants

①藻毒素		②内分泌干扰物		③抗生素		
微囊藻毒素	RR	化工原料类	双酚 A	甲氧苄啶	林可酰胺类	林可霉素
	YR		双酚 F	磺胺	喹诺酮类	诺氟沙星
	LR		双酚 S	磺胺脒		氧氟沙星
	LA		壬基酚	磺胺嘧啶		恩诺沙星
	LY		辛基酚	磺胺甲基嘧啶		环丙沙星
	LW		雌酮	磺胺二甲嘧啶		洛美沙星
	LF	雌激素类	雌二醇	磺胺噻唑	四环素类	达氟沙星
节球藻毒素			雌三醇	磺胺甲噻二唑		四环素
柱孢藻毒素			乙炔雌二醇	磺胺甲噻唑		土霉素
			戊酸雌二醇	磺胺二甲异噻唑		金霉素
			己烯雌酚	磺胺氯哒嗪		强力霉素
		雄激素类	睾酮	磺胺对甲氧嘧啶	β -内酰胺类	美他环素
			甲基睾酮	磺胺二甲氧嘧啶		氨苄西林
			群勃龙	罗红霉素		氯霉素
				克拉霉素	氯霉素类	甲砒霉素
				泰乐菌素		氟甲砒霉素
				大环内酯类		

1.2.2 监测点位和频率

监测点位和采样频率的设置如表 2 所示,以各 水厂(A~F 水厂)出发,并选取对应的管网水和二 次供水采样点,实现了新型污染物从源头到龙头的 全流程监测. 同时,为对比 2 号水源和对应出厂水、 管网水、二次供水的新 型污染物浓度情况,本研究 也选取了以 2 号水源为水源的 G、H 水厂和对应管 网水、二次供水作为监测对象. 采样时间从 2019 年 4 月持续至 2020 年 6 月,共开展了 6 次新型污染物

采样检测工作.

1.2.3 水厂工艺简介

本研究所选取的水厂包括 1 号水源供水的 A~ F 水厂,以及 2 号水源供水的 G 水厂和 H 水厂. 目 前,上述水厂均为深度处理水厂,采用了臭氧活性炭 工艺,但在整理处理工艺上存在差异,如表 3 所示. A、B、D、F、G 和 H 水厂,均采用预臭氧-混凝沉淀-砂 滤-臭氧活性炭-清水池的处理工艺;C 水厂将超滤 代替砂滤,并置于臭氧活性炭工艺之后,E 水厂则无

预臭氧的处理环节,并将砂滤置于臭氧活性炭工艺之后.

表 2 监测点位和频率

Table 2 Monitoring point and frequency

水厂	A	B	C	D	E	F	G	H		
供水水源	1 号水源						2 号水源			
监测点位	各水厂对应的进厂水采样点、出厂水采样点、管网水采样点、二次供水采样点									
采样日期(年-月)	2019-04、2019-07、2019-09、2019-11、2020-01 和 2020-06									

表 3 水厂处理工艺¹⁾

Table 3 Water treatment process

水厂	A	B	C	D	E	F	G	H
处理工艺	①	①	②	①	③	①	①	①

1) ①预臭氧-混凝沉淀-砂滤-臭氧活性炭-清水池; ②预臭氧-混凝沉淀-臭氧活性炭-超滤-清水池; ③混凝沉淀-臭氧活性炭-砂滤-清水池

1.3 样品处理与检测

抗生素和内分泌干扰物水样前处理的富集浓缩和测定参照姜蕾等^[13]的方法进行.将 1 L 水样过滤后调节 pH 为 3.0,加入 0.5 g 螯合剂 Na₂EDTA,经 HLB 固相萃取柱进行富集,甲醇洗脱,氮吹浓缩,1:1 甲醇水溶液定容至 1.0 mL 待进样.采用液相色谱-串联质谱仪对抗生素和内分泌干扰物进行检测,电喷雾离子源正/负离子扫描模式(ESI⁺/ESI⁻),流动相为含 0.1% (体积比) 甲酸的乙腈溶液和 0.1% (体积分数) 甲酸的水溶液.抗生素、内分泌干扰物检测限范围分别位于 0.015 ~ 2.16 ng·L⁻¹ 和 0.01 ~ 2.23 ng·L⁻¹. 1 L 地表水加标 50 ng 的抗生素和内分泌干扰物混标,抗生素的回收率范围 75.1% ~ 108.7%,内分泌干扰物回收率范围 68.4% ~ 106.0%.藻毒素的检测方法参照上海市地方标准《水源水中微囊藻毒素测定液相色谱-串联质谱法》(DB 31/T 1178-2019).

1.4 健康风险评估方法

1.4.1 藻毒素

藻毒素的健康风险评估参考文献[14,15]的方法进行,建立水环境中化学致癌物和非化学致癌物的健康风险评估模型.本研究主要检出的藻毒素类型为微囊藻毒素-RR(MC-RR)和微囊藻毒素-LR(MC-LR),其中 MC-LR 体现为非致癌风险,MC-RR 的致癌性尚未阐明且尚无致癌性强度系数或参考剂量等相关毒理学参数.因此,本研究只探讨了 MC-LR 的非致癌风险.MC-LR 的非致癌风险计算公式为:

$$R = [2.2c_i / (m \times \text{age} \times \text{RfD})] \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, R 为 MC-LR 经饮水途径个人年均健康危害风险度; c_i 为水中 MC-LR 的浓度 (mg·L⁻¹); m 为成人平均体重,取 70 kg; age 为人均寿命,取 70; RfD 为 MC-LR 经饮水途径参考剂量,取 4 × 10⁻⁵

mg·(kg·d)⁻¹.

1.4.2 内分泌干扰物

内分泌干扰物的健康风险评估参考王淑婷等^[16]的方法进行,建立水环境中化学致癌物和非化学致癌物的健康风险评估模型.本次研究检出的内分泌干扰物类型仅为双酚 S 和雌酮,由于 WHO 和美国 EPA 尚未给出这些物质的致癌强度系数和参考剂量等相关参数,因此本次研究仅评价该两种内分泌干扰物的非致癌风险.双酚 S 和雌酮的非致癌风险计算公式为:

$$\text{HQ} = \text{CDI} / \text{RfD} \quad (2)$$

式中, HQ 为非致癌风险值,当 HQ ≥ 1 时认为会对人体产生健康危害,当 HQ < 1 时表示风险较小; CDI 为单位体重日摄入量 [mg·(kg·d)⁻¹]; RfD 为目标物的非致癌参考剂量 [mg·(kg·d)⁻¹].

1.4.3 抗生素

抗生素的健康风险评估参考李辉等^[17]的方法进行,根据人体对抗生素的日均可接受量,计量抗生素对人体健康的风险商值.抗生素的人体健康风险商值计算公式为:

$$\text{RQ}_H = \frac{\text{MEC} \times \text{DWI} \times \text{AB} \times \text{FOE}}{\text{ADI} \times \text{BW} \times \text{HQ}} \quad (3)$$

式中, RQ_H 为人体健康的风险商值,当 RQ_H ≤ 0.01 时,表明抗生素对人体健康造成的风险水平可忽略不计,当 0.01 < RQ_H ≤ 0.1 时,表明抗生素对人体健康造成的风险属于低水平;当 0.1 < RQ_H ≤ 1 时,表明抗生素对人体健康造成的风险属于中等水平,当 RQ_H > 1 时,表明抗生素对人体健康造成的风险处于高水平; MEC 为抗生素的测定浓度 (μg·L⁻¹); DWI 为每日饮水量 (L·d⁻¹); AB 为胃肠吸收率,按 1 计算; FOE 为暴露频率 (350 d·a⁻¹),按 0.96 计算; ADI 为日均可接受摄入量 [μg·(kg·d)⁻¹]; BW

为日均体重(kg);HQ为最高风险,按1计算。

2 结果与分析

2.1 藻毒素分布特征

监测期间通过采样检测发现:经过水厂处理工艺后,各水厂对应的出厂水、管网水和二次供水环节均无藻毒素的检出;各水厂进厂水的藻毒素浓度情况如表4和图1所示。由表4可知,2019年4月、

2020年1月和2020年6月在各水厂进厂水中也均无藻毒素的检出,2019年7月各水厂进厂水藻毒素浓度相对较高。数据表明,原水中藻毒素的浓度与气温存在较强的相关性,当气温较高时,原水中藻类生长环境较为良好,有利于藻毒素的生成;而现阶段各水厂的深度处理工艺均能较好地去除进厂水中的藻毒素,且在管网水和二次供水中均无藻毒素的再生。

表4 水厂进厂水藻毒素浓度¹⁾/ng·L⁻¹

Table 4 Algal toxin concentration of waterworks inflow/ng·L ⁻¹								
月份	A	B	C	D	E	F	G	H
4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	19.8	70.9	109.4	11.6	62.7	15.3	34.1	39.8
9	17.4	ND	30.1	4.9	15.7	10.4	ND	42.1
11	9.5	9.3	9.9	4.7	11.9	9.2	3.9	2.7
次年1月	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
次年6月	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

1)ND表示未检出

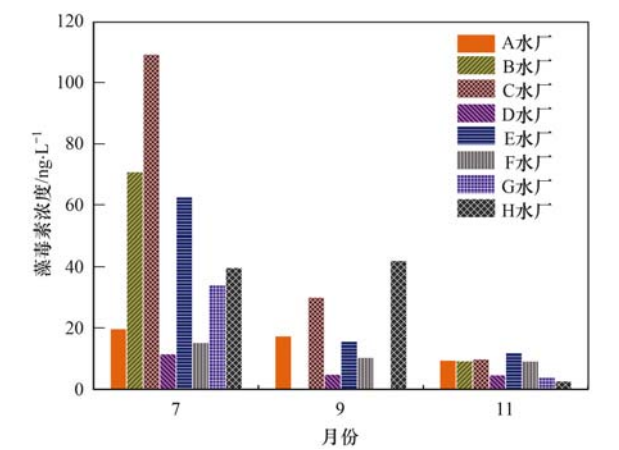


图1 水厂进厂水藻毒素浓度

Fig. 1 Algal toxin concentration of waterworks inflow

进一步分析藻毒素的监测数据,发现检出的藻毒素类型主要以MC-RR和MC-LR为主,与太

湖^[18]和巢湖^[19]等水库型水源地中藻毒素的主要类型相同。该两类藻毒素在各水厂进厂水中的检出情况如图2所示。与藻毒素总浓度相同,MC-RR和MC-LR在进厂水中的浓度也均在7月达到最大值。比较A~F水厂进厂水中藻毒素的浓度,可以发现同为1号水源供水水厂,距离原水泵站较远的A、D和F水厂的进厂水中藻毒素浓度较低,而距离原水泵站较近的B、C和E水厂的进厂水中藻毒素浓度较高。该现象与1号水源泵站对输送原水进行预氧化处理有关^[20]。原水输送管网中,氧化剂会对藻毒素进行氧化作用,距离越远的水厂,氧化剂与藻毒素的作用时间越长,因而进厂水中藻毒素浓度也越低。

2.2 内分泌干扰物分布特征

监测期间通过采样检测发现:经过水厂处理工

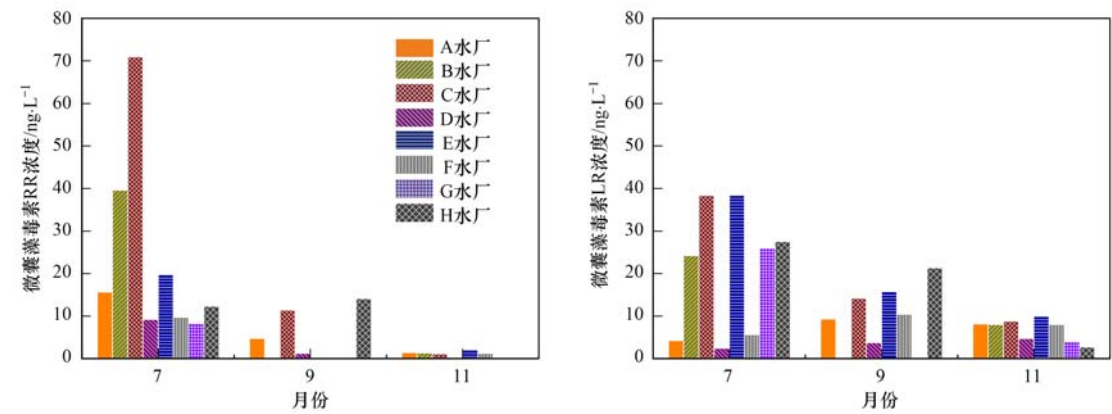


图2 水厂进厂水微囊藻毒素RR和LR浓度

Fig. 2 MC-RR and MC-LR concentration of waterworks inflow

艺后,大部分出厂水中内分泌干扰物得到有效地去除. 2019 年 4 月和 2020 年 1 月在各监测点位均无内分泌干扰物的检出,其余时段内分泌干扰物的浓度情况如图 3 所示. 总体而言,内分泌干扰物在水体中的浓度较小,最高出现在 2019 年 7 月份 E 水厂的进厂水中,为 $27.05 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 数据表明,现阶段各水

厂的深度处理工艺均能较好地去除进厂水中的内分泌干扰物,且在管网水和二次供水无内分泌干扰物的再生. 进一步分析内分泌干扰物的检出类别,发现 2019 年 7 月检出的内分泌干扰物仅为双酚 S 和雌酮两种,而 2019 年 9 月、11 月和 2020 年 6 月仅有双酚 S 检出.

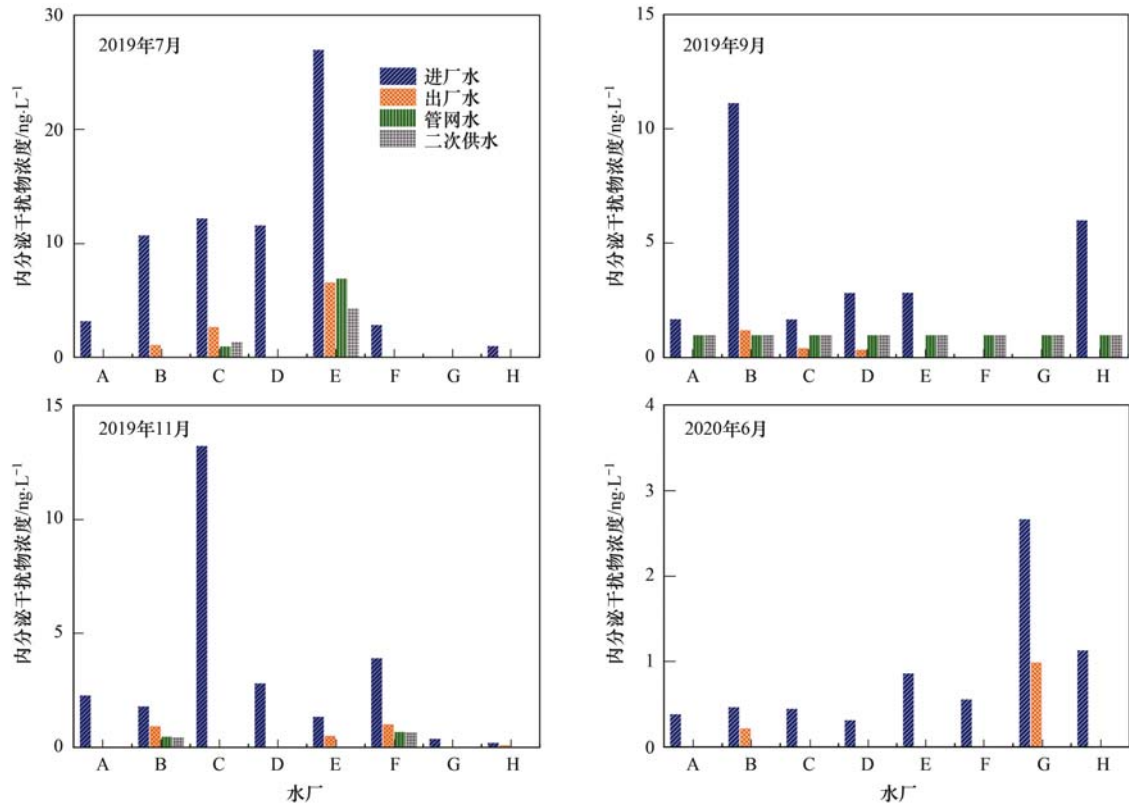


图 3 内分泌干扰物浓度
Fig. 3 Endocrine disruptor concentration

双酚 S 作为内分泌干扰物的主要检出类型,尤其在 1 号水源供水水厂的进厂水中,主要与上游来水中存在工业化合物有关^[10]. 对比双酚 S 在全球范围内的浓度情况,结果如表 5 所示. 对比可知,1 号水源原水中的双酚 S 浓度较小,与日本河流中双酚 S 的浓度水平相当,且远低于印度河流中双酚 S 的浓度; 2 号水源原水中的双酚 S 浓度则更小. 整体而言,现阶段 1 号水源和 2 号水源供水水厂的进厂水中双酚 S 均处于低污染水平.

2.3 抗生素分布特征

监测期间通过采样检测发现:经过水厂处理工艺后,出厂水中抗生素得到有效的去除. 对比不同水厂进厂水中抗生素总量浓度可知,由于 1 号水源来水周边养殖业相对密集、抗生素使用量较大,原水(A~F 水厂进厂水)抗生素浓度远高于 2 号水源原水(G 水厂和 H 水厂的进厂水)抗生素浓度(图 4).

对比不同时段水体中抗生素总量浓度可知,2020 年 1 月的 1 号水源原水(A~F 水厂进水)抗生

表 5 双酚 S 在全球范围内的浓度情况¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 5 Concentrations ranges of BPS around the world/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	最大值	最小值	平均值	文献
2 号水源进厂水	6.02	ND	1.92	本研究
1 号水源进厂水	15.61	ND	3.72	
黄浦江(中国)	25.27	4.83	13.26	[10]
江户川河(日本)	4.7	2.7	3.4	
荒川河(日本)	7.6	1.6	4.6	[21]
多摩川河(日本)	8.7	1.5	4.7	
东京湾(日本)	15	ND	8.5	
库姆河(印度)	3 640	15	768	
阿迪亚尔河(印度)	7 200	ND	6 840	
白金汉运河(印度)	2 100	58	1 080	
库塔莱亚尔河(印度)	8.7	ND	8.7	

1) ND 表示未检出

素浓度明显高于其他时段,主要为磺胺类抗生素的增加(图 5). 该结论与程铭等^[9]研究的结果相符. 主要原因有以下 3 点:①由于上游河流水质受人

类活动影响较大,春冬季节是人畜易患病的季节,因此该时段的抗生素用量会增加;②上游河流沿岸和1号水源周边存在较多的养殖区域,该时段为农户对养殖池塘的清淤的高峰时段,而养殖池塘的清淤则会导致原水中抗生素的增加;③春季

是河道枯水期,流量相对较小,导致抗生素浓度的进一步升高。

总体而言,现阶段各水厂的深度处理工艺均能较好地去除进厂水中的抗生素,且在管网水和二次供水中均无抗生素的再生。

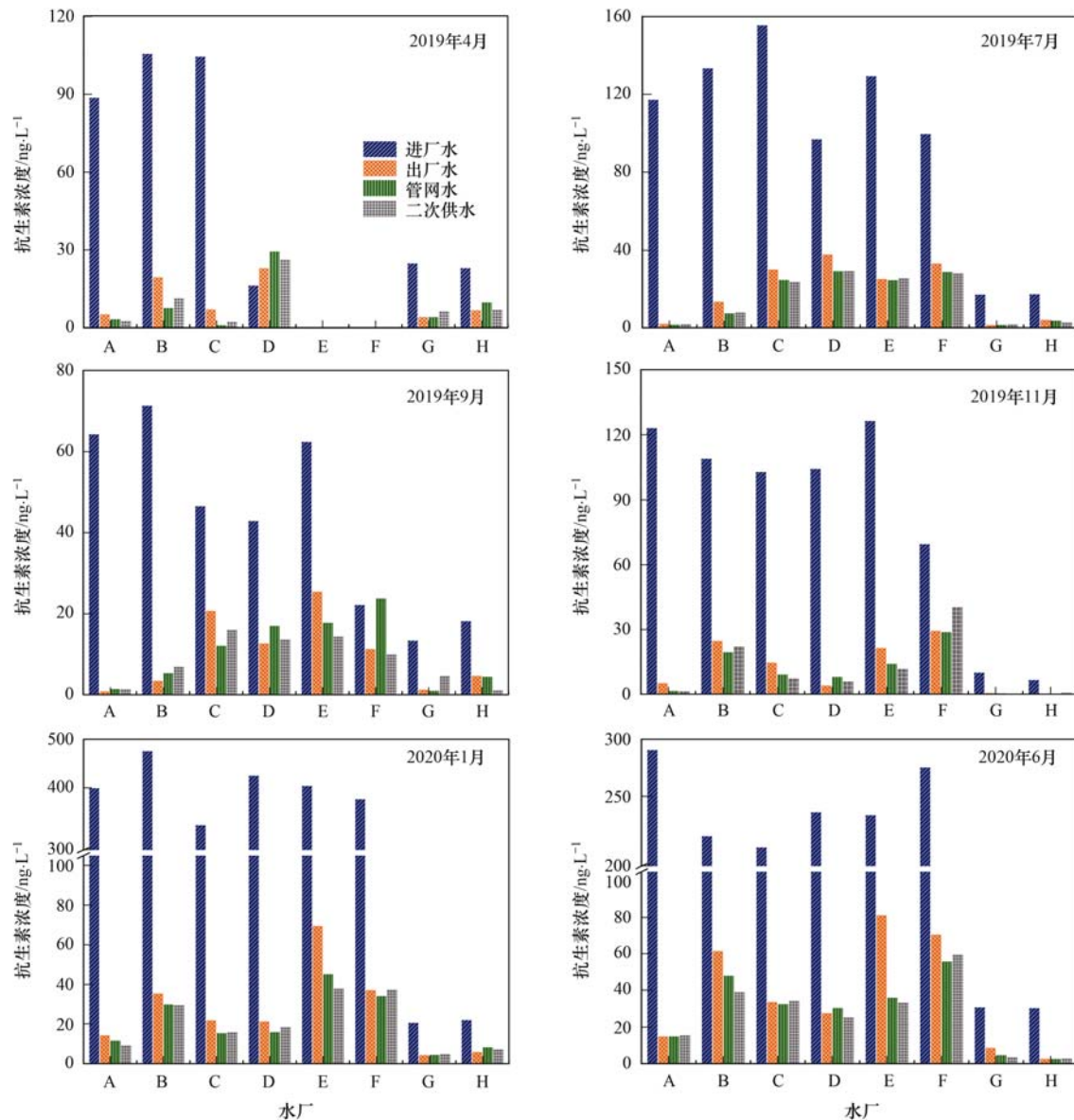


图4 抗生素浓度

Fig. 4 Antibiotic concentration

进一步分析抗生素的监测数据,发现检出的抗生素类型包括林可霉素(LNK)、甲氧苄啶(TMP)、磺胺(SAM)、磺胺脒(SG)、磺胺嘧啶(SDZ)、磺胺二甲嘧啶(SMZ)、磺胺噻唑(STZ)、磺胺甲噁唑(SMX)、磺胺氯哒嗪(SCP)、磺胺对甲氧嘧啶(SMD)、四环素(TC)、克拉霉素(CLA)、罗红霉素(ROX)、甲砒霉素(TAP)和氟甲砒霉素(FF)。

以进厂水中该类型抗生素浓度最大检出值 $>10\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 为标准,进厂水中检出的主要抗生素共8种。

分析对比1号水源原水(A~F水厂的进水)、2号水源原水(G水厂和H水厂的进水)和国内部分典型河流、湖泊地表水体中抗生素浓度水平(表6)。结果表明,2号水源原水抗生素总量浓度明显低于其他区域;珠江抗生素总量浓度则明显高于其他区域;1号水源原水、太湖、大通湖和长江南京段抗生素总量浓度相当。不同流域的抗生素种类存在一定的差异,太湖、巢湖和大通湖抗生素以磺胺类和喹诺酮类为主;长江南京段抗生素以大环内酯类和

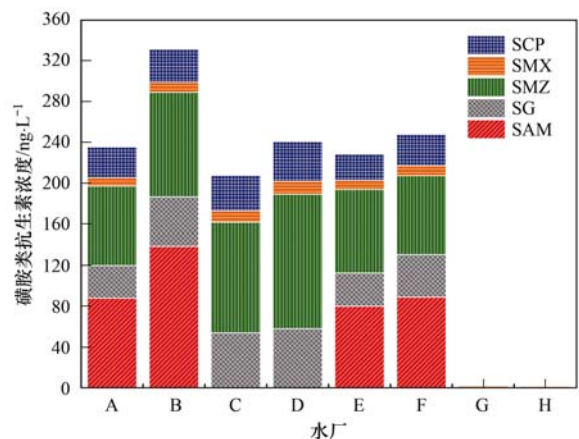


图 5 磺胺类抗生素 2020 年 1 月监测结果

Fig. 5 Monitoring results of sulfa antibiotics in January 2020

磺胺类为主,其中克林霉素浓度最高,为 739.44 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 环渤海典型河流抗生素以 β -内酰胺类、大

环内酯类和喹诺酮类为主,其中青霉素 G 浓度最高,为 355.13 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 珠江广州段抗生素以大环内酯类(脱水红霉素,最高为 643 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)和喹诺酮类(氧氟沙星,最高为 703 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)为主。

除 2020 年 1 月有相对较多的磺胺类抗生素检出外,氟甲砜霉素 (FF) 在水体中的检出最为频繁. FF 主要用于治疗敏感细菌所致的畜禽和水产细菌性疾病和支原体感染. 本研究表明,该物质可能是研究区域水体中抗生素的主要来源. 该抗生素在各环节中的检出情况如图 6 所示。

对比不同水厂进水中 FF 浓度,与抗生素总量情况相同,2 号水源原水中 FF 的浓度远小于 1 号水源原水中 FF 的浓度. 观察 B 和 C 两水厂进出水中 FF 浓度的变化,当该两水厂均采用自由氯消毒时,出厂水中均无 FF 的检出 (2019 年 4 月); 当 C 水

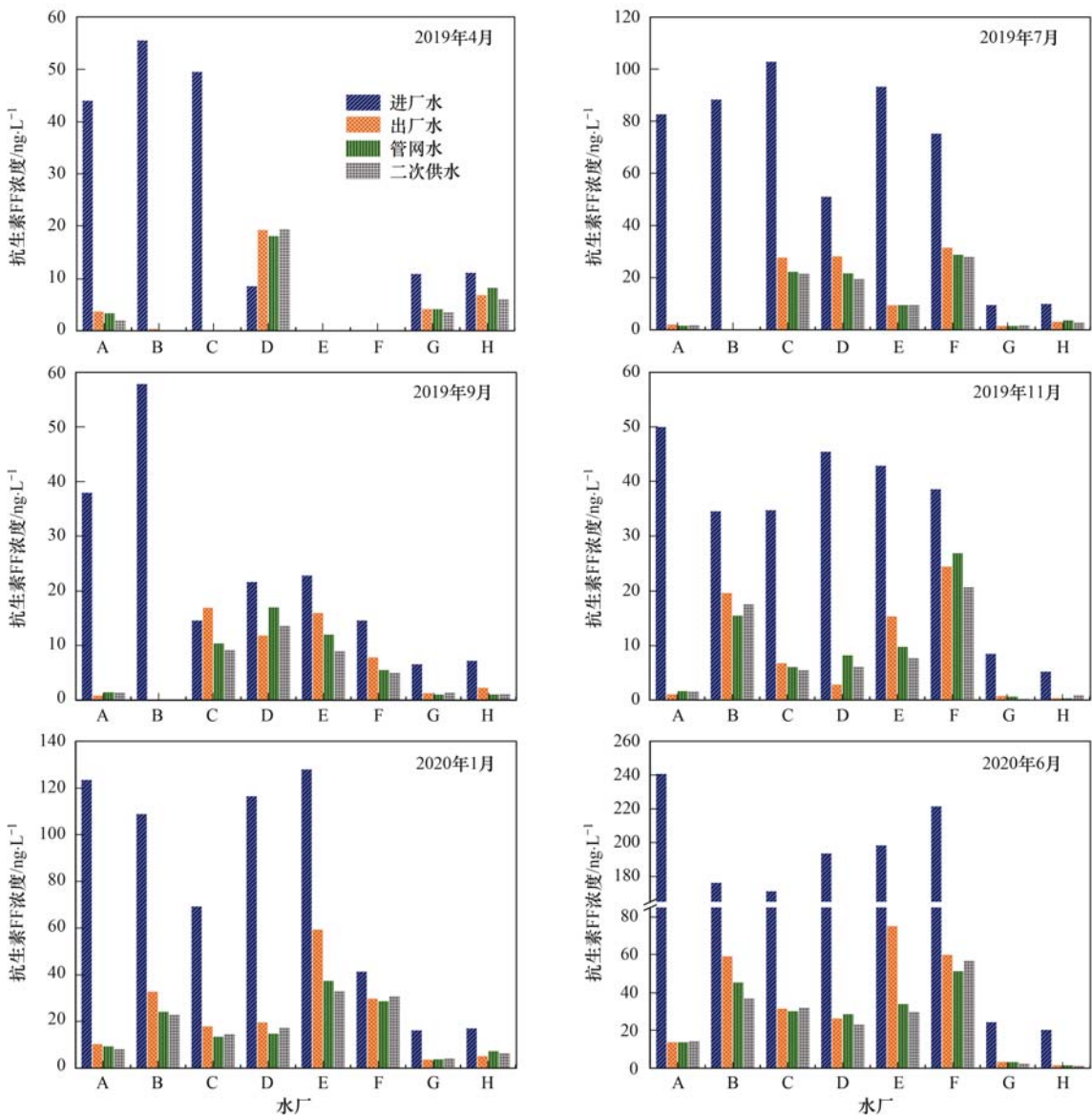


图 6 氟甲砜霉素浓度

Fig. 6 Florfenicol concentration

表 6 国内部分湖泊、河流水体中抗生素浓度对比¹⁾/ng·L⁻¹
Table 6 Comparison of antibiotic concentrations in water of domestic typical lakes and rivers/ng·L⁻¹

抗生素类型	抗生素总量	磺胺类(最大值)					林可酰胺类(最大值)	氯霉素类(最大值)		文献
		SAM	SG	SMZ	SMX	SCP	LNK	TAP	FF	
1 号水源原水	16.36 ~ 474.29	138.68	57.85	131.38	45.67	38.88	79.44	20.62	240.91	本研究
2 号水源原水	6.81 ~ 30.99	ND	ND	0.42	8.42	2.52	ND	5.35	24.61	本研究
太湖	8.92 ~ 188.3	—	—	14.8	23.3	—	—	9.9	—	[22,23]
巢湖	—	—	—	4.7	171.6	4.6	—	—	—	[24]
大通河	36.69 ~ 149.33	—	—	0.16	50.9	—	—	—	—	[25]
长江南京段	13.37 ~ 780.5	—	—	8.2	9.67	—	22	—	—	[17,26]
环渤海典型河流	—	—	—	1.74	8.87	1.63	—	64.06	34.44	[27]
珠江广州段	1 000 ~ 3 000	—	—	410	210	192	53.4	—	—	[28]

1) ND 表示未检出; —表示未检测该类抗生素

厂从 7 月开始采用氯氨消毒后,出厂水中则会有少量 FF 的残留;而 B 水厂从 11 月开始采用氯氨消毒后,出厂水中也会有少量 FF 的残留.该现象表明了 FF 的去除效果对氯的形态有较明显的相关性,自由氯消毒相对于化合氯消毒,对 FF 的去除效果较为良好.此外,E 水厂也采用自由氯消毒,然而该水厂的出厂水中,仍有少量 FF 残留.该现象则由于 E 水厂缺少预臭氧环节,导致整个水厂处理工艺对于 FF 的去除效果相对较弱.总体而言,现阶段的水厂深度处理工艺并不能完全去除 FF,当进厂水 FF 浓度升高时,出厂水的 FF 浓度也相应升高.

3 讨论

3.1 藻毒素健康风险评价

监测结果表明,经过水厂处理工艺后,各水厂对应的出厂水、管网水和二次供水环节均无藻毒素的检出.因此,本次藻毒素健康风险评价,仅针对进厂水中的 MC-LR.计算可知,在监测时段内,各进厂水中的 MC-LR 的健康风险度在 $2.69\text{E}-11 \sim 4.31\text{E}-10 \text{ a}^{-1}$ 之间,远低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受水平($5.0\text{E}-5 \text{ a}^{-1}$,即每年每千万人口因饮水中各种污染物而受到健康危害或死亡的人数不超过 500 人)^[30].王伟琴等^[14]对浙江省 101 个饮用水源地的 MC-LR 进行了健康风险评价,得到的年均非致癌健康风险度是 $4.8\text{E}-11 \text{ a}^{-1}$,该数值与本研究各进厂水中的 MC-LR 的健康风险度相近.

3.2 内分泌干扰物健康风险评价

本研究根据公式(2)计算两种内分泌干扰物(雌酮和双酚 S)的非致癌风险值.考虑到饮水和皮肤接触是饮用水中污染物的主要暴露途径,因此

CDI 的值参考王淑婷等^[16]的方法计算,将各参数代入简化后的 CDI 计算公式:

$$\begin{aligned} \text{CDI} &= \text{CDI}_{\text{饮水}} + \text{CDI}_{\text{接触}} \\ &= (0.0333\rho + 0.0241\rho) \times k \\ &= 0.05743\rho \times k \end{aligned} \tag{4}$$

式中, ρ 为目标物实测质量浓度($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$); k 为比例系数,取 $1 \text{ L}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$.通过查询美国 EPA 综合风险信息系统(IRIS)和文献[31,32]得到雌酮和双酚 S 两种目标物的 RfD 值,分别为 $0.867 \text{ ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $50\,000 \text{ ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$.代入计算可得,监测期间雌酮的非致癌风险值在 $0 \sim 0.757$ 之间,双酚 S 的非致癌风险值在 $0 \sim 1.79\text{E}-5$ 之间.双酚 S 的非致癌风险值远小于 1,风险较小;雌酮的非致癌风险值相对较高,但雌酮仅在 2019 年 7 月检出,且在二次供水环节的非致癌风险值相对较小(最大值为 0.29).

3.3 抗生素健康风险评价

以进厂水中该类型抗生素浓度最大检出值 $>10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 为标准,进厂水中检出的主要抗生素共 8 种.本研究选取该 8 种抗生素的最大检出浓度,计算其在进厂水和二次供水环节对人体健康的风险值.主要抗生素在进厂水和二次供水环节的浓度最大值,以及 ADI 值(参考澳大利亚农药和兽药管理局的 ADI 清单^[33])如表 7 所示.

参照李辉等^[17]的方法,选取最大抗生素检出浓度,分别计算进厂水和二次供水中抗生素对人体健康的风险商值(RQ_H),不同年龄段的人群 BW(人均体重,kg)和 DWI(每日饮水量, $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)取值见表 8.由图 7 可知,进厂水中各类型抗生素的风险商值均远小于 1.风险商值最大的抗生素为 FF(RQ_H 接近 0.01),这与该类抗生素的 ADI 值较低[$\text{ADI} = 1 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]有关.在二次供水环节,抗生素的风

表 7 主要抗生素浓度最大值和 ADI 值¹⁾

Table 7 Maximum concentration and ADI of main antibiotic

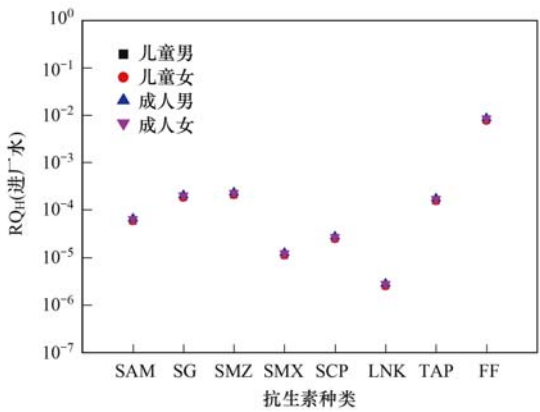
抗生素种类	磺胺类					林可酰胺类	氯霉素类	
	SAM	SG	SMZ	SMX	SCP	LNK	TAP	FF
进厂水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	138.68	57.85	131.38	45.67	38.88	79.44	20.62	240.91
二次供水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	1.89	2.41	0.52	15.86	0.7	ND	4.1	56.97
ADI 值/ $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	75.0	10.0	20.0	130.0	50.0	1 000.0	4.2	1.0

1) ND 表示未检出

表 8 成人和儿童的 BW 和 DWI 值

Table 8 Average body weight and daily water intake for adults and children

研究对象	BW/kg	DWI/ $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$
儿童-男	24	0.81
儿童-女	23	0.76
成人-男	66.1	2.48
成人-女	57.8	2.12



险商值进一步降低,表现为对人体健康风险进一步降低.

上述结果表明现阶段本研究区域饮用水中的抗生素对人体健康无直接风险,这与世界卫生组织以及其他研究的结果是一致的^[34~36],并与大通湖^[25]、长江南京段^[26]、珠三角地区饮用水体^[37]和华东地区长江下游水源地^[38]的研究结果一致.

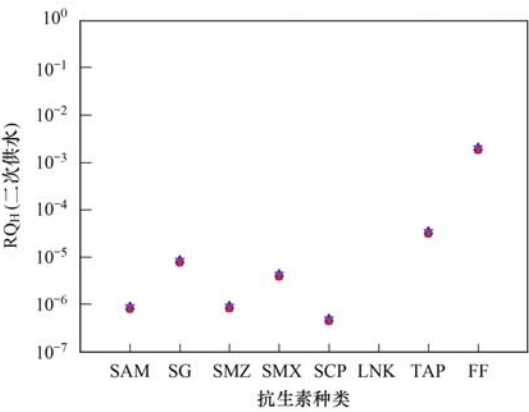


图 7 进厂水和二次供水抗生素的人体健康风险

Fig. 7 Human health risk assessment of antibiotics in waterworks inflow and secondary water supply

4 结论

(1)现阶段各水厂的深度处理工艺均能较好地去除进厂水中的藻毒素,且在管网水和二次供水中均无藻毒素的再生.进厂水中的藻毒素主要以 MC-RR 和 MC-LR 为主,受原水输送管道中预氧化剂的氧化作用,距离原水泵站越远的水厂,进厂水中藻毒素浓度也越低.

(2)内分泌干扰物仅检出双酚 S 和雌酮两种,水体中内分泌干扰物浓度较低.监测期间,原水中最高检出浓度为 $27.05\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,经过水厂处水工艺后,出厂水中内分泌干扰物基本无检出,可得到有效的去除.

(3)抗生素主要检出种类为磺胺类和氯霉素类.经过水厂处水工艺后出,厂水中抗生素得到有效的去除.监测期间,除 2020 年 1 月有大量的磺胺类抗生素检出外,其余时段的抗生素类型主要以氟甲砜霉素(FF)为主. FF 的去除效果与氯的形态有明显的相关性,自由氯消毒相对于化合氯消毒,对

FF 的去除效果较为良好.

(4)对饮用水中藻毒素、内分泌干扰物和抗生素开展健康风险评价.结果显示,藻毒素的风险度、内分泌干扰物的非致癌风险值和抗生素的风险商值均远小于 1,尤其在二次供水环节.该结果表明该三类饮用水新型污染物对人体健康均不构成直接威胁.

参考文献:

[1] 张新波,宋姿,张丹,等. 天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 99-108.
Zhang X B, Song Z, Zhang D, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of antibiotics in the water supply system in Tianjin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 99-108.
[2] 苏超,崔严. 长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4981-4988.
Su C, Cui Y. Risk ranking of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in the aquatic environment of the Yangtze River basin [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4981-4988.
[3] 姜锦林,周军英,刘仁彬,等. 太湖重污染湖区和水源地水质概况及藻毒素污染环境风险[J]. 生态毒理学报, 2019,

- 14(3): 60-71.
- Jiang J L, Zhou J Y, Liu R B, *et al.* General situation of water quality and environmental risks of algal toxins pollution in major polluted area and water sources of Lake Taihu[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(3): 60-71.
- [4] 金磊, 姜巍巍, 姜蕾, 等. 太浦河水体中抗生素赋存特征及生态风险[J]. *净水技术*, 2022, **41**(4): 35-40.
- Jin L, Jiang W W, Jiang L, *et al.* Occurrence characteristics and ecological risk of antibiotics in water body of Taihu River[J]. *Water Purification Technology*, 2022, **41**(4): 35-40.
- [5] Watts C D, Craythorne M, Fielding M, *et al.* Analysis of organic micropollutants in water [A]. In: Angeletti G, Bjorseth A (Eds.). *The 3rd European Symposium on Organic Micropollutants* [C]. Dordrecht: Reidel Publishing Co., 1983. 19-21.
- [6] Homem V, Santos L. Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices-a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, **92**(10): 2304-2347.
- [7] 姚宏, 王辉, 苏佳亮, 等. 某饮用水处理厂中 5 种抗生素的去除[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(3): 801-809.
- Yao H, Wang H, Su J L, *et al.* Removal of five antibiotics from a drinking water treatment plant [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(3): 801-809.
- [8] 姜蕾, 崔长征, 黄岭. 典型抗生素在饮用水厂的去特征与健康风险[J]. *净水技术*, 2016, **35**(S1): 100-103, 121.
- Jiang L, Cui C Z, Huang L. Removal of antibiotics in drinking water processes and their health risk [J]. *Water Purification Technology*, 2016, **35**(S1): 100-103, 121.
- [9] 程铭, 张波, 何义亮, 等. 太浦河金泽水源地抗生素抗性基因赋存特征[J]. *环境化学*, 2019, **38**(11): 2405-2414.
- Cheng M, Zhang B, He Y L, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotic resistance genes in Jinze Reservoir and surrounding area of Taihu River[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(11): 2405-2414.
- [10] 黄文平, 鲍铁凡, 胡霞林, 等. 黄浦江上游水源地中 31 种内分泌干扰物的分布特征以及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(6): 1488-1495.
- Huang W P, Bao Y F, Hu X L, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of 31 endocrine disrupting chemicals in the water source of upstream Huangpu River [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(6): 1488-1495.
- [11] 张海涵, 王娜, 宗容容, 等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(1): 181-190.
- Zhang H H, Wang N, Zong R R, *et al.* Research progress on influence of hydrodynamic conditions on algal physiology and ecology [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(1): 181-190.
- [12] 童俊. 金泽水库及其上游来水水质特征及变化规律[J]. *净水技术*, 2020, **39**(1): 58-68.
- Tong J. Characteristics and variation rules of raw water quality for Jinze Reservoir and upstream water [J]. *Water Purification Technology*, 2020, **39**(1): 58-68.
- [13] 姜蕾, 蔡海芸, 卢宁. 黄浦江上游水体中抗生素的分布特征与生态风险[J]. *净水技术*, 2014, **33**(S2): 81-85.
- Jiang L, Cai H Y, Lu N. Occurrence and ecological risk of antibiotics in upstream aquatic environment of the Huangpu River [J]. *Water Purification Technology*, 2014, **33**(S2): 81-85.
- [14] 王伟琴, 金永堂, 吴斌, 等. 水源水中微囊藻毒素的遗传毒性与健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(4): 468-476.
- Wang W Q, Jin Y T, Wu B, *et al.* Assessment on genotoxicity and health risks of microcystin in drinking water sources [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(4): 468-476.
- [15] 金永堂, 王伟琴, 孙肖瑜. 饮用水源水中典型有机污染物健康风险与遗传毒性评价[J]. *环境卫生学杂志*, 2011, **1**(1): 4-10, 24.
- Jin Y T, Wang W Q, Sun X Y. Assessment of the health risk and genotoxicity of organic pollutants in source water [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2011, **1**(1): 4-10, 24.
- [16] 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 等. 无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 166-174.
- Wang S T, Rao Z, Guo F, *et al.* Occurrence characteristics and health risk assessment of endocrine disrupting chemicals in groundwater in Wuxi-Changzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 166-174.
- [17] 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.
- [18] 范亚民, 姜伟立, 刘宝贵, 等. 蓝藻水华暴发期间太湖贡湖湾某水厂水源水及出厂水中微囊藻毒素污染分析及健康风险评价[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(1): 25-33.
- Fan Y M, Jiang W L, Liu B G, *et al.* Temporal microcystin dynamics of the source water and finished water in a waterworks of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(1): 25-33.
- [19] 余丽, 朱广伟, 孔繁翔, 等. 巢湖微囊藻毒素异构体组成的时空分布特征及影响因子[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(3): 700-713.
- Yu L, Zhu G W, Kong F X, *et al.* Spatiotemporal characteristics of microcystin variants composition and associations with environmental parameters in Lake Chaohu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 700-713.
- [20] 朱骅, 黄佳菁, 朱宜平. 预氯化对原水输送过程中藻类影响初探[J]. *净水技术*, 2016, **35**(S2): 56-60.
- Zhu H, Huang J J, Zhu Y P. Preliminary study about the effect of pre-chlorination on algae in the transportation of raw water [J]. *Water Purification Technology*, 2016, **35**(S2): 56-60.
- [21] Yamazaki E, Yamashita N, Taniyasu S, *et al.* Bisphenol A and other bisphenol analogues including BPS and BPF in surface water samples from Japan, China, Korea and India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 565-572.
- [22] 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.
- [23] 丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 等. 太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1811-1819.
- Ding J N, Liu S J, Zou J M, *et al.* Spatiotemporal distributions and ecological risk assessments of typical antibiotics in surface water of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1811-1819.
- [24] Tang J, Shi T Z, Wu X W, *et al.* The occurrence and distribution of antibiotics in Lake Chaohu, China: Seasonal

- variation, potential source and risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2015, **122**: 154-161.
- [25] 刘晓晖, 卢少勇. 大通湖表层水体中抗生素赋存特征与风险[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 320-329.
- Liu X H, Lu S Y. Occurrence and ecological risk of typical antibiotics in surface water of the Datong Lake, China[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 320-329.
- [26] 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.
- [27] 赵富强, 高会, 李瑞婧, 等. 环渤海区域典型河流下游水体中抗生素赋存状况及风险评估[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(1): 109-118.
- Zhao F Q, Gao H, Li R J, *et al.* Occurrences and risk assessment of antibiotics in water bodies of major rivers in Bohai Rim Basin[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 109-118.
- [28] 周志洪, 赵建亮, 魏晓东, 等. 珠江广州段水体抗生素的复合污染特征及其生态风险[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- Zhou Z H, Zhao J L, Wei X D, *et al.* Co-occurrence and ecological risk of antibiotics in surface water of Guangzhou section of Pearl River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- [29] 张聪, 宋超, 赵志祥, 等. 环太湖流域养殖水产品中氟苯尼考残留现状及风险评估[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(5): 871-875.
- Zhang C, Song C, Zhao Z X, *et al.* Residue and health risk assessment of florfenicol in aquaculture products around Tai Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(5): 871-875.
- [30] 孙莉, 王明泉, 辛晓东, 等. 饮用水重金属等污染物健康风险的初步评价[J]. *城镇供水*, 2014, (2): 49-51.
- [31] 吴乾元, 邵一如, 王超, 等. 再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1041-1050.
- Wu Q Y, Shao Y R, Wang C, *et al.* Health risk induced by estrogens during unplanned indirect potable reuse of reclaimed water from domestic wastewater[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1041-1050.
- [32] Australian guidelines for water recycling managing health and environmental risks (Phase 2)-augmentation of drinking water supplies[R]. Natural Resource Management Ministerial Council/Environment Protection and Heritage Council/National Health and Medical Research Council, 2008. 36-37.
- [33] Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority. Acceptable daily intakes for agricultural and veterinary chemicals [EB/OL]. <https://apvma.gov.au/node/26596#Alphalistofchemicals>, 2022-06-30.
- [34] De Jesus Gaffney V, Almeida C M M, Rodrigues A, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals in a water supply system and related human health risk assessment [J]. *Water Research*, 2015, **72**: 199-208.
- [35] Leung H W, Jin L, Wei S, *et al.* Pharmaceuticals in tap water: human health risk assessment and proposed monitoring framework in China[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, **121**(7): 839-846.
- [36] Maycock D S, Watts C D. Pharmaceuticals in drinkingwater [A]. In: Nriagu J O (Ed.). *Encyclopedia of Environmental Health*[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2011. 472-484.
- [37] 潘尚霞, 曲亚斌, 余胜兵, 等. 珠三角部分地区生活饮用水中 47 种抗生素检出情况及健康风险评估[J]. *华南预防医学*, 2018, **44**(4): 369-371, 374.
- [38] 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.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)