

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展朝, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙灼兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价

龚润强^{1,2}, 赵华肆², 高占啟³, 胡冠九³, 卜元卿², 张圣虎^{2*}, 邱慧^{1*}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 3. 江苏省环境监测中心, 南京 210036)

摘要: 采用固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法(SPE-UPLC-MS/MS)分析了骆马湖及主要入湖河流表层水体中磺胺类(SAs)、喹诺酮类(QUs)、四环素类(TCs)、大环内酯类(MLs)和青霉素类(PLs)这5类39种抗生素的浓度水平,分析了主要入湖河流的污染贡献率,并评价了抗生素潜在的生态与健康风险.结果表明,42个采样点 ρ (抗生素)范围为30.10~582.37 ng·L⁻¹,共检出4类23种抗生素,其中恩诺沙星(ERX)平均检出浓度最高(88.05 ng·L⁻¹),林可霉素(LIN)检出率最高(100%).骆马湖北部的抗生素平均值高于南部,且两条主要入湖河流中,沂河是骆马湖主要的抗生素污染贡献河流,贡献率为53.91%.风险评价结果表明,ERX具有最大的风险商,对于联合风险商(RQ_{cum}),除了L6、R30、R31、R32、R33和R42这6个点的RQ_{cum}处于0.1~1之间,属于中等风险,其他点位均RQ_{cum}>1,属于高风险;对11种抗生素进行健康风险评价,成人和儿童的健康风险商(RQ_H)处于4.16×10⁻⁶~2.46×10⁻³之间,对人体无健康风险.

关键词: 抗生素; 骆马湖; 入湖河流; 赋存特征; 风险评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1384-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106087

Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers

GONG Run-qiang^{1,2}, ZHAO Hua-si², GAO Zhan-qi³, HU Guan-jiu³, BU Yuan-qing², ZHANG Sheng-hu^{2*}, QIU Hui^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Provincial Key Laboratory for High Technology Research on Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 3. Environment Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: The concentration levels of 39 antibiotics, including sulfonamides (SAs), quinolones (QUs), tetracyclines (TCs), macrolides (MLs), and penicillins (PLs), in the surface water of Luoma Lake, and its main inflow rivers were analyzed using SPE-UPLC-MS/MS. The contribution rates of pollution of major rivers entering the lake were analyzed, and the potential ecological and health risks of antibiotics were assessed. The results showed that ρ (antibiotics) in 42 sampling sites was between 30.10 ng·L⁻¹ and 582.37 ng·L⁻¹, and a total of four classes of 23 antibiotics were detected. Among them, the average detection concentration of enrofloxacin (ERX) was the highest (88.05 ng·L⁻¹), and the detection rate of lincomycin (LIN) was the highest (100%). The average concentration of antibiotics in the northern region of Luoma Lake was higher than that in the south, and among the two main rivers entering the lake, Yihe River was the main river contributing to the pollution of antibiotics in Luoma Lake, with a contribution rate of 53.91%. The results of risk assessment showed that ERX had the largest risk quotient. For the cumulative risk quotient (RQ_{cum}), RQ_{cum} of L6, R30, R31, R32, R33, and R42 was between 0.1 and 1, which is considered medium risk, and RQ_{cum} of other points was >1, which is considered high risk. The health risk assessment of 11 antibiotics showed that the health risk quotient (RQ_H) of adults and children ranged from 4.16×10⁻⁶ to 2.46×10⁻³, and there was no health risk to the human body.

Key words: antibiotics; Luoma Lake; inflow rivers; occurrence characteristic; risk assessment

抗生素是一类常见的天然或合成化合物,不仅用于预防和治疗人畜疾病,并且在畜牧业和水产养殖业中,作为饲料添加剂促进动物的生长^[1,2].有研究表明,抗生素在生物体内并不能完全被代谢分解,约80%以上的抗生素以原药或代谢产物形式随着尿液和粪便排出体外^[3],而且传统的污水处理工艺对抗生素的去除效率有限^[4],导致其在水环境中广泛检出^[5~8].虽然抗生素在水环境中的赋存水平相对较低,一般在ng·L⁻¹~μg·L⁻¹之间,但由于其在较低暴露水平下可对病原菌产生作用,并诱发和散

播各类耐药菌及抗性基因,造成潜在的生态和人体健康风险.

骆马湖位于江苏省北部,作为江苏省四大湖泊之一,是徐州和宿迁两市主要的集中式饮用水水源地,其水质安全至关重要^[9].有研究表明,骆马湖水环境存在抗生素污染^[10,11];本研究团队2016

收稿日期: 2021-06-10; 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 江苏省环保课题项目(2018002)

作者简介: 龚润强(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染物的环境行为与风险评价, E-mail: 897673148@qq.com

* 通信作者, E-mail: zsh@nies.org; hqiu@nuist.edu.cn

年研究了骆马湖表层水体中 17 种抗生素的污染水平,结果表明有 10 种抗生素检出,其中检出浓度最高的抗生素为诺氟沙星^[10]. 尽管有关骆马湖水环境中抗生素污染水平的调查研究已有报道,但主要针对骆马湖进行监测,对于入湖河流的监测研究相对较少. 本研究采集了骆马湖及其主要入湖河流表层水样,通过分析 39 种抗生素的赋存水平、分布特征和潜在风险,能够较为全面地反映抗生素污染状况,以及主要入湖河流(中运河和沂河)对其污染的贡献量,以期为骆马湖抗生素污染防治提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2020 年 4 月在骆马湖湖体及其入湖和出湖河流共设置 42 个采样点位,包括骆马湖湖体 16 个采样点(L1~L16)、主要入湖河流 25 个采样点(R17~R41)和出湖河流 1 个采样点(R42),如图 1 所示. 利用有机玻璃水样采集器采集 1 L 表层水,采集深度控制在水面下 0.5 m,保存于用超纯水润洗 3 次并烘干的棕色玻璃瓶中,低温避光条件下运回实验室,在 4℃ 条件下冷藏保存,样品在 2 d 内完成预处理.

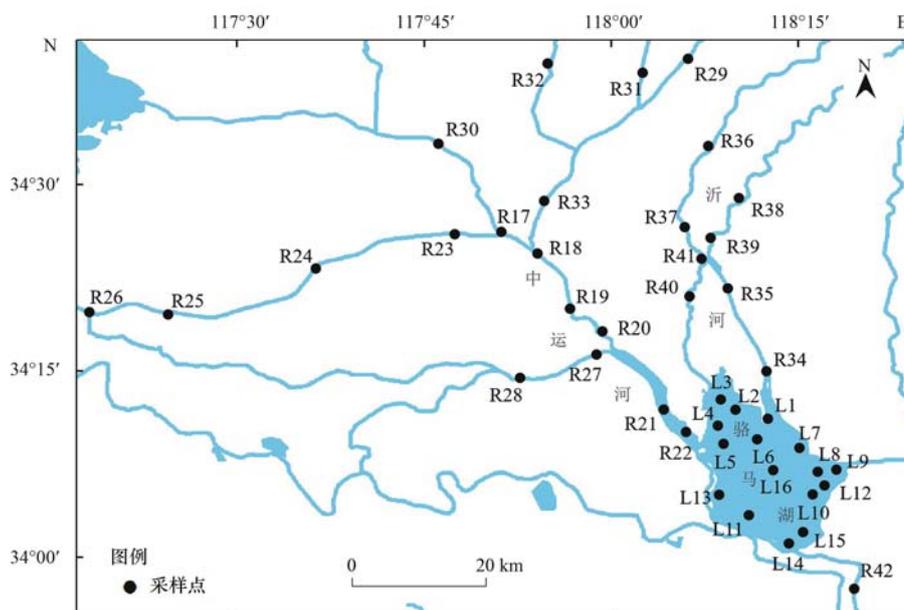


图 1 骆马湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Luoma Lake

1.2 仪器与试剂

仪器: 固相萃取装置(24 孔,美国 Waters 公司); Oasis HLB 小柱(6 mL/200 mg,美国 Waters 公司); 旋转蒸发仪(R-300,瑞士 BUCHI 公司); 超高效液相色谱-串联质谱仪(UPLC-MS/MS, LC 系统为 Agilent 1290 Infinity, MS 系统为 AB SCIEX QTRAP 4500,美国 Agilent 公司).

试剂: 乙腈和甲醇(色谱纯,德国 Merck 公司); 氨水和甲酸(分析纯,国药集团药业股份有限公司); 乙二胺四乙酸二钠(EDTA·2Na)、磷酸和磷酸二氢钠(分析纯,南京化学试剂有限公司); 39 种抗生素标准品包括: 16 种磺胺类(SAs): 乙酰磺胺(sulfacetamide, SA)、磺胺嘧啶(sulfadiazine, SDZ)、磺胺吡啶(sulfonamido, SNM)、磺胺甲噁唑(sulfamethoxazole, SMX)、磺胺甲噁啉(sulfamerazine, SMZ)、磺胺甲二唑(sulfamethizole, SMT)、磺胺二甲嘧啶(sulfamethazine, SM2)、苯甲酰磺胺(sulfabenzamide, SBD)、磺胺对甲氧嘧啶

(sulfamethoxine, SMD)、磺胺邻二甲氧嘧啶(sulfadoxine, SD)、磺胺间甲氧嘧啶(sulfamonomethoxine, SMM)、磺胺间二甲氧嘧啶钠(sulfadimethoxine, SDM)、甲氧苄啉(trimethoprim, TRI)、磺胺噻唑(sulfamethoxypyrimidine, ST)、磺胺二甲异唑(sulfaisoxazole, SOX)和磺胺甲氧哒嗪(sulfamethoxypyridazine, SPD); 9 种喹诺酮类(QUs): 诺氟沙星(norfloxacin, NOR)、环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)、恩诺沙星(enrofloxacin, ERX)、洛美沙星(lomefloxacin, LOM)、依诺沙星(enoxacin, ENX)、氟罗沙星(floxacin, FLX)、培氟沙星(pefloxacin, PFLX)、麻保沙星(marbofloxacin, MBX)和氧氟沙星(ofloxacin, OFX); 5 种四环素类(TCs): 土霉素(oxytetracycline, OXY)、四环素(tetracycline, TCY)、金霉素(chlortetracycline, CTE)、盐酸甲烯土霉素(metacycline, MET)和强力霉素(doxycycline, DOX); 8 种大环内酯类(MLs): 阿奇霉素(azithromycin, AZM)、罗红霉素(roxithromycin,

ROX)、螺旋霉素 (spiramycin, SPI)、克林霉素 (clindamycin, CLI)、克拉霉素 (clarithromycin, CLR)、林可霉素 (lincomycin, LIN)、泰乐菌素 (tylosin, TLS) 和红霉素 (erythromycin, ERY); 1 种青霉素类 (Pen): 青霉素 G (penicillin G, PEN G). 4 种同位素内标为环丙沙星-d8 (CIP-d8)、磺胺甲噁唑-d4 (SMX-d4)、罗红霉素-d7 (ROX-d7) 和四环素-d6 (TCY-d6). 以上抗生素标准品和同位素内标均购自百灵威科技有限公司, 纯度均大于 99.0%.

以甲醇为溶剂, 将 39 种抗生素标准品配制成 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 标准储备液, 然后将标准储备液稀释, 配制 $20\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合标准物质储备液, 在 $-20\ ^\circ\text{C}$ 冰箱中保存待用.

1.3 样品的预处理

参照文献[12], 取 1.0 L 经 $0.45\ \mu\text{m}$ 孔径玻璃纤维滤膜过滤后的水样, 加入 5 mL $100\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA·2Na 溶液, 再用 50% (体积比) 磷酸水溶液调节水样 pH 值至 3.0 左右; 依次向 HLB 小柱内加入 6 mL 甲醇、3 mL 超纯水和 6 mL 磷酸二氢钠水溶液使小柱活化, 调节小柱溶液流速为 $4\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 活化完成后以相同流速富集水样; 抽干水样后向采样瓶中加入 10 mL 超纯水, 抽真空干燥 30 min 后, 依次用 6 mL 甲醇和 6 mL 2% (体积比) 氨水甲醇洗脱, 洗脱流速为 $1\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 洗脱液在 $40\ ^\circ\text{C}$ 下旋转蒸发近干, 用甲醇复溶至 1 mL, 使用 UPLC-MS/MS 分析.

1.4 仪器分析条件

液相色谱条件: 采用规格为 $150\ \text{mm}\times 2.1\ \text{mm}\times 3.5\ \mu\text{m}$ 的 ZORBAX Eclipse Plus C18 色谱柱, 柱温设定为 $30\ ^\circ\text{C}$, 流动相: A 为 0.2% (体积比) 甲酸水溶液, B 为乙腈; 样品进样体积为 $5\ \mu\text{L}$, 流速为 $0.3\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

质谱条件: 采用离子电喷雾正离子 (ESI⁺), 多反应监测 (MRM) 模式; 设定离子源温度为 $550\ ^\circ\text{C}$, 喷雾电压为 5500 V, 气帘气、喷雾气和辅助加热气的压力分别为 35.0、60.0 和 65.0 kPa, 流动相梯度见表 1.

表 1 梯度洗脱步骤

Table 1 Gradient elution step

t/min	流动相 A(体积分数)/%	流动相 B(体积分数)/%
0.0	99	1
5.0	90	10
25.0	50	50
26.0	99	1
30.0	99	1

1.5 质量控制

采用内标法定量分析, 且添加空白对照, 空白回

收和平行样提高质量控制. 以 8 个不同梯度的标准物质溶液作定量曲线, 标准曲线在 $0.1\sim 500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 内线性良好, 除环丙沙星外 (0.904), 其他抗生素的线性相关系数均大于 0.950; 在 100 mL 去离子水中加入 $2\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合标样进行回收实验, 设 3 个平行样, 所得回收率为 41.3%~112.6%, 相对标准偏差 (RSD) 为 0.2%~12.7%, 以信噪比 $S/N\geq 3$ 和 $S/N\geq 10$ 计算出方法的检测限 (LOD) 和定量限 (LOQ) 分别为 $0.001\sim 1.25\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.005\sim 4.17\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.6 风险评价

1.6.1 生态风险评价

风险商 (risk quotient, RQ) 被用来对水体中抗生素的生态风险进行评价^[13], 根据欧洲风险评价技术指导文件 (European commission technical guidance document, TGD) 中风险商法对骆马湖表层水中抗生素的生态风险进行评价^[14], RQ 计算公式为:

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

式中, MEC (measured environmental concentration) 为实际测定浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, PNEC (predicted no effect concentration) 为无效应浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. PNEC 值是慢性毒性数据 (最低观察毒性效应浓度, NOEC, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 或急性毒性数据 (半数致死浓度 LC_{50} 或半数有效浓度 EC_{50}) 与评价因子 (assessment factors, AF) 的比值. 由于同种抗生素对不同物种的毒性效应不同, 本研究选用最敏感物种的 PNEC 值进行评价 (表 2).

水环境中的抗生素不是单一存在的, 有研究表明, 当多种抗生素共存于水体时, 会产生协同作用导致毒性效应加强^[15]. 因此采用联合风险商 (RQ_{cum}) 来表征抗生素对水生生态系统的生态风险, 计算公式为:

$$\text{RQ}_{\text{cum}} = \sum RQ \quad (2)$$

式中, RQ 是单一抗生素的生态风险商.

1.6.2 健康风险评价

为评价骆马湖表层水中抗生素对人体健康的风险, 根据人体对抗生素的日均可接受量 (acceptable daily intake, ADI), 计算抗生素对人体健康的风险商 (RQ_H). 计算公式如下:

$$\text{RQ}_H = \text{MEC}/\text{DWEL} \quad (3)$$

式中, RQ_H 为单一抗生素的健康风险商; MEC 为实测浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; DWEL 为饮用水当量值, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

饮用水当量值计算公式如下:

$$\text{DWEL} = \frac{\text{ADI} \times \text{BW} \times \text{HQ}}{\text{DWI} \times \text{AB} \times \text{FOE}} \quad (4)$$

式中, ADI 为日均可接受摄入量, $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; BW

为人体重量, kg; HQ 为最高风险, 按 1 计算; DWI 为每日饮水量, $L \cdot d^{-1}$; AB 为胃肠吸收率, 按 1 计算; FOE 为暴露频率 ($350 d \cdot a^{-1}$), 按 0.96 计算. 不同年龄段人群 BW 及 DWI 取值见表 3^[29], 抗生素的 ADI 值见表 4.

表 2 抗生素对应最敏感生物毒性数据¹⁾

Table 2 Aquatic toxicity data of antibiotics to the most sensitive aquatic species

抗生素	最敏感生物	毒性	评价因子	毒性数据/ $mg \cdot L^{-1}$	PNEC/ $ng \cdot L^{-1}$	文献
ERX	<i>V. fischeri</i>	慢性	100	NOEC = 2.88×10^{-3}	28.8	[16]
OFX	<i>P. subcapitata</i>	慢性	100	NOEC = 1.13×10^{-3}	11.3	[17]
CIP	<i>D. magna</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 1.30	1.3×10^3	[17]
LIN	<i>P. subcapitata</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 5.0×10^{-2}	50	[18]
ERY	<i>C. vacuolata</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 6.0	6.0×10^3	[19]
AZM	<i>Daphnia</i> sp.	急性	1 000	EC ₅₀ = 12.0	1.2×10^4	[18]
CLI	<i>B. cifloru</i>	急性	100	EC ₅₀ = 24.94	2.494×10^4	[20]
CLR	<i>R. salina</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 16	1.6×10^4	[21]
ROX	<i>P. subcapitata</i>	慢性	1 000	NOEC = 0.01	100	[22]
TLS	<i>M. aeruginosa</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 2.4×10^{-2}	24	[18]
SPI	<i>M. aeruginosa</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 5×10^{-3}	5	[23]
SMX	<i>S. vacuolatus</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 2.70×10^{-2}	27	[24]
SD	<i>V. fischeri</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 2.30	2.3×10^3	[17]
SMM	<i>G. alage</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 8.56	8.56×10^3	[25]
SDZ	<i>S. capricornutum</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 2.20	2.20×10^3	[17]
SOX	<i>G. algae</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 9.0	9.0×10^3	[26]
SA	<i>C. vulgaris</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 13.2	1.32×10^4	[27]
SM2	<i>S. vacuolatus</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 19.52	1.95×10^4	[28]
SNM	<i>L. minor</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 0.46	460	[17]
DOX	<i>L. gibba</i>	急性	1 000	EC ₅₀ = 0.316	316	[22]

1) PFLX、ENX 和 SBD 的 PNEC 值暂缺

表 3 成人及儿童平均体重以及每日饮水量

Table 3 Average body weight and daily water intake for adults and children

研究对象	性别	BW/kg	DWI/ $L \cdot d^{-1}$
儿童	男	24.0	0.81
	女	23.0	0.76
成人	男	66.1	2.48
	女	57.8	2.12

表 4 不同抗生素的 ADI 值

Table 4 ADI of different antibiotics

抗生素种类	ADI/ $\mu g \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	文献
ERX	6.2	[31]
OFX	3.2	[32]
CIP	7.1	[31]
LIN	25	[33]
CLI	30	[33]
ROX	13	[33]
SMX	130	[31]
SDZ	20	[32]
SM2	1.6	[32]
SNM	10	[31]
DOX	3	[31]

2 结果与讨论

2.1 赋存水平

骆马湖、主要入湖和出湖河流中 39 种抗生素

根据 Hernando 等^[30]的研究提出的抗生素对人体健康和生态风险商 (RQ) 的分类标准: 当 $RQ < 0.01$ 时, 无风险; 当 $0.01 \leq RQ < 0.1$ 时, 属于低风险; 当 $0.1 \leq RQ < 1$ 时, 属于中风险; 当 $RQ \geq 1$ 时, 属于高风险.

的浓度水平检测结果如表 5 所示. 结果显示共检出 4 类 23 种抗生素, 检出率高于 90% 的抗生素有 LIN、ERY、SMX、SD、ERX 和 SMM, 其中 LIN 的检出率最高, 达到 100%; 检出浓度最高的抗生素为 ERX, 其次为 SMX、CLI 和 LIN.

喹诺酮类 (QUs) 抗生素共检出 5 种, 分别为 ERX、OFX、PFLX、CIP 和 ENX, 浓度范围为 ND(未检出, 下同) $\sim 423 ng \cdot L^{-1}$, 平均值为 $20.28 ng \cdot L^{-1}$; 相较于其它 3 类抗生素, QUs 抗生素检出浓度较高. 其中, ρ (ERX) 最高, 达 $423 ng \cdot L^{-1}$, 骆马湖中 ERX 的平均值为 $125.52 ng \cdot L^{-1}$, 检出率为 94%, 远高于洞庭湖 (平均值为 $8.09 ng \cdot L^{-1}$)^[5] 和太湖 (平均值为 $3.40 ng \cdot L^{-1}$)^[6]. 由于 ERX 是畜禽专用抗菌药物, 广泛应用于各种动物的感染性疾病的预防和治疗^[34], 尤其是水产养殖, 具有较大的使用量, 在鱼虾的整个成长期均有使用^[35], 这可能是其赋存水平较高的原因之一. 骆马湖中 OFX 的平均值为 $4.45 ng \cdot L^{-1}$, 检出率为 47%, 低于洞庭湖 (平均值为 $63.41 ng \cdot L^{-1}$)^[5] 和洪湖 (平均值为 $36.6 ng \cdot L^{-1}$)^[7] 而高于太湖 (平均值为 $4.2 ng \cdot L^{-1}$)^[6]; 出入湖河流中 OFX 的平均值为 $5.21 ng \cdot L^{-1}$, 检出率为 36%, 低于渭河 (平均值为 $17.08 ng \cdot L^{-1}$)^[8] 而

表 5 抗生素检测浓度与检出率

Table 5 Antibiotic concentration and detection rate

种类	抗生素名称	骆马湖				出入湖河流				总检出率 /%
		浓度范围 /ng·L ⁻¹	平均值 /ng·L ⁻¹	中位值 /ng·L ⁻¹	检出率 /%	浓度范围 /ng·L ⁻¹	平均值 /ng·L ⁻¹	中位值 /ng·L ⁻¹	检出率 /%	
QUs (喹诺酮类)	ERX	ND ~ 423.00	125.52	81.14	94.12	ND ~ 247.00	62.56	30.38	92.00	92.86
	OFX	ND ~ 13.30	4.45	ND	47.06	ND ~ 63.28	5.21	ND	36.00	40.48
	PFLX	ND ~ 19.20	4.87	ND	35.29	ND ~ 14.40	2.42	ND	20.00	26.19
	CIP	ND ~ 39.64	8.48	ND	23.53	ND ~ 29.84	2.30	ND	8.00	14.29
	ENX	ND ~ 9.39	0.55	ND	5.88	ND	ND	ND	ND	2.38
MLs (大环内酯类)	LIN	2.39 ~ 12.44	5.37	3.83	100	2.08 ~ 92.36	11.17	6.12	100	100
	ERY	1.40 ~ 20.56	4.68	3.64	100	ND ~ 20.58	4.98	3.38	96.00	97.62
	AZM	ND ~ 9.55	6.61	7.84	82.35	ND ~ 21.42	3.8	ND	40.00	57.14
	CLI	ND ~ 12.18	3.36	2.82	58.82	ND ~ 223.60	14.01	3.63	52.00	54.76
	CLR	ND ~ 4.28	1.35	ND	41.18	ND ~ 34.14	3.41	2.41	56.00	50.00
	ROX	ND ~ 8.07	2.53	ND	35.29	ND ~ 9.19	0.94	ND	12.00	21.43
	TLS	ND ~ 5.70	0.75	ND	17.65	ND ~ 4.16	0.48	ND	16.00	16.67
	SPI	ND	ND	ND	ND	ND ~ 2.62	0.1	ND	4.00	2.38
SAs (磺胺类)	SMX	2.95 ~ 20.24	10.01	8.75	100	ND ~ 94.02	16.19	11.44	96.00	97.62
	SD	0.66 ~ 2.66	1.61	1.58	100	ND ~ 4.36	1.94	1.83	92.00	95.24
	SMM	ND ~ 1.61	0.88	0.85	88.24	ND ~ 3.69	1.71	1.78	96.00	92.86
	SDZ	ND ~ 87.26	5.74	ND	47.06	ND ~ 9.44	2.29	1.44	64.00	57.14
	SOX	ND ~ 11.05	1.52	ND	35.29	ND ~ 16.92	1.53	ND	36.00	35.71
	SA	ND ~ 3.15	0.32	ND	11.76	ND ~ 4.29	0.17	ND	4.00	7.14
	SNM	ND	ND	ND	ND	ND ~ 33.66	1.47	ND	8.00	7.14
	SM2	ND	ND	ND	ND	ND ~ 0.21	0.01	ND	8.00	4.76
	SBD	ND	ND	ND	ND	ND ~ 1.40	0.06	ND	4.00	2.38
TCs(四环素类)	DOX	ND	ND	ND	ND	ND ~ 34.68	1.33	ND	4.00	2.38

高于克什普拉河(平均值为 $0.99 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[36]。由于 OFX 主要用于人类疾病治疗,医疗用量较大^[37];此外,天然水体中的 OFX 对水解不敏感,同时光解速率又受水中杂质、pH 以及光敏剂等因素影响,降解速率缓慢^[38,39],这也可能是导致 OFX 在水环境中检出的原因之一。PFLX 和 CIP 的检出率相对较低,根据文献[40],自 2015 年 12 月 31 日起,停止生产用于食品动物的 PFLX,以及我国农业部明令禁止 CIP 在饲料动物和水生食品中的使用^[41],可能是其检出率较低的原因。

8 种大环内酯类 (MLs) 抗生素全部检出,浓度范围为 $\text{ND} \sim 223.60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其中骆马湖中的平均值为 $3.29 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于洞庭湖(平均值为 $15.75 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[5];出入湖河流中的平均值为 $4.67 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于渭河(平均值为 $17.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[42],整体浓度相对较低,这可能与其在地表水中低持久性和高生物降解性有关^[35,43,44]。

磺胺类 (SAs) 抗生素共检出 9 种,浓度范围为 $\text{ND} \sim 94.02 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,骆马湖中的平均值为 $2.16 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于太湖(平均值为 $2.51 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[6]而高于南四湖(平均值为 $1.78 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)和东平湖(平均值为 $1.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[45];出入湖河流中的平均值为 $2.84 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于渭河(平均值为 17.89

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[42]而高于赤水河(平均值为 $2.39 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[46]。由于 SAs 抗生素具有广谱性、价格低廉和疗效强等优点,在水产养殖业中广泛使用^[47],且相对于瑞士、英国和丹麦等西方国家,我国 SAs 抗生素的使用量较大^[35]。此外,SAs 抗生素的水溶性较好,不容易发生吸附或降解反应^[48,49],这可能是其赋存较为普遍的原因。其中,总平均 ρ (SMX)最高,骆马湖中的平均值为 $10.01 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于大通湖(平均值为 $12.34 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[35]而高于太湖(平均值为 $4.80 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[6],而出入湖河流中的平均值为 $16.19 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于辽河(平均值为 $20.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[50]而高于克什普拉河(平均值为 $2.75 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[36];其次是 SDZ,平均值为 $3.69 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SMX 和 SMM 在水中的检出率较高,分别达到 97.62% 和 92.86%。Li 等^[51]的研究发现,SMX 和 SMM 是我国天然水体中最常见的两种 SAs 抗生素,其中 SMX 不仅具有良好的化学稳定性,不易被降解,而且环境迁移能力强,能在水环境中长期存在^[5,12,52],另外,有研究发现 SMX 及其转化产物会降低水环境中微生物群落的丰度,从而不利于其通过微生物降解^[53]。

四环素类 (TCs) 抗生素仅有 DOX 在入湖河流中被检出,浓度范围为 $\text{ND} \sim 34.68 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值

为 $1.33 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于松花江 (平均值为 $4.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[54] 和长江南京段 (平均值为 $35.68 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[55]. 这是由于 TCs 抗生素是酸碱两性化合物, 在酸性或碱性环境中均不稳定^[56,57], 另外, 有研究发现^[58,59], TCs 抗生素具有很高的吸附性, 尤其在酸性条件下, 更容易被颗粒物吸附, 这可能导致 TCs 抗生素检出率较低.

2.2 分布特征

环境中抗生素的浓度及空间分布特征与其消耗量、使用率和环境因子等多因素相关^[60]. 由图 2 可知, 骆马湖 ρ (抗生素) 范围为 $45.44 \sim 532.52 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 中运河 ρ (抗生素) 范围为 $30.10 \sim 362.35 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 沂河 ρ (抗生素) 范围为 $66.40 \sim 582.37 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 具有一定的空间差异性; 整体而言, 4 类抗生素检出浓度和检出占比依次为: $\text{QUs} > \text{MLs} > \text{SAs} > \text{TCs}$. 其中, 骆马湖中 ρ (抗生素) 整体呈现出北部高于南部, 这表明北部入湖河流是其主要的污染来源. 申霞等^[61]的研究报道了骆马湖抗生素的潜在来源, 分析发现污染主要来源于沂河和中运河等入湖河流接纳的生活污水和工业废水, 这与本研究的检测结果一致. 中运河 ρ (抗生素) 整体上呈现出干流高于支流, 这可能归因于众多支流地汇入, 同时干流附近有工业园区又靠近邳州站, 人口密集, 排入中运河干流的工业和生活废水也是其

抗生素的重要来源. 沂河中点位 R39 的 ρ (抗生素) 最高, 其次为点位 R34 和 R35, 其余点位 ρ (抗生素) 相对较低. 点位 R34 和 R35 附近存在农业产业园, 且靠近骆马湖北岸, 而北岸存在大量农田和畜禽养殖, 这可能导致其 ρ (抗生素) 较高. 此外, 两条入湖河流中, ρ (抗生素) 最高值出现在沂河, 为 $582.37 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 且沂河抗生素平均值为 $18.98 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 日均流量为 $40 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ^[62], 中运河抗生素平均值为 $12.02 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 日均流量为 $54 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ^[62], 表明沂河是骆马湖主要的抗生素污染物贡献河流, 贡献率为 53.91%.

采样点位 R39 的 ρ (抗生素) 最高, CLI、SMX 和 LIN 是主要的污染物, 贡献率在 70% 以上, CLI 和 LIN 主要用于人类疾病治疗, 点位 R39 附近存在着大量的学校和门诊, 人口较密集, 药物使用量较多, 导致了这两种抗生素的检出浓度较高. 其次是点位 L3, ERX 是主要的污染物, 贡献率接近 80%, 点位 L3 位于骆马湖北部围塘区域, 同时又受到沂河来水影响, 这可能导致了其 ρ (抗生素) 较高. R30 点位 ρ (抗生素) 最低, 可能是因为该点位在湿地风景区附近, 远离人口密集区和水产养殖区. 另外, 出湖河流点位 R42 的 ρ (抗生素) 处于相对较低水平, 这可能与抗生素在水中迁移过程发生了光解、吸附和微生物降解等行为有关.

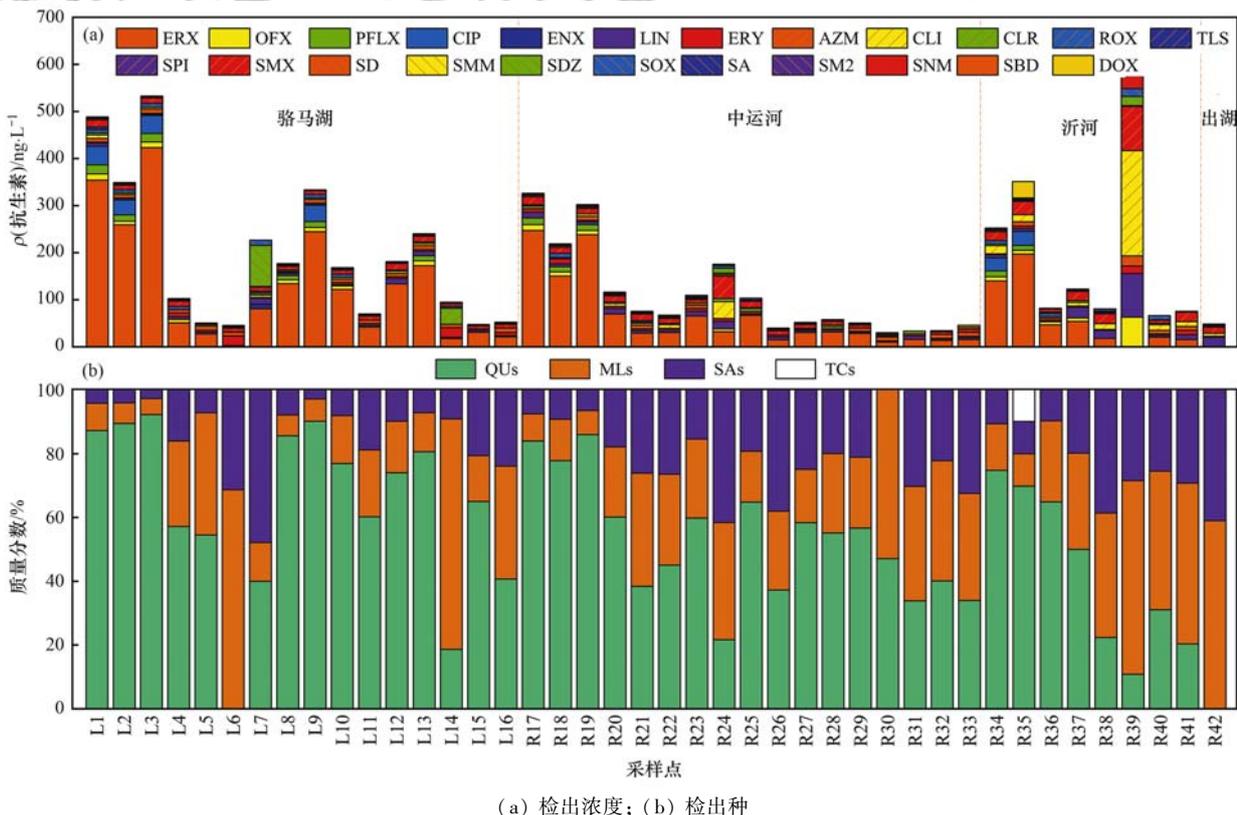


图 2 骆马湖及出入湖河流表层水中抗生素检出浓度和检出种类

Fig. 2 Detection concentration and species of antibiotics in surface water of Luoma Lake and rivers in and out of the lake

骆马湖与入湖河流中抗生素的组成成分存在差异. 其中, 骆马湖中检出 3 类 18 种抗生素, 分别为 5 种 QUs、7 种 MLs 和 6 种 SAs, 以 $\rho(\text{ERX})$ 最高, 其次为: $\text{SDZ} > \text{CIP} > \text{CLR} > \text{ERY}$; 入湖河流中检出 4 类 22 种抗生素, 分别为 4 种 QUs、8 种 MLs、9 种 SAs 和 1 种 TCs, 同样以 $\rho(\text{ERX})$ 最高, 其次为: $\text{CLI} > \text{SMX} > \text{LIN} > \text{OFX}$, 这表明骆马湖中 ERX 主要来源于入湖河流. 此外, 本研究发现有 5 种抗生素, 在入湖河流中有检出, 但在骆马湖中未检出, 分别为 SPI(平均值: $0.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率: 4%)、SNM(平均值: $1.47 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率: 8%)、SBD(平均值: $0.60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率: 4%)、SM2(平均值: $0.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率: 8%) 和 DOX ($1.39 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率: 4%), 以上抗生素的平均值和检出率都很低, 一方面其使用率相对较低, 另一方面进入湖体后经过稀释、吸附和降解等导致其浓度降低.

2.3 风险评价

2.3.1 生态风险评价

基于风险商对 20 种抗生素的单一毒性和联合毒性进行生态风险评价(图 3). 对于抗生素的单一毒性, 7 种抗生素(ERX、OFX、SMX、LIN、SPI、TLS 和 DOX)的 $\text{RQ} > 0.1$, 其余 13 种抗生素的 RQ 均处于 0.1 以下, 属于低风险或无风险水平. 其中, ERX、OFX、SMX 和 LIN 的 RQ_{max} 均大于 1, 属于高风险, 而且 ERX 的 RQ_{max} 高达 14.7, 对骆马湖的水生态环境具有较高的潜在风险. 对于联合毒性, 6 个点位(L6、R30、R31、R32、R33 和 R42)的 RQ_{cum} 处于 0.1~1 之间, 属于中等风险, 其他点位的 RQ_{cum} 均 > 1 , 属于高风险. 此外, 抗生素的 RQ_{cum} 平均值依次为: 骆马湖中 (5.5) $>$ 沂河 (4.7) $>$ 中运河 (3.0) $>$ 出湖河流 (0.9), 由此也表明, 沂河中抗生素污染较中运河严重, 是骆马湖抗生素污染的主要入湖河流.

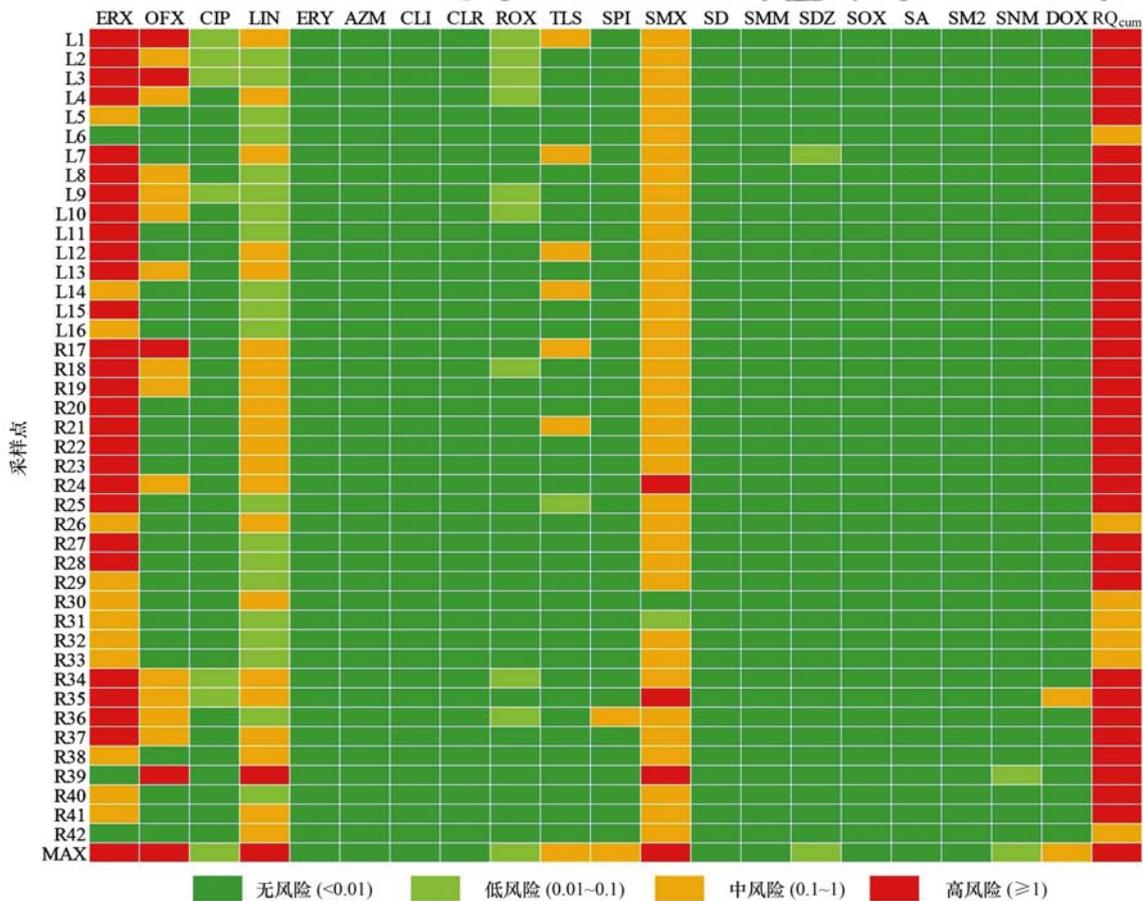


图 3 骆马湖及出入湖河流各采样点抗生素的 RQ 和 RQ_{cum}

Fig. 3 RQ and RQ_{cum} of antibiotics in Luoma Lake and rivers in and out of the lake

2.3.2 健康风险评价

为了更好地评价骆马湖表层水中抗生素对人体的健康风险水平, 选取了 13 种抗生素最大检出浓度作为评价浓度. 由图 4 可知, 通过饮水途径, 成人和儿童的 RQ_H 分别处于 $4.62 \times 10^{-6} \sim 2.46 \times 10^{-3}$ 和

$4.16 \times 10^{-6} \sim 2.21 \times 10^{-3}$ 之间, 均小于 0.01, 表明骆马湖流域水体中抗生素对人体健康无风险. ERX 的 RQ_H 最高, 处于 10^{-3} 数量级, 是主要的潜在健康风险因素; SM2 的 RQ_H 最低, 处于 10^{-6} 数量级, 与其较高的 ADI 值和较低检出浓度相关, 其余抗生素的

RQ_H 处于 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 数量级. RQ_H 整体呈现出成人高于儿童, 同一年龄段中男性高于女性. 骆马湖水体中抗生素对人体无健康风险, 与大通湖^[35]、南四湖和东平湖^[45]一致. 但有研究表明, 在儿童和孕妇的尿液中检出了抗生素^[63, 64], 且通过食物或饮用水摄入的抗生素, 是造成儿童肥胖风险因素之一^[65]. 因此水体中抗生素虽然是痕量残留, 但其长期潜在风险仍然不可忽视.

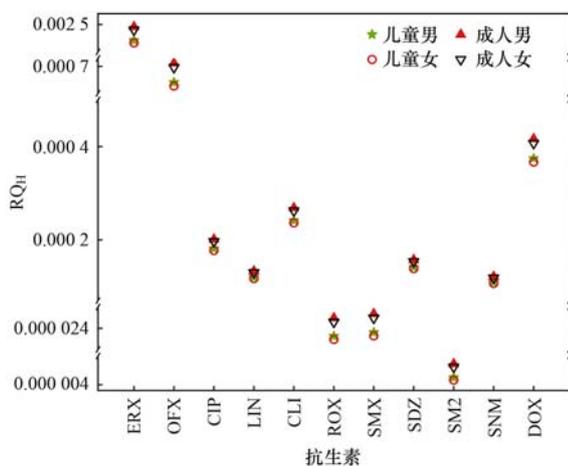


图4 骆马湖及出入湖河流抗生素残留对成人和儿童的健康风险商 (RQ_H)

Fig. 4 RQ_H of antibiotic residues in Luoma Lake and its rivers to adults and children

3 结论

(1) 骆马湖及出入湖河流中共检出 4 类 23 种抗生素, 浓度平均值最高的是 ERX ($88.05 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 其次是 SMX ($13.69 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、CLI ($9.70 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 LIN ($8.82 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 其余抗生素的浓度平均值相对较低. 检出率最高的是 LIN (100%), 其次 ERY (97.62%)、SMX (97.62%)、SD (95.24%)、ERY (92.86%) 和 SMM (92.86%).

(2) 骆马湖及出入湖河流各采样点 ρ (抗生素) 范围为 $30.10 \sim 582.37 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 骆马湖北部高于南部, 沂河高于中运河, 且沂河对骆马湖的贡献率较大, 贡献率为 53.91%.

(3) 对 20 种抗生素进行生态风险评价, 其中 ERX、OFX、SMX 和 LIN 的 RQ_{\max} 均大于 1, 属于高风险, SPI、TLS 和 DOX 的 RQ 在 0.1 ~ 1 之间, 属于中风险, 其余 13 种抗生素的 RQ 均处于 0.1 以下, 属于低风险或无风险水平. 对于联合风险, 除了 L6、R30、R31、R32、R33 和 R42 这 6 个点的 RQ_{cum} 处于 0.1 ~ 1 之间, 属于中等风险, 其他点位的 RQ_{cum} 均 > 1, 属于高风险. 成人和儿童的 RQ_H 分别处于 $4.62 \times 10^{-6} \sim 2.46 \times 10^{-3}$ 和 $4.16 \times 10^{-6} \sim 2.21 \times 10^{-3}$ 之间, 均小于 0.01, 对人体无健康风险.

参考文献:

- [1] 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 等. 北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5074-5080.
- [2] Chen W P, Peng C W, Yang Y, *et al.* Distribution characteristics and risk analysis of antibiotic in the groundwater in Beijing[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5074-5080.
- [3] Chen Y H, Chen H J, Zhang L, *et al.* Occurrence, distribution, and risk assessment of antibiotics in a subtropical river-reservoir system[J]. Water, 2018, 10(2), doi: 10.3390/w10020104.
- [4] Zhang G D, Liu X H, Lu S Y, *et al.* Occurrence of typical antibiotics in Nansi Lake's inflowing rivers and antibiotic source contribution to Nansi Lake based on principal component analysis-multiple linear regression model [J]. Chemosphere, 2020, 242, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125269.
- [5] Aydin S, Aydin M E, Ulvi A, *et al.* Antibiotics in hospital effluents; occurrence, contribution to urban wastewater, removal in a wastewater treatment plant, and environmental risk assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(1): 544-558.
- [6] 宋冉冉, 国晓春, 卢少勇, 等. 东洞庭湖表层水体中抗生素及抗性基因的赋存特征与源分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9): 2143-2153.
- [7] Song R R, Guo X C, Lu S Y, *et al.* Occurrence and source analysis of antibiotics and antibiotic resistance genes in surface water of the East Dongting Lake Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(9): 2143-2153.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Wang Z, Du Y, Yang C, *et al.* Occurrence and ecological hazard assessment of selected antibiotics in the surface waters in and around Lake Honghu, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1423-1432.
- [11] Wang J W, Wei H, Zhou X D, *et al.* Occurrence and risk assessment of antibiotics in the Xi'an section of the Weihe River, Northwestern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 794-800.
- [12] 张柳青, 彭凯, 周蕾, 等. 南水北调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3018-3029.
- [13] Zhang L Q, Peng K, Zhou L, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in key lakes in the middle reaches of the east route of the South-North Water Diversion Project [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3018-3029.
- [14] 张芹, 张圣虎, 汪贞, 等. 骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 162-169.
- [15] Zhang Q, Zhang S H, Wang Z, *et al.* Pollution level, distribution characteristics and risk assessment of 32 PPCPs in surface water of Luomahu Lake [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 162-169.
- [16] 陈宇, 王涌涛, 黄天寅, 等. 骆马湖水体中药品及个人护理品的污染特征及风险评估[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 902-909.
- [17] Chen Y, Wang Y T, Huang T Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products

- (PPCPs) in Luoma Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(4): 902-909.
- [12] 封梦娟, 杨正标, 张芹, 等. 高效液相色谱-串联质谱法同时测定表层水体中5类40种抗生素[J]. 色谱, 2019, **37**(5): 525-532.
Feng M J, Yang Z B, Zhang Q, *et al.* Simultaneous determination of five types of 40 antibiotics in surface water using high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2019, **37**(5): 525-532.
- [13] Verlicchi P, Al Aukidy M, Galletti A, *et al.* Hospital effluent: investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2012, **430**: 109-118.
- [14] Papageorgiou M, Zioris I, Danis T, *et al.* Comprehensive investigation of a wide range of pharmaceuticals and personal care products in urban and hospital wastewaters in Greece [J]. Science of the Total Environment, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.371.
- [15] Cleuvers M. Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects[J]. Toxicology Letters, 2003, **142**(3): 185-194.
- [16] Kim J, Park J, Kim P G, *et al.* Implication of global environmental changes on chemical toxicity-effect of water temperature, pH, and ultraviolet B irradiation on acute toxicity of several pharmaceuticals in *Daphnia magna* [J]. Ecotoxicology, 2010, **19**(4): 662-669.
- [17] 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.
- [18] Xue B M, Zhang R J, Wang Y H, *et al.* Antibiotic contamination in a typical developing city in south China: occurrence and ecological risks in the Yongjiang River impacted by tributary discharge and anthropogenic activities [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **92**: 229-236.
- [19] 丁惠君, 钟家有, 吴亦潇, 等. 鄱阳湖流域南昌市城市湖泊水体抗生素污染特征及生态风险分析[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 848-858.
Ding H J, Zhong J Y, Wu Y X, *et al.* Characteristics and ecological risk assessment of antibiotics in five city lakes in Nanchang City, Lake Poyang Catchment [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(4): 848-858.
- [20] 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.
- [21] Lützhøft H C H, 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.
- [22] Białk-Bielińska A, Stolte S, Arning J, *et al.* Ecotoxicity evaluation of selected sulfonamides[J]. Chemosphere, 2011, **85**(6): 928-933.
- [23] Halling-Sørensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming[J]. Chemosphere, 2000, **40**(7): 731-739.
- [24] Hossain A, Nakamichi S, Habibullah-Al-Mamun, *et al.* Occurrence and ecological risk of pharmaceuticals in river surface water of Bangladesh [J]. Environmental Research, 2018, **165**: 258-266.
- [25] Turkdogan F I, Yetilmezsoy K. Appraisal of potential environmental risks associated with human antibiotic consumption in Turkey [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(1): 297-308.
- [26] Carvalho I T, Santos L. Antibiotics in the aquatic environments: a review of the European scenario [J]. Environment International, 2016, **94**: 736-757.
- [27] Baran W, Sochacka J, Wardas W. Toxicity and biodegradability of sulfonamides and products of their photocatalytic degradation in aqueous solutions [J]. Chemosphere, 2006, **65**(8): 1295-1299.
- [28] 彭聪, 巴俊杰, 胡芬, 等. 广西会仙岩溶湿地典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(7): 2207-2217.
Peng C, Ba J J, Hu F, *et al.* Typical antibiotic pollution characteristics and ecological risk assessment of Huixian Karst wetland in Guangxi, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(7): 2207-2217.
- [29] Shi W, Zhang F X, Zhang X W, *et al.* Identification of trace organic pollutants in freshwater sources in Eastern China and estimation of their associated human health risks [J]. Ecotoxicology, 2011, **20**(5): 1099-1106.
- [30] Hernando M D, Mezcuca M, Fernández-Alba A R, *et al.* Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments [J]. Talanta, 2006, **69**(2): 334-342.
- [31] Hanna N, Sun P, Sun Q, *et al.* Presence of antibiotic residues in various environmental compartments of Shandong province in eastern China: its potential for resistance development and ecological and human risk [J]. Environment International, 2018, **114**: 131-142.
- [32] Wang H X, Yang J Q, Yu X, *et al.* Exposure of adults to antibiotics in a Shanghai suburban area and health risk assessment: a biomonitoring-based study [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(23): 13942-13950.
- [33] Schwab B W, Hayes E P, Fiori J M, *et al.* Human pharmaceuticals in US surface waters: a human health risk assessment [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2005, **42**(3): 296-312.
- [34] 刘开永, 汪开毓. 恩诺沙星在水产中的应用与研究 [J]. 中国兽药杂志, 2004, **38**(10): 32-34.
Liu K Y, Wang K Y. Study and practice on Enrofloxacin in fishery [J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2004, **38**(10): 32-34.
- [35] 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.
- [36] Diwan V, Hanna N, Purohit M, *et al.* Seasonal variations in water-quality, antibiotic residues, resistant bacteria and antibiotic resistance genes of *Escherichia coli* isolates from water and sediments of the Kshipra River in Central India [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(6), doi: 10.3390/ijerph15061281.
- [37] 李士俊, 谢文明. 污水处理厂中抗生素去除规律研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(3): 17-29.
Li S J, Xie W M. Research advances in antibiotics removal in wastewater treatment plants: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(3): 17-29.
- [38] Van Doorslaer X, Dewulf J, Van Langenhove H, *et al.* Fluoroquinolone antibiotics: an emerging class of environmental micropollutants [J]. Science of the Total Environment, 2014, **500-501**: 250-269.
- [39] 张亚茹, 张国栋, 王永强, 等. 新疆赛里木湖近岸表层水典型抗生素的赋存与风险评价 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(2):

- 483-493.
Zhang Y R, Zhang G D, Wang Y Q, *et al.* Occurrence and ecological risk of typical antibiotics in surface water of the Lake Sayram, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 483-493.
- [40] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告第 2292 号[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/jiuqi/201712/t20171219_6103873.htm, 2015-09-01.
- [41] 包樱钰, 李菲菲, 温东辉. 我国海水养殖业的抗生素污染现状[J]. *海洋环境科学*, 2021, **40**(2): 294-302.
Bao Y Y, Li F F, Wen D H. Antibiotic contamination in mariculture in China[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, **40**(2): 294-302.
- [42] 魏红, 王嘉玮, 杨小雨, 等. 渭河关中段表层水中抗生素污染特征与风险[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2255-2262.
Wei H, Wang J W, Yang X Y, *et al.* Contamination characteristic and ecological risk of antibiotics in surface water of the Weihe Guanzhong section[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2255-2262.
- [43] Vione D, Feitosa-Felizzola J, Minero C, *et al.* Phototransformation of selected human-used macrolides in surface water: kinetics, model predictions and degradation pathways[J]. *Water Research*, 2009, **43**(7): 1959-1967.
- [44] 常海莎. 大环内酯类抗生素在水体中的光降解及毒性变化研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018. 12-19.
- [45] 张慧, 郭文建, 刘绍丽, 等. 南四湖和东平湖表层水体中抗生素污染特征和风险评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(12): 3279-3287.
Zhang H, Guo W J, Liu S L, *et al.* Contamination characteristics and risk assessment of antibiotics in surface water of Nansi Lake and Dongping Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(12): 3279-3287.
- [46] 吴天宇, 李江, 杨爱江, 等. 赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 210-219.
Wu T Y, Li J, Yang A J, *et al.* Characteristics and risk assessment of antibiotic contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 210-219.
- [47] Xiong W G, Sun Y X, Zhang T, *et al.* Antibiotics, antibiotic resistance genes, and bacterial community composition in fresh water aquaculture environment in China[J]. *Microbial Ecology*, 2015, **70**(2): 425-432.
- [48] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [49] Xie Z X, Lu G H, Yan Z H, *et al.* Bioaccumulation and trophic transfer of pharmaceuticals in food webs from a large freshwater lake[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 356-366.
- [50] Dong D M, Zhang L W, Liu S, *et al.* Antibiotics in water and sediments from Liao River in Jilin Province, China: occurrence, distribution, and risk assessment [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(16), doi: 10.1007/s12665-016-6008-4.
- [51] Li S, Shi W Z, Liu W, *et al.* A duodecennial national synthesis of antibiotics in China's major rivers and seas (2005-2016)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **615**: 906-917.
- [52] Li L, Liu D, Zhang Q, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of selected antibiotics in the freshwater lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River Basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **249**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109396.
- [53] Grenni P, Patrolecco L, Raueo J, *et al.* Sulfamethoxazole persistence in a river water ecosystem and its effects on the natural microbial community and *Lemna minor* plant [J]. *Microchemical Journal*, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.microc.2019.103999.
- [54] He S N, Dong D M, Zhang X, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of 22 emerging contaminants in the Jilin Songhua River (Northeast China) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(24): 24003-24012.
- [55] 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.
- [56] 陈亚君. 四环素类抗生素在微塑料和土壤中的吸附行为及其机理研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020. 3-4.
- [57] 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.
- [58] Sassman S A, Lee L S. Sorption of three tetracyclines by several soils: assessing the role of pH and cation exchange [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(19): 7452-7459.
- [59] 张晶晶, 陈娟, 王沛芳, 等. 中国典型湖泊四大类抗生素污染特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(9): 4271-4283.
Zhang J J, Chen J, Wang P F, *et al.* Pollution characteristics of four-type antibiotics in typical lakes in China [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 4271-4283.
- [60] Liu X, Steele J C, Meng X Z. Usage, residue, and human health risk of antibiotics in Chinese aquaculture: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 161-169.
- [61] 申霞, 洪大林, 谈永锋, 等. 骆马湖生态环境现状及其保护措施[J]. *水资源保护*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
Shen X, Hong D L, Tan Y F, *et al.* Ecological environment of Luoma Lake and protection measures [J]. *Water Resources Protection*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
- [62] 江苏水情水位查询系统[EB/OL]. <http://221.226.28.67:88/jsswxSSI/Web/Default.html?m=2>, 2020-04-25.
- [63] Wang H X, Wang N, Qian J H, *et al.* Urinary antibiotics of pregnant women in Eastern China and cumulative health risk assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(6): 3518-3525.
- [64] Zhou Y J, Zhu F, Zheng D Y, *et al.* Detection of antibiotics in the urine of children and pregnant women in Jiangsu, China[J]. *Environmental Research*, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.envres.2021.110945.
- [65] Wang H X, Wang N, Wang B, *et al.* Antibiotics detected in urines and adipogenesis in school children [J]. *Environment International*, 2016, **89-90**: 204-211.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i>	(1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i>	(1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i>	(1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i>	(1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i>	(1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i>	(1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i>	(1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i>	(1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min	(1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i>	(1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i>	(1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i>	(1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i>	(1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i>	(1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an	(1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i>	(1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i>	(1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i>	(1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo	(1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i>	(1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i>	(1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i>	(1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i>	(1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i>	(1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i>	(1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i>	(1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i>	(1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i>	(1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i>	(1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i>	(1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polthioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua	(1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i>	(1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i>	(1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i>	(1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i>	(1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i>	(1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i>	(1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i>	(1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i>	(1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i>	(1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i>	(1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i>	(1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i>	(1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i>	(1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i>	(1688)