

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价

丁剑楠¹, 刘舒娇¹, 邹杰明¹, 石浚哲², 邹华^{1*}, 史红星^{3*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省无锡环境监测中心, 无锡 214000; 3. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

摘要: 采用固相萃取-高效液相色谱串联质谱法对太湖表层水体 4 类抗生素(磺胺类、喹诺酮类、四环素类和大环内酯类)进行为期 1 a 的逐月监测,并评估其潜在生态风险. 全年 18 种抗生素在太湖水体中均有不同程度检出,磺胺甲噁唑、磺胺噻唑、磺胺甲噁啉、磺胺间甲氧嘧啶和甲氧苄氨嘧啶等 5 种磺胺类抗生素的检出率均高于 50%; 喹诺酮类抗生素检出浓度较高,其中,环丙沙星的平均浓度和中位浓度分别为 13.0 ng·L⁻¹ 和 13.5 ng·L⁻¹. 太湖抗生素污染具有明显的月际差异,月平均浓度范围 7.3 ~ 33.5 ng·L⁻¹, 6 ~ 10 月抗生素浓度水平较低, 2 ~ 5 月和 11 月检出浓度较高. 太湖水体抗生素在 20 个监测点位的空间差异小,平均浓度范围 13.0 ~ 41.3 ng·L⁻¹. 全年太湖抗生素对藻类的中高风险比例达 57.5%,其中 4 月和 11 月的生态风险较严重,喹诺酮类抗生素可能是主要风险因子,应引起管理部门足够重视.

关键词: 太湖; 表层水体; 抗生素; 时空分布; 生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1811-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009082

Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake

DING Jian-nan¹, LIU Shu-jiao¹, ZOU Jie-ming¹, SHI Jun-zhe², ZOU Hua^{1*}, SHI Hong-xing^{3*}

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Environmental Monitoring Center, Wuxi 214000, China; 3. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

Abstract: Using solid phase extraction-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, antibiotics belonging to four classes (i.e. sulfonamides, quinolones, tetracycline, and macrolides) in the surface water of Taihu Lake were monitored monthly for a year. Moreover, the potential ecological risks of antibiotics in Taihu Lake were assessed. During the one-year monitoring, all the eighteen target antibiotics were detected to some extent in the surface water. The detection rates of five sulfonamides (sulfamethoxazole, sulfathiazole, sulfadiazine, sulfadimethazine, and trimethoprim) were higher than 50%. The concentrations of quinolones in the surface water were relatively higher. The average and medium concentrations of ciprofloxacin were 13.0 ng·L⁻¹ and 13.5 ng·L⁻¹, respectively. There were significant differences in the antibiotic pollution during the different months, with the average concentrations of the target antibiotics ranging from 7.3 to 33.5 ng·L⁻¹. The concentration levels were lower from June to October, while higher concentrations were observed from February to May and in November. In the surface water of Taihu Lake, the spatial variations of antibiotics among the 20 sampling sites were not significant, with the average concentrations ranging from 13.0 to 14.3 ng·L⁻¹. During the one-year monitoring, the rates of medium and high risks that the antibiotics posed to algae reached 57.5%. The ecological risks of antibiotics were more severe in April and November, and the quinolones may be the dominant risk factor. This issue should be carefully considered by management authorities.

Key words: Taihu Lake; surface water; antibiotic; spatiotemporal distribution; ecological risk

抗生素是一类常见的天然或合成化合物,用于人类和畜禽水产疾病的防治. 由于大量生产使用,且传统污水处理工艺对抗生素的去除效率有限,导致水环境中抗生素广泛赋存^[1-3]. 作为新型有机污染物,抗生素在水环境中的赋存水平为 ng·L⁻¹ 到几 μg·L⁻¹^[1,2]. 虽然赋存水平较低,但由于特殊的药理功能和生物累积能力,抗生素的长期赋存可能会对非靶向水生生物产生负面效应,并造成潜在的生态和人体健康风险^[3,4].

太湖位于长江三角洲腹地,是华东地区最大的浅水型淡水湖泊,为周边地区的经济社会发展起到了重要的支撑作用. 高度的城市化和工业化导致太湖周边地区新型有机污染物生产排放量较高. 现有

研究已表明,太湖流域河网存在广泛的抗生素污染^[5,6]; 本研究团队先前在太湖贡湖湾表层水体中也已检出了 13 种抗生素的赋存^[7]. Nkoom 等^[8] 总结已有研究,指出太湖水环境中的抗生素污染种类以磺胺类、喹诺酮类、大环内酯类和四环素类为主. 尽管有关太湖抗生素污染现状的调查研究已有报

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51809118); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20170188); 中国博士后科学基金项目(2019M651704); 国民核生化灾害防护国家重点实验室基金项目(SKLNBC2018-22); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX20_1951)

作者简介: 丁剑楠(1988~),男,博士,副研究员,主要研究方向为新型污染物的环境行为和生态毒理研究, E-mail: djn@jiangnan.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zouhua@jiangnan.edu.cn; shihongxing18@163.com

道,但大部分研究仅针对某水域进行了单次监测.在实际水环境中,由于时空间差异,水文水质和气候等环境因素可能发生变化,并影响抗生素在水体中的赋存.目前的研究还无法全面反映太湖抗生素污染状况,围绕抗生素的时空间分布特征,开展全太湖水域的长期系统监测,对准确评价太湖抗生素污染及其风险具有重要意义.

本文以全太湖水域为研究区域,开展为期 1 a 的逐月监测,分析太湖水体抗生素污染的时空分布特征,并进行生态风险评估,以为太湖抗生素污染防治提供理论基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 监测点位布设

太湖平均水深为 1.9 m,总体小于 5 m,根据监测垂线采样点布设原则,在各监测垂线水面下 0.5 m 处设置 1 个监测点位^[9].如图 1 所示,在全太湖水

域设置 20 个监测点位,断面信息见表 1.

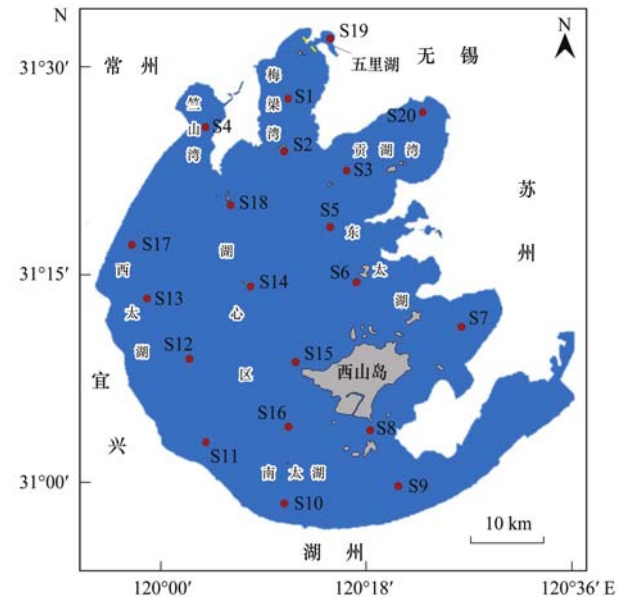


图 1 太湖监测点位示意
Fig. 1 Monitoring sites in Taihu Lake

表 1 监测点位断面信息
Table 1 Section information on monitoring sites

监测点位	断面名称	所在区域	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)
S1	梅梁湖心	无锡市	120.172 767	31.468 611
S2	拖山	无锡市	120.162 222	31.396 619
S3	沙渚南	无锡市	120.246 161	31.378 889
S4	竺山湖心	常州市	120.047 222	31.425 833
S5	乌龟山南	无锡市	120.229 464	31.310 278
S6	漫山	苏州市	120.269 722	31.232 778
S7	胥湖心	苏州市	120.458 965	31.171 667
S8	泽山	苏州市	120.267 552	31.013 611
S9	漾西港	苏州市	120.299 668	31.001 652
S10	小梅口	无锡市	120.134 667	30.993 056
S11	新塘港	苏州市	120.025 696	31.066 364
S12	大雷山	苏州市	120.011 944	31.136 389
S13	兰山嘴	苏州市	119.958 363	31.216 667
S14	平台山	苏州市	120.103 333	31.225 833
S15	西山西	苏州市	120.189 722	31.134 722
S16	14 号灯标	苏州市	120.150 575	31.062 778
S17	大浦口	无锡市	119.963 889	31.311 111
S18	椒山	常州市	120.096 944	31.333 333
S19	五里湖心	无锡市	120.245 276	31.515 559
S20	锡东水厂	无锡市	120.375 685	31.447 778

1.2 仪器与试剂

主要仪器:全自动固相萃取浓缩仪(AutoSPE-06D,Reeko 公司,美国);HLB 固相萃取柱(200 mg, 6 mL,Waters 公司,美国);超高效液相色谱串联质谱仪(UPLC/MS/MS)(Waters ACQUITY UPLC Xevo TQ,美国).

主要试剂:标准品磺胺嘧啶(sulfadiazine)、磺胺甲噁唑(sulfamethoxazole)、磺胺噻唑(sulfathiazole)、磺胺甲噁啉(sulfamerazine)、磺胺间甲氧嘧啶

(sulfamonomethoxine)、甲氧苄氨嘧啶(trimethoprim)、磺胺喹噁啉(sulfaquinoxaline)、磺胺二甲嘧啶(sulfadimethoxine)、甲砒霉素(thiamphenicol)、诺氟沙星(norfloxacin)、环丙沙星(ciprofloxacin)、恩诺沙星(enrofloxacin)、氧氟沙星(ofloxacin)、双氟沙星(difloxacin)、多西环素(doxycycline)、四环素(tetracycline)、土霉素(oxytetracycline)和红霉素(erythromycin)均购自 Dr Ehrenstorfer 公司(德国),纯度>95%;甲醇(色谱

纯)购自 Merck 公司(德国),丙酮(色谱纯)购自 Fisher Scientific(美国)。

1.3 样品采集与预处理

于 2018 年每月月初赴太湖进行采样,每次采样为期 4 d,通过 GPS 定位到不同采样点进行水样的现场采集。采样前,将 1 L 棕色玻璃采样瓶依次用乙醇和去离子水漂洗 3 次,烘干待用。利用有机玻璃采水器在水面以下 0.5 m 处采集水样,用准备好的玻璃采样瓶收集 1 L 水样。向水样中加入适量福尔马林,以抑制微生物生长。采集到的水样避光低温保存运回实验室,在 4℃ 下保存待测,并在 48 h 内完成水样预处理。

采用玻璃纤维滤膜(孔径 0.45 μm)对水样进行抽滤。采用全自动固相萃取浓缩仪和 HLB 固相萃取柱对抽滤后的水样进行抗生素的分离、萃取和浓缩,萃取过程和相关参数见表 2。萃取液定容至 1 mL 后,转移至棕色色谱瓶,保存于 -20℃ 待测。

表 2 抗生素固相萃取过程和参数
Table 2 Processes and parameters of solid phase extraction of antibiotics

操作命令	溶剂	流速 /mL·min ⁻¹	体积 /mL
活化	甲醇	5	5
活化	水	5	5
上样	—	10	1 000
气推	—	5	10
吹干	—	—	—
清洗注射泵	甲醇	5	5
洗脱	甲醇	5	7
洗脱	甲醇丙酮混合液(体积比 1:1)	5	7
气推	—	5	10
红外定容	—	—	1

1.4 抗生素测定

使用 Waters ACQUITY UPLC R BEH C18(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)色谱柱进行层析分离,柱温设定为 40℃。流动相 A:2% 甲醇溶液+0.05% 甲酸; B:甲醇+0.05% 甲酸;进样量设定为 5 μL,样品室温度设定为 10℃。梯度洗脱条件参数如表 3 所示。采用多反应离子监测模式(MRM)进行质谱分析,毛细管电压为 3.0 kV;电喷雾电离源(ESI)设定为正模式,离子源温度设定为 150℃;锥孔反吹气流量设定为 50 L·h⁻¹;脱溶剂气温度和流量分别设定为 500℃和 900 L·h⁻¹。

1.5 质量控制

采用外标法对样品进行定量分析,在优化条件下进行测定,使用抗生素标准品配制的溶液标准曲线相关系数 R^2 均大于 0.99。在 1 L 的空白水样中加入 20 ng·L⁻¹ 抗生素混合标准品,设置 6 个平行样,

测定抗生素含量并计算加标回收率。结果表明,18 种抗生素的加标回收率为 73%~126%,相对标准偏差为 3.71%~13.28%。

表 3 梯度洗脱条件参数
Table 3 Gradient elution condition parameters

时间 /min	流速 /mL·min ⁻¹	流动相 A 比例 /%	流动相 B 比例 /%
起始	0.4	90	10
0.25	0.4	90	10
4	0.4	2	98
5	0.4	2	98
5.01	0.4	90	10
6	0.4	90	10

1.6 生态风险评估

根据风险商值(RQ)评估太湖水体中检出抗生素的潜在生态风险。具体计算公式如下:

$$RQ = MEC/PNEC \tag{1}$$

$$PNEC = LC50 \text{ 或 } PNEC = \frac{EC50}{AF} \tag{2}$$

$$RQ_{sum} = \sum RQ_i \tag{3}$$

式中,MEC 为环境实测浓度,ng·L⁻¹; PNEC 为预测无效应浓度,ng·L⁻¹; LC50 为半致死浓度,ng·L⁻¹; EC50 为半最大效应浓度,ng·L⁻¹; AF 为评价因子,一般为 1 000; RQ_{sum} 表示不同抗生素 i 叠加的联合生态风险商。

2 结果与讨论

2.1 太湖水体抗生素的赋存

2018 年 1~12 月共采集水样 247 个。对 18 种目标抗生素进行分析发现,全年各监测点位均有抗生素的检出(表 4)。其中,环丙沙星、四环素和土霉素的检出率≤5%;四环素类抗生素中,仅多西环素的检出率达到 20%;大环内酯类抗生素红霉素检出率为 35%;喹诺酮类抗生素恩诺沙星的检出率为 48%;磺胺类抗生素的检出率最高,磺胺甲噁唑、磺胺噻唑、磺胺甲嘧啶、磺胺间甲氧嘧啶和甲氧苄氨嘧啶等 5 种磺胺类抗生素的检出率高于 50%,其中磺胺间甲氧嘧啶的检出率达到 80%。结果表明,目前太湖水环境仍存在抗生素污染,其中磺胺类抗生素的赋存较为普遍。该结果与先前的太湖及其他水域抗生素污染研究一致^[8,10-13]。虽然磺胺类抗生素仅占我国抗生素总体使用量的 5%^[14],但在太湖流域使用较为广泛^[15],且传统污水处理工艺对磺胺类抗生素的去除效率较低^[16],可能导致较多的磺胺类抗生素输入自然水体。此外,该类抗生素水溶性高且较难降解,使其易于在水体中赋存并扩散^[17,18]。

除 5 月 S5(乌龟山南)点位的抗生素浓度达到

113.1 ng·L⁻¹外,其余采集水样的抗生素浓度范围为0.5~89.5 ng·L⁻¹. 18种目标抗生素全年的平均浓度为2.8 ng·L⁻¹,中位浓度为1.5 ng·L⁻¹. 磺胺类、喹诺酮类、四环素类和大环内酯类抗生素的平均浓度分别为2.6、3.6、2.8和0.5 ng·L⁻¹. Xu等^[19]于2017年对太湖流域4类抗生素的赋存进行监测,平均检出浓度为1.588~3.141 ng·L⁻¹,与本研究结果相似. 相较于国内其它地表水体,太湖抗生素的赋存处于较低水平. Li等^[1]总结2005~2016年国内抗生素相关调查,发现海河水体抗生素的平均检出浓度为15.4~567 ng·L⁻¹,长江流域略低,平均检出浓度为n.d.~211 ng·L⁻¹. 位于华北地区的浅水型淡水湖泊白洋淀水体中,大环内酯类、喹诺酮类和磺胺类抗生素的平均检出浓度分别为47.2、60.1和383 ng·L⁻¹^[12]. 虽然太湖抗生素检出浓度在国内处于较低水平,但仍高于欧美某些地表水体. 意大利Arno河水体中抗生素检出浓度均为几ng·L⁻¹,且大部分兽用抗生素未检出^[20]. Velicu等^[21]对全美21个城郊和农村地区的地表水进行调查,均未发现抗

生素赋存. 可见,近年来太湖抗生素污染防治工作取得显著进步,但由于流域内较大的生产使用量,其污染问题仍需持续关注.

本研究中,喹诺酮类抗生素检出浓度较高. 其中,环丙沙星的平均浓度和中位浓度分别达到13.0 ng·L⁻¹和13.5 ng·L⁻¹(表4). Xu等^[19]在2017年太湖抗生素污染调查中,同样发现了较高的喹诺酮类抗生素赋存. Chen等^[22]对广东枫树坝水库17种抗生素进行了污染调查,其中环丙沙星检出浓度最高(174 ng·L⁻¹). 杨俊等^[6]的研究发现苏州水环境中喹诺酮类抗生素赋存水平最高,表明太湖抗生素污染种类与周边城市抗生素使用状况相关. 喹诺酮类抗生素作为人畜两用抗生素,广泛应用于人类和动物胃肠道疾病以及呼吸性疾病治疗,位于我国抗生素使用量前三名,占我国抗生素总体使用量的17%,仅华东地区2013年喹诺酮类抗生素的使用量就高达7 290 t^[14];此外,喹诺酮类抗生素在水环境中的赋存较为持久,也可能是太湖水环境中该类抗生素赋存水平较高的原因之一^[8].

表4 抗生素的检出频率和浓度
Table 4 Frequencies and concentrations of detected antibiotics

类别	抗生素	检出频率/%	检出浓度/ng·L ⁻¹		
			平均值	中位值	最大值
磺胺类	磺胺嘧啶	41	2.9	1.1	30.0
	磺胺甲噁唑	66	4.8	3.1	23.3
	磺胺噻唑	55	4.6	3.3	19.7
	磺胺甲噁唑	66	1.5	0.9	10.0
	磺胺间甲氧嘧啶	80	1.8	1.3	10.4
	甲氧苄氨嘧啶	54	0.6	0.5	6.5
	磺胺喹噁啉	11	0.2	0.2	0.4
	磺胺二甲嘧啶	17	3.1	0.3	14.8
	甲砒霉素	26	3.1	3.2	9.9
喹诺酮类	诺氟沙星	22	2.0	1.1	13.2
	环丙沙星	2	13.0	13.5	19.4
	恩诺沙星	48	3.4	3.1	17.5
	氧氟沙星	34	4.2	4.0	26.2
	双氟沙星	21	4.1	3.7	16.6
四环素类	多西环素	20	2.3	2.9	4.4
	四环素	5	5.6	4.2	15.7
	土霉素	2	0.3	0.2	0.9
大环内酯类	红霉素	35	0.5	0.3	3.9

2.2 太湖水体抗生素的时间变化

太湖抗生素检出浓度表现出明显的月际差异,6~10月抗生素浓度水平较低,其中6月抗生素平均浓度为7.3 ng·L⁻¹;2~5月和11月检出浓度较高,抗生素平均浓度在4月达到33.5 ng·L⁻¹,是6月的4.6倍[图2(a)].目前,大部分研究通过四季或丰/枯水期差异对抗生素赋存的时间变化规律进行表征^[11,19,22~28].一般认为,水环境中抗生素的赋存在冬春季较高,夏秋季较低^[22,25];枯水期较高,丰

水期较低^[11,28~30].然而,有研究中抗生素赋存的时间变化规律有所不同.孙秋根等^[5]的研究发现位于太湖流域的宜溧-洮溧水系抗生素在丰水期的检出水平高于枯水期.淀山水体抗生素浓度在春季最高,冬季最低^[31];类似地,春季江汉平原河流地表水中抗生素浓度高于冬季^[27];然而,Cui等^[26]的研究发现长江三角洲某水库抗生素浓度在冬季高于春季;Li等^[18]的研究则发现滦河流域4处水库的表层水抗生素在6~7月浓度最高.水环境中抗生素的

赋存受降雨、温度、光解作用、微生物代谢和人类活动等因素影响^[19,22,25,32],这些因素的改变会造成抗生素赋存状况的复杂变化.本研究中,抗生素在2~5月的赋存较高,与前文提到的部分研究结果类似^[22,27,31].这可能是由于该时间段内,畜禽、水产养殖和附近居民对抗生素的使用量较大^[11];此外,该时间段的降水量在全年处于较低水平且气温较低^[33],导致水动力条件和微生物降解能力较弱,使得抗生素在水环境中的赋存较为持久^[34].在6~10月,太湖水体中抗生素浓度显著下降,这可能是流域内抗生素使用量减少、降水增多产生稀释效应、微生物降解和光解作用变强等一系列因素共同导致.值得注意的是,11月抗生素浓度相较于前一个月(10月)出现了显著提高.11月太湖进入枯水期,水位较10月迅速降低^[33],可能对水体抗生素产生了浓缩作用.12月初,太湖流域累计降水96.3 mm,为常年的7倍^[33],受降水影响,水体抗生素的浓度较11月有所降低.可见,太湖抗生素赋存水平月际间波动明显,同一季节的不同月份间仍可能出现显著差异;结合水文水质条件和污染输入情况进行月际监测可以更加准确地评估抗生素污染的时间变化规律.

不同类型抗生素在各月的赋存也有所差异[图2(b)].磺胺类抗生素在全年均有较高的检出比例,其中1月检出浓度比例达到95.9%,表明该类抗生素在水环境中的赋存具有持续性.除1月外,喹诺酮类抗生素在太湖水体均有检出,3~5月喹诺酮类抗生素检出浓度最高,为125.9~300.4 ng·L⁻¹;在6~8月,该类抗生素浓度迅速降低至34.2~72.1 ng·L⁻¹,表现出“春季高,夏季低”的典型变化趋势.本研究中,四环素类抗生素在6~9月没有检出.Cui等^[26]在长江三角洲某水库同样发现四环素类抗生素在夏季浓度较低,但海河^[13]和黄浦江^[30]水体中四环素类抗生素在夏季的赋存水平高于冬季.四环素类抗生素在水体中易于沉降并被沉积物和颗粒物吸附,在水环境中的行为归趋易受水文水质状况影响^[13,30],导致其不同水域的赋存差异较大.大环内酯类抗生素全年的检出浓度均处在较低水平,最高检出浓度为14.3 ng·L⁻¹(9月);与四环素类相反,大环内酯类抗生素只在7~9月有较明显的检出.洞庭湖^[28]和长江三角洲某水库^[26]的研究同样在夏季/丰水期发现大环内酯类抗生素具有较高的检出水平.总体来看,磺胺类和喹诺酮类是全年太湖水环境中抗生素的主要赋存类型.

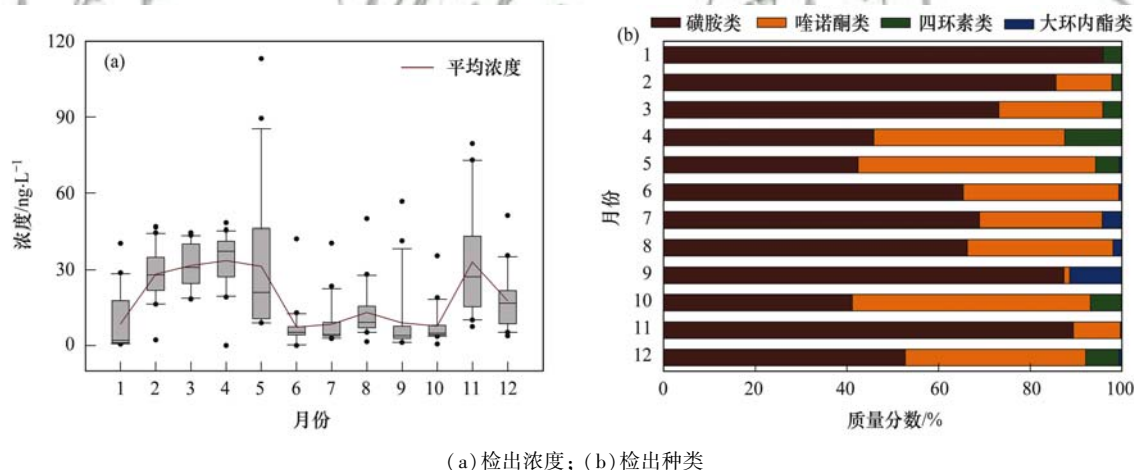


图2 太湖表层水体抗生素检出浓度和检出种类的月际变化

Fig. 2 Monthly variations of detected concentrations and species of antibiotics in the surface water of Taihu Lake

2.3 太湖水体抗生素的空间分布

抗生素在20个监测点位月平均浓度的空间分布如图3(a)所示,各点位的抗生素平均浓度范围为13.0~41.3 ng·L⁻¹.对各监测点位各月度的抗生素浓度进行聚类分析,以评估太湖水体中抗生素的空间分布特征.根据聚类分析树状图[图3(b)],20个监测点位可划分为3类.其中,大部分监测点位同属一类(乌龟山南、大雷山和竺山湖心除外),表明太湖抗生素的空间分布较为均一,空间差异较小,这与Xu等^[19]的调查结果类似.太湖流域工农业发达,

湖区周边均存在潜在的抗生素污染源^[10,15,19],虽然不同污染源对湖区的输入强度和频率可能有所差异,但作为大型浅水湖泊,太湖水文水质状况受风浪和湖流影响较大,而风浪和湖流可能会促进水体中抗生素的扩散,导致湖区抗生素赋存较为均一^[23,24].五里湖是太湖西北部伸入无锡市区的湖湾,与太湖主湖区的水流交换实施闸控,受太湖湖流的影响较小.然而,五里湖抗生素赋存与主湖区并没有明显差异.作为城市内湖,S19(五里湖心)处抗生素水平甚至略低于主湖区,这与Zhou等^[24]的调查

结果类似. 虽然五里湖周边人类活动密集,但从本世纪初,尤其是2007年以来,无锡市对五里湖全面实施生态清淤、污水截流、退渔还湖、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设等水环境综合整治工程^[35],一系列整治措施可能也减轻了抗生素污染.

监测点位S4(竺山湖心)未能与其它点位形成聚类[图3(b)],表明其抗生素赋存状况与其它点位差异较大.由图3(a)可知,竺山湖心水体中抗生素赋存水平高于其他监测点位,这与先前有关研究结果相似^[24,36].本研究中,磺胺甲噁唑和磺胺嘧啶在竺山湖水体中的检出浓度较高,平均浓度分别达到 $14.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.两种抗生素主要用于畜禽和水产养殖^[13,23,36],表明农业面源输入是竺山湖抗生素污染的重要来源.竺山湖是位于湖区西北角的半封闭海湾,作为洮湖水系的受纳水体,被认为是太湖水质较差的湖区^[37].洮湖水系位于宜兴和

常州武进地区,属湖西重污染控制区,是入湖污染负荷通量最大的水系之一^[5].孙秋根等^[5]调查发现,洮湖水系存在较为普遍的抗生素污染,该水系所在地区人口密集,集约化养殖较为普遍,磺胺甲噁唑等抗生素的使用频次和使用量相对较大.Yan等^[15]的研究同样发现该地区水产养殖业发达,磺胺类抗生素的污染水平较高.此外,该地区众多居民沿河而居,污水处理系统难以全面覆盖且对抗生素去除率低,使得降雨易将水产养殖与粪肥施用导致的面源污染冲刷入河^[5],一系列原因共同导致了竺山湖较高的抗生素赋存水平.水文研究则进一步表明,竺山湖水体将很可能携带污染物随湖流迁移至其他湖区,从而影响整个太湖的水质^[37].因此,竺山湖既是周边入湖水系抗生素污染的“汇”,同时也是太湖其它湖区抗生素污染的“源”,该湖区的抗生素污染问题值得进一步关注和研究.

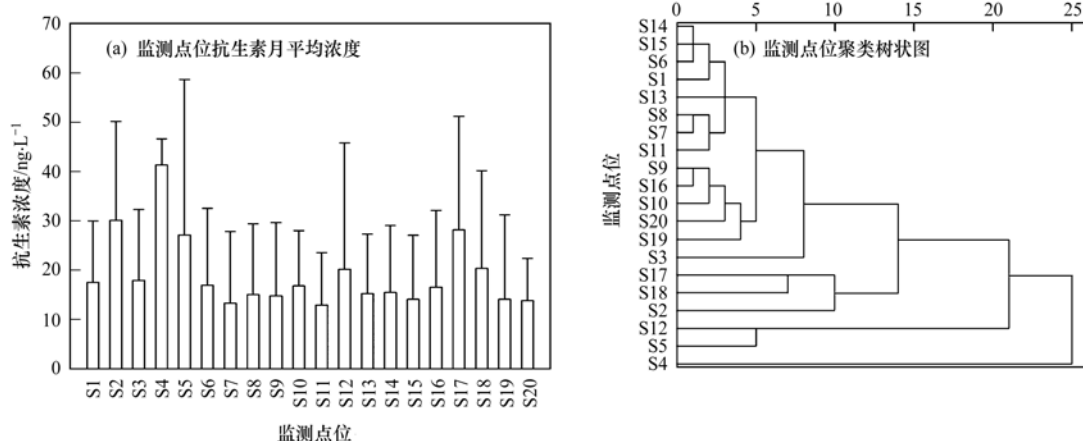


图3 太湖表层水体抗生素空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of antibiotics in the surface water of Taihu Lake

2.4 太湖水体抗生素的生态风险评估

目前国内外还缺乏针对抗生素的环境质量标准,而抗生素对水生生物的生态毒性将是制定水质标准的重要依据之一.本研究根据目标抗生素对不同营养级水生生物的 EC_{50} 或 LC_{50} 值(表5),计算RQ值,评估了太湖水体抗生素对藻类、无脊椎动物和鱼类的生态风险(图4).根据不同月份各监测点位的RQ值,将抗生素生态风险划分为不同等级,分别为:无风险($RQ < 0.01$)、低风险($0.01 < RQ \leq 0.1$)、中风险($0.1 < RQ \leq 1$)和高风险($RQ > 1$).

如图4所示,抗生素对太湖的鱼类等高等水生生物基本无风险($RQ < 0.01$);而由于低等水生生物对抗生素胁迫更加敏感,具有更低的PNEC水平^[18],导致太湖抗生素污染对藻类、无脊椎动物等造成了生态风险.抗生素对无脊椎动物基本表现为

低风险(52.2%)或无风险(46.6%),而全年太湖抗生素对藻类的中风险和高风险($RQ > 0.1$)比例达57.5%.在4月,太湖各监测点位的藻类RQ为 0.80 ± 0.24 ,是全年抗生素生态风险较高的时期;而春季同时也是太湖蓝藻水华较为严重时期,大量藻细胞会富集水体抗生素,可能造成对抗生素藻类生态风险的低估.此外,11月太湖抗生素的RQ为 0.64 ± 0.30 ,同样具有较高的生态风险.太湖4月和11月的生态风险可能是由于喹诺酮类抗生素赋存水平较高导致.藻类对氧氟沙星等喹诺酮类抗生素的胁迫较敏感,PNEC值较低^[7],使得喹诺酮类成为重要的生态风险因子.廖杰等^[39]的研究同样发现喹诺酮类抗生素是厦门市莲花水库的主要风险因子.在欧洲,氧氟沙星由于较高的生态风险已被筛选为地表水环境中需优先关注的抗生素^[40].我国需进一步加强对抗生素生态风险的关注.除了对水生

生物的毒性风险, 抗生素在水环境中的残留还可能对微生物群落产生胁迫, 促使细菌对抗生素产生抗性基因. 抗性基因的产生可能对人类健康产生潜在威胁, 也是今后需要关注的抗生素生态风险^[2].

表 5 抗生素对水生生物的 EC50/LC50 值¹⁾/mg·L⁻¹
Table 5 EC50/LC50 values of antibiotics for aquatic organisms/mg·L⁻¹

抗生素	藻类		无脊椎动物		鱼类	
	EC50	LC50	EC50	LC50	EC50	LC50
磺胺嘧啶	1.1×10^{-1}	—	5.7×10^1	—	2.6×10^4	—
磺胺甲噁唑	2.7×10^{-2}	—	2.1×10^{-1}	—	5.6×10^2	—
磺胺噻唑	1.8×10^1	—	—	5.7	—	1.9×10^2
磺胺甲噁啉	1.0	—	1.6	—	5.6×10^1	—
磺胺间甲氧嘧啶	3.0×10^1	—	—	8.4	—	4.5×10^2
甲氧苄氨嘧啶	1.6×10^1	—	9.2×10^1	—	1.0×10^2	—
磺胺喹噁啉	2.0×10	—	—	6.2	—	1.9×10^2
磺胺二甲嘧啶	2.0×10	—	—	6.0	—	2.0×10^2
甲砒霉素	5.1×10^3	—	1.6×10^4	—	3.6×10^4	—
诺氟沙星	2.1×10^{-2}	—	3.1	—	1.0×10^3	—
环丙沙星	1.6×10^3	—	9.9×10^2	—	9.4×10^2	—
恩诺沙星	5.6×10^2	—	—	5.1×10^2	—	4.9×10^3
氧氟沙星	1.0×10^{-3}	—	—	5.3×10^{-1}	—	1.9×10^4
双氟沙星	2.4×10^2	—	—	2.5×10^2	—	2.3×10^3
多西环素	3.2×10^{-1}	—	6.8×10^1	—	9.1×10^1	—
四环素	3.1×10^4	—	1.5×10^5	—	3.6×10^5	—
土霉素	1.7×10^{-1}	—	1.8×10^{-1}	—	7.5×10^1	—
红霉素	2.0×10^{-2}	—	2.2×10^{-1}	—	1.0×10^2	—

1) EC50 和 LC50 值参考文献[38]和 ECOSAR

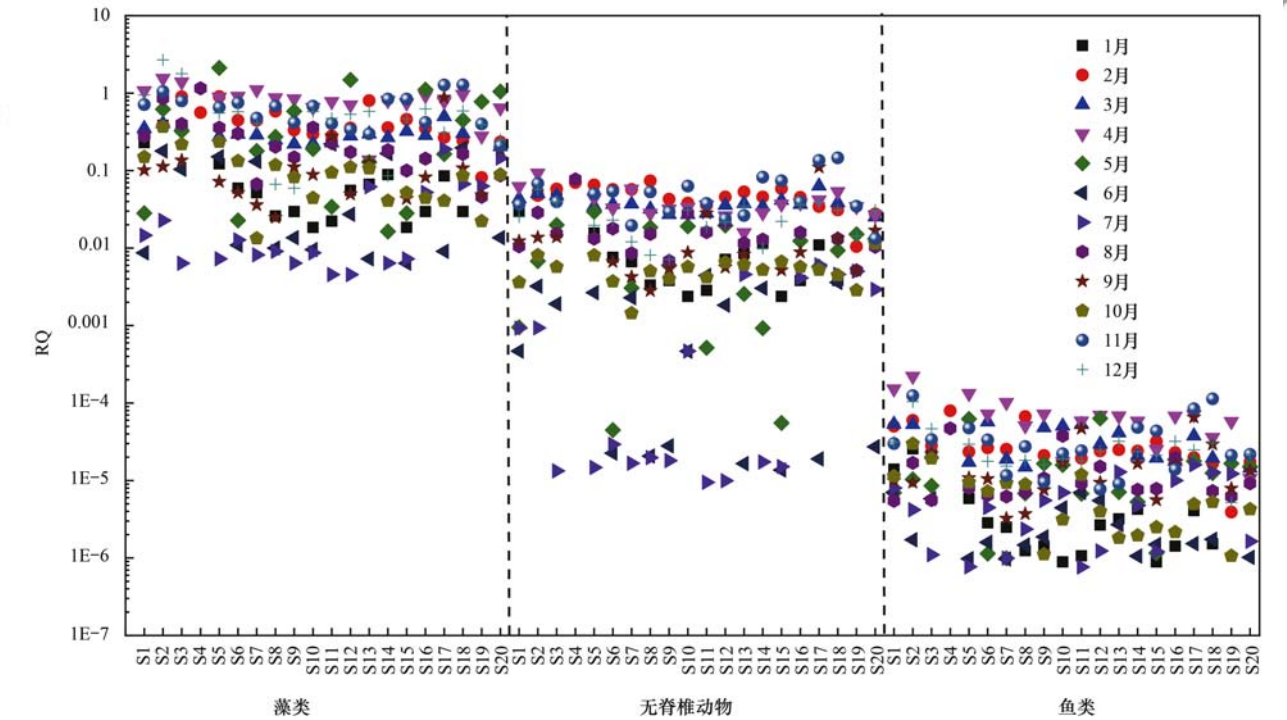


图 4 太湖抗生素对藻类、无脊椎动物和鱼类的 RQ 值

Fig. 4 RQ values of antibiotics for algae, invertebrate, and fish in Taihu Lake

3 结论

(1) 全年太湖水体中不同程度地检出 18 种抗生素, 磺胺类抗生素检出率最高, 其中, 磺胺间甲氧嘧啶的检出率达到 80%; 喹诺酮类抗生素检出浓度

较高, 其中, 环丙沙星的平均浓度和中位浓度分别为 $13.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $13.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) 太湖抗生素污染具有明显的月际差异, 6~10 月抗生素浓度水平较低, 2~5 月和 11 月检出浓度较高; 磺胺类抗生素在全年均有较高的检出比

例,喹诺酮类抗生素在3~5月检出浓度最高.太湖水体抗生素在各点位间的分布较均一,空间差异小;其中,竺山湖心水体中抗生素赋存水平高于其他监测点位.

(3)全年太湖抗生素对藻类的中高风险比例达57.5%,其中4月和11月的生态风险较严重,喹诺酮类抗生素可能是主要风险因子.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Yang Y Y, Song W J, Lin H, *et al.* Antibiotics and antibiotic resistance genes in global lakes; a review and meta-analysis[J]. *Environment International*, 2018, **116**: 60-73.
- [3] 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.
- [4] 刘昔,王智,王学雷,等.我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价[J].*环境科学*, 2019, **40**(5): 2094-2100.
- Liu X, Wang Z, Wang X L, *et al.* Status of antibiotic contamination and ecological risks assessment of several typical chinese surface-water environments[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2094-2100.
- [5] 孙秋根,王智源,董建玮,等.太湖流域河网4种典型抗生素的时空分布和风险评价[J].*环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4400-4410.
- Sun Q G, Wang Z Y, Dong J W, *et al.* Spatial-temporal distribution and risk evaluation of four typical antibiotics in river networks of Taihu Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4400-4410.
- [6] 杨俊,王汉欣,吴韵斐,等.苏州市水环境中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J].*生态环境学报*, 2019, **28**(2): 359-368.
- Yang J, Wang H X, Wu Y F, *et al.* Occurrence, distribution and risk assessment of typical antibiotics in the aquatic environment of Suzhou city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(2): 359-368.
- [7] 武旭跃,邹华,朱荣,等.太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价[J].*环境科学*, 2016, **37**(12): 4596-4604.
- Wu X Y, Zou H, Zhu R, *et al.* Occurrence, distribution and ecological risk of antibiotics in surface water of the Gonghu Bay, Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4596-4604.
- [8] Nkoom M, Lu G H, Liu J C. Occurrence and ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in Taihu Lake, China: a review [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2018, **20**(12): 1640-1648.
- [9] 魏复盛.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002. 35.
- [10] Zhou L J, Li J, Zhang Y D, *et al.* Trends in the occurrence and risk assessment of antibiotics in shallow lakes in the lower-middle reaches of the Yangtze River basin, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **183**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109511.
- [11] Chen H Y, Jing L J, Teng Y G, *et al.* Characterization of antibiotics in a large-scale river system of China: occurrence pattern, spatiotemporal distribution and environmental risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 409-418.
- [12] Li W H, Shi Y L, Gao L H, *et al.* Occurrence of antibiotics in water, sediments, aquatic plants, and animals from Baiyangdian Lake in North China[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1307-1315.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Yan Y, Deng Y, Ji M, *et al.* Antibiotic pollution and risk assessment under different cultivation modes in aquaculture ponds of the Taihu Lake Basin, China [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2020, **71**(10) 1234-1240, doi: 10.1071/MF19224.
- [16] 陈姗,许凡,张玮,等.磺胺类抗生素污染现状及其环境行为的研究进展[J].*环境化学*, 2019, **38**(7): 1557-1569.
- Chen S, Xu F, Zhang W, *et al.* Research progress in pollution situation and environmental behavior of sulfonamides [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(7): 1557-1569.
- [17] 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.
- [18] Li N, Zhang X B, Wu W, *et al.* Occurrence, seasonal variation and risk assessment of antibiotics in the reservoirs in North China [J]. *Chemosphere*, 2014, **111**: 327-335.
- [19] Xu Z A, Li T, Bi J, *et al.* Spatiotemporal heterogeneity of antibiotic pollution and ecological risk assessment in Taihu Lake Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 12-20.
- [20] Zuccato E, Castiglioni S, Bagnati R, *et al.* Source, occurrence and fate of antibiotics in the Italian aquatic environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 1042-1048.
- [21] Velicu M, Suri R. Presence of steroid hormones and antibiotics in surface water of agricultural, suburban and mixed-use areas [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **154**(1-4): 349-359.
- [22] Chen Y H, Cui K P, Huang Q L, *et al.* Comprehensive insights into the occurrence, distribution, risk assessment and indicator screening of antibiotics in a large drinking reservoir system [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137060.
- [23] 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.
- [24] Zhou L J, Wu Q L, Zhang B B, *et al.* Occurrence, spatiotemporal distribution, mass balance and ecological risks of antibiotics in subtropical shallow Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, **18**(4): 500-513.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Yao L L, Wang Y X, Tong L, *et al.* Seasonal variation of antibiotics concentration in the aquatic environment: a case study at Jiangnan Plain, central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 56-64.
- [28] 刘晓晖. 洞庭湖流域水环境中典型抗生素污染特征、来源及风险评估[D]. 济南: 山东师范大学, 2017.
Liu X H. Pollution level, source and ecological risk of typical antibiotics in the Dongting Lake, China[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2017.
- [29] Lei K, Zhu Y, Chen W, *et al.* Spatial and seasonal variations of antibiotics in river waters in the Haihe River Catchment in China and ecotoxicological risk assessment [J]. *Environment International*, 2019, **130**, doi: 10.1016/j.envint.2019.104919.
- [30] Jiang L, Hu X L, Yin D Q, *et al.* Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(6): 822-828.
- [31] 童帮会. 淀山湖典型抗生素污染特征、来源及风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Tong B H. Pollution characteristics, sources and risk assessment of typical antibiotics in Dianshan Lake of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [32] Cheng D M, Liu X H, Wang L, *et al.* Seasonal variation and sediment-water exchange of antibiotics in a shallower large lake in North China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 266-275.
- [33] 林荷娟. 太湖流域及东南诸河区水情年报(2018)[R]. 上海: 太湖流域管理局水文局(信息中心), 2019.
Lin H J. Annual report of water regime in Taihu Basin & southeast rivers (2018) [R]. Shanghai: Bureau of Hydrology (Information Center) of Taihu Basin Authority, MWR, 2019.
- [34] Yan C X, Yang Y, Zhou J L, *et al.* Antibiotics in the surface water of the Yangtze Estuary: occurrence, distribution and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **175**: 22-29.
- [35] 田伟, 杨周生, 邵克强, 等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响: 以蠡湖近 30 年水质变化为例[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 183-193.
Tian W, Yang Z S, Shao K Q, *et al.* Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: a case study of water quality variation in Lihu Lake over the past 30 years[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 183-193.
- [36] Xu J, Zhang Y, Zhou C B, *et al.* Distribution, sources and composition of antibiotics in sediment, overlying water and pore water from Taihu Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 267-273.
- [37] 韩景. 太湖竺山湖湖流和水体迁移规律研究[J]. *水利规划与设计*, 2020, (7): 59-64, 123.
Han J. Study on regularities of water flow and water body migration of Zhushan lake, Taihu lake [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2020, (7): 59-64, 123.
- [38] Yan Z H, Yang H H, Dong H K, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of organic micropollutants in the lower reaches of the Yangtze River, China: a case study of water diversion[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 223-232.
- [39] 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.
- [40] Zhou S B, Di Paolo C, Wu X D, *et al.* Optimization of screening-level risk assessment and priority selection of emerging pollutants-The case of pharmaceuticals in European surface waters [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 1-10.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)