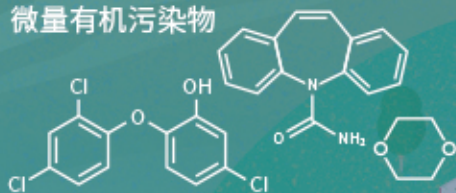


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序

周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦*

(西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 针对我国水体环境中大多数抗生素缺乏生态毒理数据, 无法开展全国范围内抗生素生态风险评估的问题, 以国家药品监督管理局数据库中抗生素商品为研究对象, 通过收集市场所有抗生素的商品数量和平均日剂量, 结合暴露建模方法计算暴露指数, 采用抗生素生态毒理效应数据以及物种敏感性分布 (species sensitivity distributions, SSD) 法和顶端效应计算风险评分, 对结果进行筛选排序, 分析并识别了抗生素优先次序。结果表明, 拥有不少于 4 种商品数量的特定抗生素为 105 种, 53 种抗生素为全国用量较大的候选药物。同时通过联合概率模型筛选出 20 种抗生素作为优先风险评估药品, 其中高生态风险优先关注为克拉霉素、环丙沙星、阿莫西林、头孢克洛和氧氟沙星。本研究为定量评估我国水体环境抗生素风险防控提供科学依据。

关键词: 抗生素; 生态影响; 中国; 暴露; 优先

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2748-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009275

Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks

ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, LI Qi*

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In view of the lack of ecotoxicological data for most antibiotics in China's water environment, national-scale ecological risk assessment of antibiotics remains impossible. This study determined the exposure index values for antibiotic products in the National Medical Products Administration based on quantity and average daily dose data for all antibiotics in the market alongside exposure modeling. The risk scores were calculated using data on the ecotoxicological effects of the antibiotics, and the species sensitivity distributions (SSD) method and apical effects. Priorities for control were identified based on the findings. Approximately 105 antibiotics were screened, and 53 were identified as candidate drugs with high national usage. Twenty antibiotics were identified for priority risk evaluation using a joint probabilistic model, with clarithromycin, ciprofloxacin, amoxicillin, cefaclor, and oxyfloxacin highlighted as presenting a high ecological risk. This study provides a scientific basis for the quantitative assessment of antibiotic risk prevention and control in China's aquatic environment.

Key words: antibiotics; ecological effects; China; exposure; priority

抗生素是指由微生物(包括细菌、真菌和放线菌属)或高等动植物在生活过程中所产生的具有抗病原体或其他活性的一类次级代谢产物,能干扰其他生物细胞发育功能的化学物质^[1]。中国是抗生素的最大生产国和使用国,2013年使用了约16.2万t抗生素,其中48%为人用抗生素^[2]。绝大多数抗生素在污水处理过程中难以去除,不断进入水体环境,并重新进入水循环^[3]。抗生素在微生物系统中的出现会诱导正常病原菌遗传或突变,产生耐药性,使抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)在病原菌中迁移传播^[4,5],对生态环境和人体健康造成潜在危害^[6]。近年来,抗生素污染问题受到国内外学者广泛关注,研究报道了接触抗生素类药物会对水生生物造成不利影响^[7~10]。例如张晓晗等^[11]研究氧氟沙星对普通小球藻和斜生栅藻的半抑制浓度分别为7.96 mg·L⁻¹和6.20 mg·L⁻¹。Kümmerer等^[12]报道了易感病原菌测试EC₅₀值为0.015 ng·L⁻¹,以上研究结果表明抗生素的生态毒理效应

和环境风险不容忽视,针对种类和数量繁多的抗生素污染物,筛选出排放数量大、对人体及水生生态健康危害大的抗生素,集中有限的环境资源进行优先管理控制无疑是行之有效的管控策略。

我国的抗生素药品很容易获得,大多数可在药店直接购买,预计我国水体环境中抗生素暴露浓度将处于较高水平,其环境污染也将比其他国家更为严重。虽然现在可以获得抗生素发生和毒性方面的大量数据,但是水体环境中抗生素风险评估的信息十分有限。因此需要对抗生素进行筛选排序,重点监测具有最高环境风险的药物并对其进行风险评估。针对危害效应大的抗生素进行优先研究和管理,已成为一种有效控制污染的方式,引

收稿日期: 2020-09-28; 修订日期: 2020-11-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404303); 陕西省重点研发计划项目(2020SF-400); 陕西省水利科技计划项目(2020slkj-13)

作者简介: 周力(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为抗生素生态毒理学, E-mail: 1076261449@qq.com

* 通信作者, E-mail: qili726@163.com

起国内外研究学者的极大关注. 目前已经开展的药物优先排序区域主要集中在英国^[13]、西班牙^[14]和美国^[15]等欧美国家, 只有少数研究在欠发达地区, 如哈萨克斯坦^[16]和伊拉克^[17]等区域开展. 通常, 这些方法大都依赖于抗生素商品准确的使用数据来评估暴露浓度, 然后与预测的潜在毒性进行比较. 由于许多发展中国家/地区的药物使用数据有限或不存在, 因此筛选出一种没有药品使用数据的优先排序方法至关重要.

本研究为了计算暴露指数, 将全国市场上每种抗生素商品数量乘以平均日剂量当作其使用数据的替代, 再结合每种抗生素的急性和慢性水生生态毒理效应数据以及物种敏感性分布和顶端效应计算风险评分, 对不同风险评估结果进行组合得出最终抗生素优先清单. 本研究的目的是优化现有的药物排序方法并应用于我国水体, 识别水生环境中抗生素潜在风险并进行筛选排序, 以期对抗生素污染防治提供基础资料. 相关部门对优先清单中的药品进行环境风险评估后, 可用于未来有关抗生素的控制和管理.

1 材料与方法

1.1 评价模型

根据对中国水体环境可能产生高风险的抗生素为基础来进行风险评分 (risk score, RS), 从而确定优先排序总体方法. RS 的计算涉及地表水暴露指数 (exposure index for surface water, EISw) 的使用和预测无效浓度 (predicted no-effect concentrations, PNEC). 该模型方法结合水生生物的急性和慢性毒性进行危害评估, 考虑与每种抗生素相关的物种敏感性分布和顶端效应.

1.2 数据来源

通过对国家药品监督管理局^[18]数据库进行检索, 统计出目前在中国医药市场使用的抗生素种类约为 105 种, 不同名称的抗生素商品主要成分相同, 考虑到少于 4 种商品的某类抗生素使用数量较少, 对水生环境风险较小, 因此不予统计. 以大于等于 4 种商品的抗生素作为初次筛选对象. 筛选的抗生素商品数量 (number of product, NP) 和平均日剂量 (average daily dose, ADD) 等信息 (表 1).

1.3 模型计算方法

1.3.1 水环境暴露评估

水环境暴露评估以 EISw 来表征. 使用 Aubakirova 等^[16]提出的方法估算每种抗生素 [公式 (1)]. 抗生素的性质和环境归宿数据从相关文献和在线数据库获得, 包括从体内排出未经代谢的抗生

素分数 (fraction of unmetabolized antibiotic excreted, F_{exc}), 辛醇-水分配系数 (octanol-water partition coefficient, K_{ow}), 酸解离常数 (acid dissociation constant, pK_a) 和土壤有机碳-水分配系数 (soil organic carbon-water partitioning coefficient, K_{oc}), 对于没有代谢信息的抗生素被认为是完全从体内排出. 未被污水处理厂去除的药物部分 (fraction of pharmaceutical released from the waste water treatment plant, F_{wwtp}) 根据欧洲技术指导文件 (European commission technical guidance document, TGD)^[23]中关于人用药品风险评估给出的标准算法 [公式 (2)] 进行估算. 对于缺乏实验数据的 K_{oc} 通过使用 K_{ow} 和 pK_a 建立的模型预测 [公式 (3) ~ (6)]^[24].

$$EISw = NP \times ADD \times F_{exc} \times F_{wwtp} \quad (1)$$

式中, NP 表示商品数量; ADD 表示平均日剂量, $mg \cdot d^{-1}$; F_{exc} 表示从体内排出未经代谢的抗生素质量分数; F_{wwtp} 表示未被污水处理厂去除的药物部分.

$$F_{wwtp} = 1 - \frac{Sludgeinhab \times K_{oc} \times Focsludge}{[WasteWinhab + (Sludgeinhab \times K_{oc} \times Focsludge)]^{-1}} \quad (2)$$

式中, Sludgeinhab 表示每位居民每天的污泥质量 (mass of waste sludge per inhabitant per day, Sludgeinhab), $0.074 \text{ kg} \cdot d^{-1}$ ^[23]; Focsludge 表示污泥有机碳的比例 (fraction of sludge organic carbon, Focsludge) 取值为 0.326 ^[25]; WasteWinhab 表示每人每天的废水量 (amount of wastewater per inhabitant per day, WasteWinhab) 为 $200 \text{ L} \cdot d^{-1}$ ^[21]; K_{oc} 表示土壤有机碳-水分配系数.

$$\Phi_n = \frac{1}{1 + 10^{a(pH - pK_a)}} \quad (3)$$

$$\Phi_{ion} = 1 - \Phi_n \quad (4)$$

式中, $a = 1$, $pH = 5.8$ (酸); $a = -1$, $pH = 4.5$ (碱); pK_a 表示酸解离常数.

$$\text{酸: } \lg K_{oc} = \lg(\Phi_n \times 10^{0.54 \lg P_n + 1.11} + \Phi_{ion} 10^{0.11 \lg P_n + 1.54}) \quad (5)$$

$$\text{碱: } \lg K_{oc} = \lg(\Phi_n \times 10^{0.37 \lg P_n + 1.70} + \Phi_{ion} 10^{0.65 pK_a} \times f^{0.14}) \quad (6)$$

式中, $\lg P_n$ 表示中性分子的 $\lg K_{ow}$; $f = K_{ow} / (K_{ow} + 1)$.

1.3.2 物种敏感性分布模型拟合方法

物种敏感性分布 (species sensitivity distribution, SSD) 是一种以毒理学数据为基础, 基于不同物种对污染物敏感性的差异, 通过将每种抗生素对应不少于 5 种水生生物物种的毒理学数据输入 ETX 2.0,

表 1 抗生素相关使用参数
Table 1 Antibiotic related parameters

化合物名称	英文名	NP/种	ADD/mg·d ⁻¹	lgK _{ow}	pK _a
阿洛西林	Azlocillin	4	11 250. 0	0. 20 ^[19]	3. 49 ^[19]
阿莫西林	Amoxicillin	68	2. 2	0. 87 ^[20]	3. 23 ^[20]
阿奇霉素	Azithromycin	159	581. 0	4. 02 ^[21]	8. 50 ^[19]
氨苄西林	Ampicillin	22	5 943. 0	1. 35 ^[20]	3. 24 ^[20]
比阿培南	Biapenem	4	600. 0	-2. 00 ^[19]	3. 51 ^[19]
地红霉素	Dirithromycin	11	500. 0	1. 60 ^[19]	12. 49 ^[19]
法罗培南	Faropenem	7	600. 0	0. 24 ^[19]	4. 16 ^[19]
氟罗沙星	Fleroxacin	27	377. 8	0. 24 ^[19]	5. 44 ^[19]
氟氯西林	Flucloxacillin	8	875. 0	2. 58 ^[19]	3. 75 ^[19]
红霉素	Erythromycin	11	150. 0	3. 06 ^[20]	9. 68 ^[20]
环丙沙星	Ciprofloxacin	8	300. 0	0. 28 ^[21]	6. 09 ^[20]
加替沙星	Gatifloxacin	103	400. 0	2. 60 ^[19]	5. 69 ^[19]
克拉霉素	Clarithromycin	86	500. 0	3. 16 ^[20]	8. 99 ^[20]
克林霉素	Clindamycin	95	1 390. 5	2. 16 ^[21]	12. 16 ^[20]
利福平	Rifampicin	26	504. 3	2. 70 ^[20]	1. 70 ^[20]
利福昔明	Rifaximin	8	800. 0	4. 94 ^[19]	3. 66 ^[19]
磷霉素	Fosfomycin	4	300. 0	-1. 60 ^[19]	1. 25 ^[19]
罗红霉素	Roxithromycin	42	300. 0	1. 70 ^[20]	12. 45 ^[20]
洛美沙星	Lomefloxacin	30	400. 0	-0. 30 ^[20]	13. 39 ^[20]
美罗培南	Meropenem	4	3 000. 0	-0. 60 ^[20]	9. 80 ^[20]
美洛西林	Mezlocillin	17	4 000. 0	0. 21 ^[19]	3. 49 ^[19]
米诺环素	Minocycline	8	200. 0	-0. 03 ^[19]	-2. 30 ^[19]
奈替米星	Netilmicin	42	385. 0	-1. 40 ^[19]	12. 55 ^[19]
帕珠沙星	Pazufloxacin	45	600. 0	-0. 51 ^[19]	5. 59 ^[19]
哌拉西林	Piperacillin	20	13 500. 0	0. 67 ^[19]	3. 49 ^[19]
普卢利沙星	Prulifloxacin	4	400. 0	1. 77 ^[19]	6. 03 ^[19]
舒巴坦	Sulbactam	76	3 125. 0	0. 50 ^[22]	2. 62 ^[20]
舒他西林	Sultamicillin	13	1 125. 0	1. 55 ^[19]	11. 71 ^[19]
司帕沙星	Sparfloxacin	13	200. 0	-0. 07 ^[19]	5. 75 ^[19]
头孢吡肟	Cefepime	27	2 000. 0	-1. 80 ^[22]	3. 25 ^[20]
头孢丙烯	Cefprozil	4	750. 0	0. 60 ^[19]	2. 79 ^[19]
头孢泊肟	Cefpodoxime	20	200. 0	0. 05 ^[19]	3. 22 ^[19]
头孢呋辛	Cefuroxime	105	2 200. 0	-0. 16 ^[20]	3. 15 ^[20]
头孢甲肟	Cefmenoxime	4	1 500. 0	-1. 30 ^[19]	3. 04 ^[19]
头孢克洛	Cefaclor	27	750. 0	0. 40 ^[20]	7. 49 ^[20]
头孢克肟	Cefixime	51	196. 0	-0. 40 ^[19]	3. 45 ^[19]
头孢美唑	Cefmetazole	20	1 500. 0	-0. 60 ^[19]	3. 38 ^[19]
头孢哌酮	Cefoperazone	24	1 500. 0	-0. 74 ^[19]	3. 38 ^[19]
头孢羟氨苄	Cefadroxil	14	1. 5	-0. 40 ^[19]	3. 45 ^[19]
头孢曲松	Ceftriaxone	12	1 500. 0	-1. 70 ^[20]	3. 19 ^[20]
头孢噻肟	Cefotaxime	6	3 000. 0	-0. 50 ^[19]	3. 18 ^[19]
头孢他啶	Ceftazidime	8	5 000. 0	-1. 60 ^[20]	3. 53 ^[20]
头孢替安	Cefotiam	8	1 500. 0	-2. 10 ^[19]	2. 79 ^[19]
头孢唑肟	Ceftizoxime	5	3 750. 0	0. 04 ^[19]	3. 13 ^[19]
妥布霉素	Tobramycin	5	283. 5	-5. 80 ^[20]	12. 54 ^[20]
西索米星	Sisomicin	9	175. 0	-2. 00 ^[19]	12. 55 ^[19]
盐酸特比萘芬	Terbinafine	5	250. 0	5. 81 ^[22]	8. 94 ^[20]
氧氟沙星	Ofloxacin	10	600. 0	-0. 39 ^[21]	5. 45 ^[20]
依诺沙星	Enoxacin	30	400. 0	-0. 20 ^[19]	5. 50 ^[19]
乙酰麦迪霉素	Midecamycin	4	900. 0	2. 22 ^[19]	6. 90 ^[19]
柱晶白霉素	kitasamycin	7	1 000. 0	2. 72 ^[19]	12. 68 ^[19]
左氧氟沙星	Levofloxacin	10	160. 0	0. 63 ^[19]	14. 00 ^[19]
唑啉头孢菌素	Cefazolin	4	1 500. 0	-0. 58 ^[20]	3. 03 ^[20]

构建 SSD 曲线得到反映 95% 物种未受影响的浓度 (hazardous concentration for 5% of species, HC₅)

值^[26]. 3 种测试类群(藻类、蚤类和鱼类)的毒理学数据来源于 US EPA 的 ECOTOX 毒性数据库、瑞典

药品数据库和已发表文献等. 对于毒理学数据, 选择毒性终点为半致死浓度 (median lethal concentration, LC_{50}) 或半效应浓度 (median effect concentration, EC_{50}). 同物种有多个毒理学数据可用时, 取其几何平均值为物种平均毒性值. SSD 模型外推法采用敏感生物的毒性值除以相应的评价因子^[27] [公式 (7)].

$$PNEC_1 = HC_5 / AF \tag{7}$$

式中, $PNEC_1$ 表示预测无效浓度; HC_5 表示应用 SSD 模型外推法构建毒理学数据 (LC_{50} 和 EC_{50}) 敏感性分布曲线, 得到的 5% 危害浓度值; AF (assessment factor) 表示评价因子 (取值范围为 1 ~ 5), 保守评估取值为 5^[23].

1.3.3 顶端效应评估

通过 TGD 给出的算法 [公式 (8)] 来估算每种抗生素的预测无效浓度 (predicted no-effect concentrations, $PNEC$). 抗生素顶端效应生态毒理学标准测试终点, 包括生长抑制, 死亡率, 繁殖等, 将生态毒理学数据用于危害特征分析. 安全系数 (assessment factor, AF) 根据 TGD 中的建议选择.

$$PNEC_2 = EcoTox / AF \tag{8}$$

式中, $PNEC_2$ 表示预测无效浓度; $EcoTox$ 表示有关水生生物或区室的最敏感的生态毒理学数据 (most sensitive ecotoxicological data for the aquatic or compartment, $EcoTox$), $mg \cdot L^{-1}$; AF 表示安全系数 (急性实验数据 = 100; 急性预测数据 = 1 000; 慢性实验数据 = 10; 慢性预测数据 = 100).

1.3.4 高风险抗生素评价方法

确定水生环境中抗生素的优先次序, 采用 RS 得分高低进行排序, 即通过上述暴露指数除以相应的效应浓度 ($EI_{sw} / PNEC_1$ 和 $EI_{sw} / PNEC_2$) 来估算. 本研究包括 3 种方案: 方案 1 = $EI_{sw} / PNEC_1$; 方案 2 = $EI_{sw} /$ 急性 $PNEC_2$; 方案 3 = $EI_{sw} /$ 慢性 $PNEC_2$. 排名靠前的物质被视为更高的优先级.

2 结果与分析

2.1 地表水暴露指数

在本研究中, 获得了 53 种抗生素列表, 用于进一步筛选确定优先次序. 这些抗生素 EI_{sw} 变化了 7 个数量级, 范围为 $1.27 \times 10^{-5} \sim 134.36$, 其中哌拉西林 (134.335 20)、舒巴坦 (94.551 28)、头孢呋辛 (54.559 31)、头孢吡肟 (22.889 48) 和头孢哌酮 (17.937 99) 的 EI_{sw} 最高 (表 2). 从表 2 中可知, 抗生素几乎都不能被人体完全代谢, 其中头孢羟氨苄和地红霉素 F_{exc} 分别高达 90.00% 和 89.00%; 利福昔明和乙酰麦迪霉素的 F_{exc} 分别为 0.03% 和 3.30%.

表 2 抗生素未经代谢的分数和地表水暴露指数¹⁾

Table 2 Active antibiotics with unchanged excretion and exposure index data for surface waters

化合物名称	$F_{exc} / \%$	EI_{sw}
阿洛西林	60.00 ^[28]	13.387 67
阿莫西林	25.00 ^[29]	0.018 77
阿奇霉素	50.00 ^[28]	0.557 86
氨苄西林	25.00 ^[30]	16.247 49
比阿培南	77.00 ^[31]	0.921 69
地红霉素	89.00 ^[28]	0.000 16
法罗培南	30.00 ^[32]	0.627 25
氟罗沙星	67.50 ^[28]	3.429 91
氟氯西林	71.00 ^[28]	2.464 53
红霉素	5.00 ^[19]	0.000 17
环丙沙星	32.50 ^[21]	0.388 84
加替沙星	100.00 ^a	13.128 80
克拉霉素	62.10 ^[29]	0.156 87
克林霉素	13.60 ^[19]	8.782 44
利福平	30.00 ^[29]	1.950 72
利福昔明	0.03 ^[19]	0.000 94
磷霉素	100.00 ^a	0.599 07
罗红霉素	53.00 ^[29]	0.000 22
洛美沙星	65.00 ^[20]	3.895 83
美罗培南	70.00 ^[19]	4.196 91
美洛西林	52.50 ^[28]	17.771 82
米诺环素	100.00 ^a	0.796 69
奈替米星	80.00 ^[28]	6.466 24
帕珠沙星	100.00 ^a	13.465 15
哌拉西林	100.00 ^[19]	134.335 20
普卢利沙星	100.00 ^a	0.791 09
舒巴坦	80.00 ^[19]	94.551 28
舒他西林	60.00 ^[33]	4.341 15
司帕沙星	63.00 ^[34]	0.816 68
头孢吡肟	85.00 ^[19]	22.889 48
头孢丙烯	80.00 ^[28]	1.194 19
头孢泊肟	72.50 ^[33]	1.443 89
头孢呋辛	47.50 ^[33]	54.559 31
头孢甲肟	100.00 ^[28]	2.991 01
头孢克洛	72.50 ^[19]	7.321 61
头孢克肟	100.00 ^[28]	4.979 24
头孢美唑	100.00 ^[28]	14.946 46
头孢哌酮	100.00 ^[33]	17.937 99
头孢羟氨苄	90.00 ^[19]	0.009 42
头孢曲松	55.00 ^[29]	4.941 41
头孢噻肟	55.00 ^[28]	4.931 86
头孢他啶	15.00 ^[29]	2.991 70
头孢替安	64.00 ^[33]	3.830 60
头孢唑肟	100.00 ^[19]	9.314 58
妥布霉素	20.00 ^[35]	5.38×10^{-5}
西索米星	75.00 ^[36]	6.5×10^{-5}
盐酸特比萘芬	70.00 ^[30]	0.139 75
氧氟沙星	72.50 ^[19]	2.168 68
依诺沙星	56.00 ^[28]	3.349 77
乙酰麦迪霉素	3.30 ^[19]	0.012 73
柱晶白霉素	7.64 ^[37]	1.27×10^{-5}
左氧氟沙星	35.00 ^[28]	0.000 13
唑啉头孢菌素	25.00 ^[29]	0.747 31

1) “a”表示文献中未报道, 假定以原药形式未经代谢完全从人体排出, 取值 100.00

2.2 SSD 模型拟合

收集到 10 种抗生素的毒理学数据,其中红霉素、氨苄西林和阿莫西林的毒性数据分别多达 19、13 和 10 个物种,用以描述抗生素对一系列物种的生态风险(表 3). SSD 模型拟合结果显示克拉霉素(0.016

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、氨苄西林($0.282\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、阿奇霉素($0.640\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、阿莫西林($0.789\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和红霉素($4.188\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的 HC_5 最小(表 4),数值越小表示抗生素对水生生物的影响越大.因评价因子的选择较为保守,抗生素的风险在一定程度上存在低估.

表 3 10 种抗生素的毒性数据
Table 3 Toxicity data of 10 antibiotics

化合物名称	水生物种	测试结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	化合物名称	水生物种	测试结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
阿莫西林	螺旋鱼腥藻	56 300.00 ^[38]	环丙沙星	近具刺链带藻	100 000.00 ^[35]
	铜绿微囊藻	3.70 ^[38]		羊角月牙藻	9 503.74 ^[38]
	羊角月牙藻	972 111.10 ^[38]		铜绿微囊藻	9.22 ^[38]
	聚球藻	2.22 ^[39]		羊角月牙藻	2 970.00 ^[35]
	多刺裸腹蚤	1 000 000.00 ^[38]		小球藻	20 610.00 ^[41]
	大型蚤	1 320 006.00 ^[35]		亚心形扁藻	28 700.00 ^[42]
	斑马鱼	132 400.00 ^[38]		大型蚤	1 587.26 ^[38]
	青鳉鱼	1 000 000.00 ^[38]		孔雀鱼	350 000.00 ^[43]
	蓝鳃太阳鱼	930 000.00 ^[35]		东部食蚊鱼	60 000.00 ^[35]
	日本金鳉鱼	1 000 000.00 ^[35]	克拉霉素	羊角月牙藻	10.03 ^[39]
阿奇霉素	绿藻	3.70 ^[40]		玛氏骨条藻	0.15 ^[9]
	玛氏骨条藻	214.00 ^[9]		大型蚤	19 071.86 ^[39]
	羊角月牙藻	500.00 ^[9]		模糊网纹蚤	14 163.52 ^[38]
	大型蚤	109 544.50 ^[40]		青鳉鱼	100 000.00 ^[38]
氨苄西林	虹鳟鱼	84 000.00 ^[40]	罗红霉素	水华鱼腥藻	211.00 ^[35]
	惠氏微囊藻	13.00 ^[38]		羊角月牙藻	47.00 ^[35]
	铜绿微囊藻	3.23 ^[38]		绿藻	4 120.00 ^[44]
	多变鱼腥藻	2 200.00 ^[38]		大型蚤	26 645.83 ^[35]
	柱胞鱼腥藻	140.00 ^[38]		斑马鱼	100 000.00 ^[35]
	水华鱼腥藻	3 300.00 ^[38]		虹鳟鱼	100 000.00 ^[35]
	小球藻	1 000 000.00 ^[38]	洛美沙星	羊角月牙藻	22 700.00 ^[38]
	转基因聚球藻	6.90 ^[38]		铜绿微囊藻	186.00 ^[38]
	聚球藻	83.00 ^[38]		骨条藻	2 840.00 ^[45]
	球形念珠藻	200 000.00 ^[38]		大型蚤	130 000.00 ^[45]
	羊角月牙藻	1 483 240.00 ^[38]		大型蚤	420 000.00 ^[45]
	多刺裸腹蚤	1 000 000.00 ^[38]	红霉素	水华鱼腥藻	270.00 ^[38]
	大型蚤	1 000 000.00 ^[38]		螺旋鱼腥藻	22.00 ^[38]
	青鳉鱼	1 000 000.00 ^[38]		柱胞鱼腥藻	35.00 ^[38]
氧氟沙星	羊角月牙藻	9 820.36 ^[38]		多变鱼腥藻	430.00 ^[38]
	铜绿微囊藻	19.28 ^[38]		镰形纤维藻	10 000.00 ^[38]
	螺旋鱼腥藻	4 800.00 ^[38]		小球藻	20 139.51 ^[38]
	大型蚤	9 546.98 ^[38]		铜绿微囊藻	23.00 ^[38]
	模糊网纹蚤	7 381.96 ^[38]		惠氏微囊藻	23.00 ^[38]
	多刺裸腹蚤	239 039.75 ^[38]		球形念珠藻	200.00 ^[38]
	青鳉鱼	100 000.00 ^[38]		羊角月牙藻	67.97 ^[38]
左氧氟沙星	螺旋鱼腥藻	4 800.00 ^[38]		聚球藻	160.00 ^[38]
	铜绿微囊藻	7.90 ^[38]		转基因聚球藻	230.00 ^[38]
	羊角月牙藻	29 799.33 ^[38]		模糊网纹蚤	4 302.54 ^[38]
	大型蚤	10 000.00 ^[35]		长刺蚤	24 000.00 ^[38]
	青鳉鱼	100 000.00 ^[38]		大型蚤	99 590.42 ^[38]
	呆鲦鱼	10 000.00 ^[35]		多刺裸腹蚤	135 520.00 ^[38]
				条纹鲈鱼	584 551.00 ^[38]
				青鳉鱼	100 000.00 ^[38]
				湖红点鲑鱼	703 009.90 ^[38]

2.3 顶端效应

从相关文献和在线数据库中收集到 16 种抗生素顶端终点标准测试类群(藻类、蚤类和鱼类)的急

性和慢性生态毒理学数据,如果出现一种抗生素有多个生态毒理学数据可用的情况,使用最低值进行危害特征分析.通过这种方法,认为已经考虑了最敏

感的物种. 对于大多数抗生素而言,生态毒理学数据是基于对藻类和蚤类的测试,没有实验数据的抗生素,使用 ECOSAR(USEPI 4.1)^[46] 模型来填补空白(表5).

2.4 抗生素风险排序

本文的研究方法是对以前评价模型的筛选优化,基于 SSD 方法,方案1 排名最高的是氨苄西林、克拉霉素、阿奇霉素、氧氟沙星和洛美沙星. 根据顶端效应,方案2 排名最高的是克拉霉素、阿莫西林、头孢克洛、氧氟沙星和洛美沙星,而方案3 排名最高的是环丙沙星、克拉霉素、阿莫西林、哌拉西林和利福平(表6).

表4 10 种抗生素的 HC₅ 和风险评估

Table 4 HC ₅ and risk scores of 10 antibiotics		
化合物名称	HC ₅ /μg·L ⁻¹	Elsw/PNEC ₁
阿莫西林	0.789	0.118 96
阿奇霉素	0.640	3.065 30
氨苄西林	0.282	288.076 00
红霉素	4.188	0.000 20
环丙沙星	38.206	0.050 89
克拉霉素	0.016	49.021 21
罗红霉素	9.723	0.000 11
洛美沙星	76.527	0.254 54
氧氟沙星	31.197	0.347 58
左氧氟沙星	9.982	0.232 06

表5 抗生素对藻类、蚤类和鱼类的毒性数据及风险评估

Table 5 Toxicity data and risk scores of antibiotics for algae, daphnia, and fish					化合物名称	水生物种	时间	测试结果 /mg·L ⁻¹	Elsw/PNEC ₂
阿洛西林	藻类	急性	256.320 ^[46]	5.223 03	头孢呋辛	藻类	急性	91.000 ^[49]	599.552 86
	蚤类	慢性	34.812 ^[46]	3.845 70		藻类	慢性	365.513 ^[46]	1.492 68
阿莫西林	藻类	急性	0.002 22 ^[44]	8 455.930 30	头孢甲肟	藻类	急性	1387.842 ^[46]	0.215 52
	藻类	慢性	0.000 78 ^[39]	2 406.687 90		藻类	慢性	447.255 ^[46]	0.066 88
阿奇霉素	蚤类	急性	29.977 ^[46]	1.308 87	头孢克洛	藻类	急性	1.550 ^[49]	4 723.621 50
	蚤类	慢性	4.024 ^[46]	0.975 05		蚤类	慢性	285.352 ^[46]	0.256 58
氨苄西林	蚤类	急性	1 000.000 ^[47]	16.247 49	头孢克肟	藻类	急性	17 659.650 ^[46]	0.028 20
	藻类	慢性	40.636 ^[46]	3.998 30		藻类	慢性	2 528.492 ^[46]	0.019 69
氟罗沙星	藻类	急性	2 888.583 ^[46]	0.118 74	头孢美唑	藻类	急性	17 659.650 ^[46]	0.084 64
	蚤类	慢性	482.587 ^[46]	0.071 07		藻类	慢性	2 528.492 ^[46]	0.059 11
红霉素	蚤类	急性	10.230 ^[48]	0.017 00	头孢哌酮	藻类	急性	10 621.171 ^[46]	0.168 89
	蚤类	慢性	0.220 ^[48]	0.079 03		藻类	慢性	1 691.019 ^[46]	0.106 08
环丙沙星	蚤类	急性	10.000 ^[34]	38.884 25	头孢羟氨苄	藻类	急性	3 451.470 ^[46]	0.000 27
	藻类	慢性	0.001 ^[34]	38 884.246 00		蚤类	慢性	585.466 ^[46]	0.000 16
克拉霉素	藻类	急性	0.002 ^[39]	78 433.944 00	头孢曲松	蚤类	急性	100.000 ^[49]	49.414 09
	藻类	慢性	0.003 ^[39]	5 228.929 60		藻类	慢性	365.513 ^[46]	0.135 19
克林霉素	藻类	急性	145.980 ^[46]	6.016 20	头孢噻肟	藻类	急性	1 392.929 ^[46]	0.354 06
	藻类	慢性	19.094 ^[46]	4.599 58		蚤类	慢性	216.217 ^[46]	0.228 10
利福平	蚤类	急性	3 300.000 ^[34]	0.591 13	头孢他啶	蚤类	急性	106.000 ^[49]	28.223 57
	蚤类	慢性	0.791 ^[46]	24.661 38		藻类	慢性	5 330.488 ^[46]	0.005 61
磷霉素	藻类	急性	13 347.660 ^[46]	0.004 49	头孢替安	藻类	急性	40 913.742 ^[46]	0.009 36
	藻类	慢性	1 691.029 ^[46]	0.003 54		藻类	慢性	5 330.403 ^[46]	0.007 19
罗红霉素	藻类	急性	0.047 ^[34]	4.772 78	妥布霉素	藻类	急性	38 100 000 ^[46]	1.413 × 10 ⁻¹⁰
	蚤类	慢性	10.478 ^[46]	0.000 21		藻类	慢性	2 020 000 ^[46]	2.664 × 10 ⁻¹⁰
洛美沙星	藻类	急性	2.840 ^[45]	1 371.771 50	西索米星	藻类	急性	926 000 ^[46]	7.02 × 10 ⁻⁹
	蚤类	慢性	290.784 ^[46]	0.133 98		藻类	慢性	79 021.164 ^[46]	8.226 × 10 ⁻⁹
美洛西林	藻类	急性	97.908 ^[46]	18.151 55	盐酸特比萘芬	藻类	急性	14 570.000 ^[49]	0.009 59
	蚤类	慢性	12.182 ^[46]	14.588 59	氧氟沙星	藻类	急性	1.440 ^[48]	1 506.027 40
米诺环素	藻类	急性	7 489.707 ^[46]	0.010 64		藻类	慢性	696.977 ^[46]	0.031 12
	藻类	慢性	1 193.188 ^[46]	0.006 68	依诺沙星	藻类	急性	3 771.045 ^[46]	0.088 83
奈替米星	藻类	急性	214 000.000 ^[46]	0.003 02		藻类	慢性	626.876 ^[46]	0.053 44
	藻类	慢性	22 241.957 ^[46]	0.002 91	柱晶白霉素	藻类	急性	2.300 ^[38]	0.005 52
哌拉西林	藻类	急性	234.334 ^[46]	57.326 36		蚤类	慢性	3.367 ^[46]	3.772 × 10 ⁻⁵
	蚤类	慢性	31.321 ^[46]	42.889 81	左氧氟沙星	蚤类	急性	10.000 ^[34]	0.012 70
头孢吡肟	蚤类	急性	640.000 ^[49]	35.764 81		藻类	慢性	7.400 ^[34]	0.001 72
	蚤类	慢性	524.413 ^[46]	0.436 48	喹啉头孢菌素	藻类	急性	126 000 ^[46]	0.000 59
头孢丙烯	藻类	急性	1 088.937 ^[46]	0.109 67		藻类	慢性	13 935.757 ^[46]	0.000 54
	藻类	慢性	167.849 ^[46]	0.071 15					

表 6 SSD 和顶端效应优先排序前 20 种抗生素

Table 6 Top 20 priority antibiotics based on SSD and apical effects

排名	Elsw/PNEC ₁	Elsw/急性 PNEC ₂	Elsw/慢性 PNEC ₂
1	氨苄西林	克拉霉素	环丙沙星
2	克拉霉素	阿莫西林	克拉霉素
3	阿奇霉素	头孢克洛	阿莫西林
4	氧氟沙星	氧氟沙星	哌拉西林
5	洛美沙星	洛美沙星	利福平
6	左氧氟沙星	头孢呋辛	美洛西林
7	阿莫西林	哌拉西林	克林霉素
8	环丙沙星	头孢曲松	氨苄西林
9	红霉素	环丙沙星	阿洛西林
10	罗红霉素	头孢吡肟	头孢呋辛
11		头孢他啶	阿奇霉素
12		美洛西林	红霉素
13		氨苄西林	头孢吡肟
14		克林霉素	头孢克洛
15		阿洛西林	头孢噻肟
16		罗红霉素	头孢曲松
17		阿奇霉素	洛美沙星
18		利福平	头孢哌酮
19		头孢噻肟	红霉素
20		头孢甲肟	头孢甲肟

3 讨论

SSD 法从生态系统的角度来描述和分析抗生素对一系列水生生物种的毒性,计算保护 95% 的水生生物的阈值,一定程度上解决了传统方法的不确定性,可以有效地评估抗生素的生态风险^[50]. 但是对于大多数抗生素,水生生态毒理学数据是有限或不存在的,无法对所有抗生素进行生态风险评价. 因此,本研究优化了现有的药物排序方法,对我国抗生素药品的生态风险进行优先排序评估. 由于我国缺乏抗生素药品的使用数据,因此使用每种抗生素的商品数量乘以平均日剂量当作其使用数据的替代来估计暴露指数. 通过 SSD 法和顶端效应的风险组合,将 3 个排名结果合并以生成 20 个优先抗生素的最终列表,其中克拉霉素、环丙沙星、阿莫西林、头孢克洛、氧氟沙星、洛美沙星、头孢呋辛、哌拉西林、头孢曲松和头孢吡肟的风险评分最高. 该模型也用于 Guo 等^[49] 对中国和 Aubakirova 等^[16] 对哈萨克斯坦药品进行优先排序研究,本研究结果与哈萨克斯坦等国家开展的抗生素风险评估所获得的最高级优先排序结果有相似之处. 有研究结果表明排名靠前的抗生素有必要引起足够的重视,例如,在当前研究中具有最高风险评分的克拉霉素、阿莫西林在哈萨克斯坦进行的基于生态毒理学风险的优先化研究中同样被确定为高优先级^[16]. 克拉霉素分别在英国^[13]、意大利^[51] 和法国^[52] 药物优先排序中排名第 7、第 11 和第 7 位. 氧氟沙星在意大利^[51] 和法国^[52] 药物风险排序中排名第 1 和第 3 位. 阿莫西林被确定为

英国^[13]、哈萨克斯坦^[16]、法国^[52] 和韩国^[53] 水生环境中的高风险化合物. 另外环丙沙星是英国^[13]、意大利^[51] 和韩国^[53] 研究中对水生生物有害的优先化合物之一.

目前,在本研究排名列表中的大多抗生素已在世界各地的地表水监测中被发现,其中排名靠前的抗生素被频繁检出,浓度范围在 ng ~ μg 级别. 这为该方法应用于我国抗生素药品优先排序提供了基础依据. 已有研究报道了阿莫西林及其降解产物在日本熊本市的污水处理厂出水的范围为 100 ~ 3 000 ng·L⁻¹^[54],在澳大利亚昆士兰州检出浓度为 280 ~ 6 940 ng·L⁻¹^[55,56],美国纽约为 367 ng·L⁻¹^[57]. Valcárcel 等^[58] 的研究发现,克拉霉素、环丙沙星、氧氟沙星在西班牙的主要河流中检出浓度为 235、3 和 179 ng·L⁻¹. 在中国胶州湾附近的河流中检出克拉霉素、阿奇霉素的平均浓度分别为 11 ng·L⁻¹ 和 4 ng·L⁻¹^[59].

由于抗生素的功能性抗菌活性,进入环境后可对微生物、动植物的生长和发育造成显著的毒害作用^[60]. 目前已有大量研究表明,排名中的大多数抗生素会对水生生物产生不利影响,具有毒性效应. 例如 Singh 等^[61] 研究了阿莫西林在短期暴露 7 d 期间对紫萍 (*Spirodela polyrrhiza*) 的植物毒性,他们的结果表明即使在与环境相关的低浓度 (0.0001 ~ 0.001 mg·L⁻¹) 情况下,阿莫西林也对紫萍的营养生长产生了重大影响. 克拉霉素对微藻 (*Pseudokirchneriella subcapitata*) 和水蚤 (*Daphnia magna*) 的毒性测试结果表明,这种化合物主要引起微藻和水蚤的生长抑制,其 EC₅₀ 值分别为 11 μg·L⁻¹ 和 40 μg·L⁻¹^[62]. 环丙沙星对大型水生植物的抑制实验中,经过 7 d 的暴露期,对小浮萍 (*Lemna minor*) 的 EC₅₀ 值为 0.203 mg·L⁻¹,对膨胀浮萍 (*Lemna gibba*) 的 EC₅₀ 值为 0.697 mg·L⁻¹^[63]. 另外 Nogueira 等^[64] 的研究结果表明,环丙沙星对斑马鱼 (zebrafish) 的行为测试和生物标志物产生了直接影响. 说明抗生素除对微生物、植物有显著的毒害作用外,对动物也有较强的负面效应. 值得关注的是,由于抗生素的滥用,ARGs 的出现成为当前严重的环境问题之一. 文汉卿等^[65] 指出 ARGs 会在人体内积少成多,增强人体细胞的耐药性,当致病菌获得多重 ARGs 后,既具有致病性又具有多重耐药性,对人体健康和生态安全构成巨大威胁.

由于缺少抗生素商品的使用数据,因此本研究的优先排序结果是基于抗生素商品的国家审批数量信息. 研究中如能采用抗生素的实际消费数据可以获得更为精确的结果,但是目前我国并未开展这方

面的统计核算,建议开发建立有关抗生素药品的年度使用消费量数据库。此外,吸收到体内的抗生素通过代谢并以其他物质的形式释放到环境中,可能会对水生生物产生不利影响,但是在该优先排序中没有考虑母体化合物的代谢物。对于缺少代谢数据的抗生素,假设没有发生生物降解和转化,完全从体内排出,这种情况下可能会高估其风险评分。对于没有可用代谢数据的抗生素,建议构建代谢产物毒性和性质相关信息。本文的研究方法也存在抗生素风险评估的不确定性,对于无法收集到的生态毒理学数据,通过建模来填补。

4 结论

(1) 少于 4 种商品的某类抗生素使用数量较少,对水生环境风险较小,因此不予统计,从国家药品监督管理局数据库检索,初次筛选获得了 53 种抗生素。

(2) 抗生素 EI_{sw} 变化范围为 $1.27 \times 10^{-5} \sim 134.36$; HC_5 变化范围为 $0.016 \sim 76.527$ 。风险评价结果表明在我国环境水体 20 个优先抗生素值得关注。

(3) 不同风险评估组合后表明,应当高度优先关注克拉霉素、环丙沙星、阿莫西林、头孢克洛和氧氟沙星。当然由于我国抗生素研究还缺乏很多基础毒理学数据,尤其是广大北方水体的抗生素急慢性毒性数据更是欠缺,有必要通过进一步分析测试水体环境中的污染浓度,以更客观地全面评估生态环境的风险水平。

参考文献:

- [1] Demain A L, Sanchez S. Microbial drug discovery: 80 years of progress[J]. The Journal of Antibiotics, 2009, **62**(1): 5-16.
- [2] 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.
- [3] Junaid M, Wang Y, Hamid N, et al. Prioritizing selected PPCPs on the basis of environmental and toxicogenetic concerns: a toxicity estimation to confirmation approach[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **380**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120828.
- [4] 汪涛, 杨再福, 陈勇航, 等. 磺胺类抗性基因的产生及演变研究进展[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(11): 1251-1255. Wang T, Yang Z F, Chen Y H, et al. Review on the production and evolution of sulfonamide resistance genes[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, **39**(11): 1251-1255.
- [5] Knapp C W, Dolfing J, Ehler P A I, et al. Evidence of increasing antibiotic resistance gene abundances in archived soils since 1940[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(2): 580-587.
- [6] 高立红, 史亚利, 厉文辉, 等. 抗生素环境行为及其环境效应研究进展[J]. 环境化学, 2013, **32**(9): 1619-1633. Gao L H, Shi Y L, Li W H, et al. Environmental behavior and impacts of antibiotics[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(9): 1619-1633.
- [7] Huggett D B, Cook J C, Ericson J F, et al. A theoretical model for utilizing mammalian pharmacology and safety data to prioritize potential impacts of human pharmaceuticals to fish[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2003, **9**(7): 1789-1799.
- [8] Tran N H, Hoang L, Nghiem L D, et al. Occurrence and risk assessment of multiple classes of antibiotics in urban canals and lakes in Hanoi, Vietnam[J]. Science of the Total Environment, 2019, **692**: 157-174.
- [9] Minguez L, Pedelucq J, Farcy E, et al. Toxicities of 48 pharmaceuticals and their freshwater and marine environmental assessment in northwestern France[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(6): 4992-5001.
- [10] Guo J H, Selby K, Boxall A B A. Comparing the sensitivity of chlorophytes, cyanobacteria, and diatoms to major-use antibiotics[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, **35**(10): 2587-2596.
- [11] 张晓哈, 万甜, 程文, 等. 喹诺酮类和磺胺类抗生素对绿藻生长的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(4): 115-120. Zhang X H, Wan T, Cheng W, et al. Effects of quinolones and sulfonamides on the growth of green algae[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, **29**(4): 115-120.
- [12] Kümmerer K, Henninger A. Promoting resistance by the emission of antibiotics from hospitals and households into effluent[J]. Clinical Microbiology and Infection, 2003, **9**(12): 1203-1214.
- [13] Guo J H, Sinclair C J, Selby K, et al. Toxicological and ecotoxicological risk-based prioritization of pharmaceuticals in the natural environment[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, **35**(6): 1550-1559.
- [14] De García S O, Pinto G P, García-Encina P A, et al. Ranking of concern, based on environmental indexes, for pharmaceutical and personal care products: an application to the Spanish case[J]. Journal of Environmental Management, 2013, **129**: 384-397.
- [15] Cooper E R, Siewicki T C, Phillips K. Preliminary risk assessment database and risk ranking of pharmaceuticals in the environment[J]. Science of the Total Environment, 2008, **398**(1-3): 26-33.
- [16] Aubakirova B, Beisenova R, Boxall A B A. Prioritization of pharmaceuticals based on risks to aquatic environments in Kazakhstan[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2017, **13**(5): 832-839.
- [17] Al-Khazraji O S A, Boxall A B A. Risk-based prioritization of pharmaceuticals in the natural environment in Iraq[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(15): 15712-15726.
- [18] 国家药品监督管理局. 国产药品商品名[EB/OL]. http://app1.nmpa.gov.cn/data_nmpa/face3/base.jsp?tableId=32&tableName=TABLE32&title=%B9%FA%B2%FA%D2%A9%C6%B7%C9%CC%C6%B7%C3%FB&id=152904813882776432084296368957, 2018-11-02.
- [19] DrugBank. Drug and drug target database[EB/OL]. <https://www.drugbank.ca/>, 2018-11-20.
- [20] Wishart D S, Knox C, Guo A C, et al. DrugBank: a comprehensive resource for *in silico* drug discovery and exploration[J]. Nucleic Acids Research, 2006, **34**(S1): D668-D672.

- [21] Kim S, Thiessen P A, Bolton E E, *et al.* PubChem substance and compound databases[J]. *Nucleic Acids Research*, 2016, **44** (D1): D1202-D1213.
- [22] ChemSpider. Search and share chemistry [EB/OL]. <http://www.chemspider.com/>, 2018-11-20.
- [23] European Commission. Technical guidance document on risk assessment[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [24] Franco A, Trapp S. Estimation of the soil-water partition coefficient normalized to organic carbon for ionizable organic chemicals[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(10): 1995-2004.
- [25] Struijs J, Stoltenkamp J, van de Meent D. A spreadsheet-based box model to predict the fate of xenobiotics in a municipal wastewater treatment plant[J]. *Water Research*, 1991, **25**(7): 891-900.
- [26] van Vlaardingen P, Traas T P, Wintersen A, *et al.* ETX 2.0. A program to calculate hazardous concentrations and fraction affected, based on normally distributed toxicity data[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/27452022_ETX_2_0_A_Program_to_Calculate_Hazardous_Concentrations_and_Fraction_Affected_Based_on_Normally_Distributed_Toxicity_Data, 2018-11-20.
- [27] Zhao W X, Wang B, Wang Y J, *et al.* Deriving acute and chronic predicted no effect concentrations of pharmaceuticals and personal care products based on species sensitivity distributions [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **144**: 537-542.
- [28] 药智数据. 合理用药-药品说明书 [EB/OL]. <https://db.yaozh.com/instruct>, 2018-11-20.
- [29] Medsafe. Medicines-Medicine information [EB/OL]. <https://www.medsafe.govt.nz/Medicines/medicine-information.asp>, 2018-11-20.
- [30] Foulds G. Pharmacokinetics of sulbactam/ampicillin in humans: a review[J]. *Reviews of Infectious Diseases*, 1986, **8** (S5): S503-S511.
- [31] 张爱丽, 兰婷, 李穆琼, 等. HPLC 法测定人血浆中比阿培南的浓度及其药动学研究[J]. *中国医药导报*, 2011, **8**(35): 75-77.
- Zhang A L, Lan T, Li M Q, *et al.* Studies on the concentration and bioequivalence of the Biapenem in human plasma by HPLC [J]. *China Medical Herald*, 2011, **8**(35): 75-77.
- [32] 沈金芳, 孙黎, 苏克剑, 等. 法罗培南钠在健康受试者单剂量及多剂量静脉滴注的药代动力学研究[J]. *中国药理学通报*, 2010, **26**(3): 392-396.
- Shen J F, Sun L, Su K J, *et al.* Pharmacokinetics of faropenem sodium for injection after a single and multiple intravenous dose in healthy volunteers [J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2010, **26**(3): 392-396.
- [33] 医学百科. 药物百科-抗生素类 [EB/OL]. <https://www.wiki8.com/>, 2018-11-20.
- [34] 于彤, 吴干斌, 李晓天, 等. 司帕沙星的药代动力学与药效学研究[J]. *中国临床药理学杂志*, 2014, **30**(8): 681-684.
- Yu T, Wu G B, Li X T, *et al.* Pharmacokinetic/pharmacodynamic study of sparfloxacin[J]. *The Chinese Journal of Clinical Pharmacology*, 2014, **30**(8): 681-684.
- [35] FASS. FASS Allmänhet-Startsida [EB/OL]. <https://www.fass.se/LIF/startpage/>, 2018-12-04.
- [36] 王庆玲. 西索米星药物的动力学特点及临床用药[J]. *中国现代应用药学*, 2004, **21**(8): 100.
- [37] 钱元恕, 王其南, 蒋玉富. 柱晶白霉素的人体药代动力学[J]. *中国抗生素杂志*, 1990, **15**(2): 131-136.
- Qian Y S, Wang Q N, Jiang Y F. Pharmacokinetic study of leucomycin in healthy volunteers [J]. *Chinese Journal of Antibiotics*, 1990, **15**(2): 131-136.
- [38] US Environmental Protection Agency. Ecotox database [EB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/ecotox/search.cfm>, 2019-07-05.
- [39] Santos L H M L M, Araújo A N, Fachini A, *et al.* Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 45-95.
- [40] Pfizer-Azithromycin Extended Release for Oral Suspension. Material safety data sheet [EB/OL]. http://www.pfizer.com/files/products/material_safety_data/696.pdf, 2018-12-20.
- [41] 聂湘平, 王翔, 陈菊芳, 等. 三氯异氰尿酸与盐酸环丙沙星对蛋白核小球藻的毒性效应[J]. *环境科学学报*, 2007, **27** (10): 1694-1701.
- Nie X P, Wang X, Chen J F, *et al.* Toxic effects of trichloroisocyanuric acid and ciprofloxacin hydrochloride on a freshwater alga, *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(10): 1694-1701.
- [42] 连鹏, 葛利云, 邓欢欢, 等. 两种喹诺酮类抗生素对亚心形扁藻的毒性效应研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, **39**(5): 46-48.
- Lian P, Ge L Y, Deng H H, *et al.* Toxic effects of two quinolone antibiotics on *platyomonas subcordiformis* [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, **39**(5): 46-48.
- [43] 房英春, 齐跃, 李莹, 等. 盐酸环丙沙星、恩诺沙星和诺氟沙星对孔雀鱼急性毒性试验研究[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2012, **24**(3): 15-17.
- Fang Y C, Qi Y, Li Y, *et al.* Acute toxicity experience to guppy with ciprofloxacin, HCl, enrofloxacin and norfloxacin [J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2012, **24** (3): 15-17.
- [44] Lee Y J, Lee S E, Lee D S, *et al.* Risk assessment of human antibiotics in Korean aquatic environment [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, **26**(2): 216-221.
- [45] Pfizer-Lomefloxacin Hydrochloride Tablets. Material safety data sheet [EB/OL]. http://www.pfizer.com/files/products/material_safety_data/PZ00368.pdf, 2018-12-20.
- [46] EPA. Download EPI Suite™-Estimation Program Interface v4.11 [EB/OL]. <https://www.epa.gov/tsca-screening-tools/download-epi-suite-estimation-program-interface-v411>, 2018-12-20.
- [47] Park S, Choi K. Hazard assessment of commonly used agricultural antibiotics on aquatic ecosystems[J]. *Ecotoxicology*, 2008, **17**(6): 526-538.
- [48] 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.
- [49] Guo J H, Liu S, Zhou L, *et al.* Prioritizing pharmaceuticals based on environmental risks in the aquatic environment in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **278**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111479.
- [50] 陈锦灿, 方超, 郑榕辉, 等. 应用物种敏感性分布评估微(纳米)塑料对水生生物的生态风险[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15**(1): 242-255.
- Chen J C, Fang C, Zheng R H, *et al.* Assessing ecological risks of micro (nano) plastics to aquatic organisms using species sensitivity distributions [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15**(1): 242-255.
- [51] Zuccato E, Castiglioni S, Fanelli R. Identification of the

- pharmaceuticals for human use contaminating the Italian aquatic environment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **122** (3): 205-209.
- [52] Besse J P, Kausch-Barreto C, Garric J. Exposure assessment of pharmaceuticals and their metabolites in the aquatic environment; application to the French situation and preliminary prioritization [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2008, **14**(4): 665-695.
- [53] Kim Y, Jung J, Kim M, *et al.* Prioritizing veterinary pharmaceuticals for aquatic environment in Korea [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, **26** (2): 167-176.
- [54] Matsuo H, Sakamoto H, Arizono K, *et al.* Behavior of pharmaceuticals in waste water treatment plant in Japan [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(1): 31-35.
- [55] Watkinson A J, Murby E J, Costanzo S D. Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: implications for environmental discharge and wastewater recycling[J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4164-4176.
- [56] Watkinson A J, Murby E J, Kolpin D W, *et al.* The occurrence of antibiotics in an urban watershed: from wastewater to drinking water[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 2711-2723.
- [57] Palmer P M, Wilson L R, O'Keefe P, *et al.* Sources of pharmaceutical pollution in the New York City watershed [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **394**(1): 90-102.
- [58] Valcárcel Y, Alonso S G, Rodríguez-Gil J L, *et al.* Detection of pharmaceutically active compounds in the rivers and tap water of the Madrid Region (Spain) and potential ecotoxicological risk [J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(10): 1336-1348.
- [59] Zhang R J, Tang J H, Li J, *et al.* Occurrence and risks of antibiotics in the coastal aquatic environment of the Yellow Sea, North China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **450-451**: 197-204.
- [60] 李红燕, 陈兴汉. 环境中抗生素的污染现状及危害[J]. *中国资源综合利用*, 2018, **36**(5): 82-84, 95.
- Li H Y, Chen X H. Pollution status and harm of antibiotics in the environment [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, **36**(5): 82-84, 95.
- [61] Singh V, Pandey B, Suthar S. Phytotoxicity of amoxicillin to the duckweed *Spirodela polyrrhiza*: growth, oxidative stress, biochemical traits and antibiotic degradation [J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 492-502.
- [62] Yamashita N, Yasojima M, Nakada N, *et al.* Effects of antibacterial agents, levofloxacin and clarithromycin, on aquatic organisms [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **53**(11): 65-72.
- [63] Nunes B, Veiga V, Frankenbach S, *et al.* Evaluation of physiological changes induced by the fluoroquinolone antibiotic ciprofloxacin in the freshwater macrophyte species *Lemna minor* and *Lemna gibba* [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, **72**, doi: 10.1016/j.etap.2019.103242.
- [64] Nogueira A F, Pinto G, Correia B, *et al.* Embryonic development, locomotor behavior, biochemical, and epigenetic effects of the pharmaceutical drugs paracetamol and ciprofloxacin in larvae and embryos of *Danio rerio* when exposed to environmental realistic levels of both drugs [J]. *Environmental Toxicology*, 2019, **34**(11): 1177-1190.
- [65] 文汉卿, 史俊, 寻昊, 等. 抗生素抗性基因在水环境中的分布、传播扩散与去除研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, **26** (2): 625-635.
- Wen H Q, Shi J, Xun H, *et al.* Distribution, dissemination and removal of antibiotic resistant genes (ARGs) in the aquatic environment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26** (2): 625-635.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDs-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)