

抚仙湖湖滨区典型抗生素污染特征及生态风险评价

张彦辉¹, 雷 鹏¹, 孙承泽¹, 吴沈镇¹, 许文云², 马 灵², 邓冯丹², 高 婷^{3*}, 赵 斌^{2*}

¹中国建筑第八工程局有限公司, 上海

²玉溪师范学院化学与环境工程学院, 云南 玉溪

³云南新时代环保工程有限公司, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年12月4日; 录用日期: 2026年1月12日; 发布日期: 2026年1月26日

摘 要

本研究为评价抚仙湖湖滨区水环境中典型抗生素污染特征及生态风险, 利用高效液相色谱-质谱法检测了抚仙湖湖滨区水环境中典型抗生素。结果表明: 抚仙湖湖滨区水环境中共检出6种抗生素, 浓度范围为nd~14.32 ng/L, 其中磺胺甲噁唑是主要抗生素污染因子, 其检出率和平均浓度分别为100%、7.61 ng/L。利用风险熵值法计算抚仙湖湖滨区水环境中抗生素的RQs值, 结果显示红霉素、磺胺甲噁唑和氧氟沙星呈中等风险, 表明抚仙湖流域湖滨区抗生素对水生生物和生态环境具有潜在风险。

关键词

抚仙湖, 抗生素, 污染特征, 风险评价

Characteristics of Antibiotic Pollution and Ecological Risk Assessment in the Lakeside Area of Fuxian Lake

Yanhui Zhang¹, Peng Lei¹, Chengze Sun¹, Shenzhen Wu¹, Wenyun Xu², Ling Ma², Fengdan Deng², Ting Gao^{3*}, Bin Zhao^{2*}

¹China Construction Eighth Engineering Division Corp., Shanghai

²College of Chemical and Environmental Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

³Yunnan New Era Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Yuxi Yunnan

Received: December 4, 2025; accepted: January 12, 2026; published: January 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张彦辉, 雷鹏, 孙承泽, 吴沈镇, 许文云, 马灵, 邓冯丹, 高婷, 赵斌. 抚仙湖湖滨区典型抗生素污染特征及生态风险评价[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(1): 54-61. DOI: 10.12677/aep.2026.161007

Abstract

This study aimed to evaluate the pollution characteristics and ecological risks of typical antibiotics in the water environment of the lakeside area of Fuxian Lake. High-performance liquid chromatography-mass spectrometry was used to detect typical antibiotics in the water environment of the lakeside area of Fuxian Lake. The results showed that a total of six antibiotics were detected in the water environment of the lakeside area of Fuxian Lake, with concentrations ranging from nd to 14.32 ng/L. Among them, sulfamethoxazole was the main antibiotic pollution factor, with a detection rate and average concentration of 100% and 7.61 ng/L, respectively. The RQs values of antibiotics in the water environment of the lakeside area of Fuxian Lake were calculated using the risk entropy value method. The results showed that erythromycin, sulfamethoxazole and ofloxacin presented moderate risks, indicating that antibiotics in the lakeside area of the Fuxian Lake basin posed potential risks to aquatic organisms and the ecological environment.

Keywords

Fuxian Lake, Antibiotics, Pollution Characteristics, Risk Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 抗生素的作用机制、滥用危害及研究意义

抗生素是生物合成的具有抗病原体活性的次级代谢产物及其衍生物，可在低浓度下选择性抑制或影响其他生物生理进程[1]。这类物质既能抑制细菌增殖，又可通过干扰细胞膜渗透性、抑制细胞壁合成致菌体破裂等机制实现杀菌效果，其问世曾大幅推动人类医疗水平的跃升。然而，抗生素的不合理使用已引发诸多严峻问题：在人体层面，滥用不仅会引发包括过敏性休克在内的毒副作用，还会诱导细菌产生抗药性，并破坏体内正常菌群屏障，给致病微生物侵袭创造可乘之机；在水生生态领域，226种抗生素的毒性试验数据显示，20%的抗生素对海藻呈高毒性($EC_{50} < 1 \text{ mg/L}$)，6%对水蚤为剧毒($EC_{50} < 0.1 \text{ mg/L}$)，约1/3对鱼类具高毒性($EC_{50} < 1 \text{ mg/L}$)，超50%对鱼类存在毒性($EC_{50} < 10 \text{ mg/L}$) [2]，对水生生物生存构成直接威胁；从生态系统整体来看，低浓度抗生素长期暴露会诱导环境中细菌产生抗药性，削弱抗生素对细菌的抑制效能，进而对生态系统稳定形成潜在风险。鉴于抗生素滥用引发的公共健康与生态环境双重危机，深入探究抗生素的环境赋存特征、迁移转化规律及风险防控策略，不仅可为临床合理用药提供科学参考，也能为水生态系统抗生素污染治理、区域生态安全维护提供理论支撑，对推动公共卫生与资源环境领域的协同治理具有重要的现实意义与学术价值。

1.2. 水体抗生素污染背景下抚仙湖抗生素研究的必要性

自1983年起，美国、德国等欧美多国已在地表水中检出抗生素，浓度范围为3.13~450 ng/L。我国作为抗生素生产与使用大国，每年超5万吨抗生素排入环境，致使水体抗生素呈现高检出态势，七大水系均有抗生素检出：珠江 35~2098 ng/L [3]、长江未检出(ND)~1090 ng/L [4]、黄河 1~327 ng/L [5]、辽河

ND~214 ng/L [6]、海河 26~410 ng/L [7]，淮河入洪泽湖口表层水还检出诺氟沙星(NOR)，浓度 14~161 ng/L [8](见表 1)。尽管地表水中抗生素污染多处于几至几百 ng/L 量级，但长江部分水体浓度已高达 1090 ng/L，抗生素污染问题因此受到国内外广泛关注。

Table 1. Antibiotic contamination levels in surface water
表 1. 地表水中抗生素污染水平

区域	主要抗生素	浓度(ng/L)
中国，黄河	氧氟沙星，诺氟沙星	<LOQ~264, <LOQ~300 [9]
中国，海河	磺胺甲基异恶唑	137 [10]
中国，渤海湾	氧氟沙星，诺氟沙星	390, 460 [11]
中国，黄浦江	磺胺二甲基嘧啶	313.44 (5.45) [5]
中国，维多利亚港	脱水红霉素	9.5~486 [12]
美国	磺胺甲基异恶唑，脱水红霉素	40~320, 20~450 [13]
德国，易北河	磺胺甲基异恶唑，红霉素	30~70, 3~40 [14]
法国，塞纳河	磺胺甲基异恶唑	23~69 [15]
日本，多摩川	阿奇霉素，克拉霉素	43~448, 55~254 [16]

抚仙湖作为云南九大高原湖泊之一，淡水蓄量占全国淡水湖泊总蓄量的 9.16% [17]，其水质安全直接关乎周边居民饮水、旅游及灌溉等民生需求。近年来，受旅游业与农业发展影响，抚仙湖生态环境已出现污染，其生态保护对云南生态文明建设意义重大[18]，但现有研究多聚焦于重金属、氮磷等污染物[19]，针对抗生素污染的探究较为匮乏。为此，本研究拟对抚仙湖抗生素浓度及环境风险展开系统探究，以期为该湖抗生素污染防控提供基础数据支撑。

2. 实验材料与方法

2019 年 7 月 30 日，于抚仙湖湖滨区布设 10 个采样点，覆盖大鲫鱼河、直沟河、世家大河等 10 条主要入湖河流对应湖内 10~20 m 处；现场取各点位表层 0~50 cm 处水样混合，取适量水样现场测定水温、pH、ORP、电导率等基础指标(采样点见图 1)，另取 1 L 混合水样装入棕色玻璃瓶，添加 10 mL 甲醇抑制微生物生长，于 0~4℃冷藏运回实验室，24 h 内完成预处理。预处理流程为：经 0.45 μm 滤膜过滤后，加入 Na₂EDTA，通过 HLB 固相萃取柱(经 5 mL 甲醇、5 mL 水活化)，控制流速 8 mL/min，再用 12 mL 水清洗小柱，最后以 6 mL 氨水 - 甲醇(5:95, v/v)洗脱，负压抽干后经氮气吹干洗脱液，定容至 1 mL，装入干冰送中国环境科学研究院检测目标抗生素。

实验采用岛津 8030 高效液相色谱 - 串联质谱仪(配电喷雾离子源)、氮气浓缩仪、固相萃取装置等仪器；试剂包括分析纯抗坏血酸、乙二胺四乙酸二钠，色谱级乙腈、甲酸、甲醇，以及纯度均≥95%的抗生素标准品(标准储备液 1000 μg/mL 通过称取 0.0100 g 标准品用甲醇溶解定容至 10 mL 配制)。色谱条件为柱温 40℃，流动相 A 为含 0.01%甲酸的高纯水、流动相 B 为乙腈，进样体积 10 μL，流速 0.40 mL·min⁻¹。采用内标法定量，质量控制结果显示：各抗生素标准溶液在 5~500 ng/mL 浓度范围内线性关系良好(R² > 0.99)，方法检出限(LODs) 0.01~0.48 ng/mL、定量限(LOQs) 0.02~1.44 ng/mL，0.05 ng/mL 低浓度加标 RSD 0.74%~5.04%，空白加标回收率 90.2%~110.3%，符合检测分析质控要求(结果见表 2)。

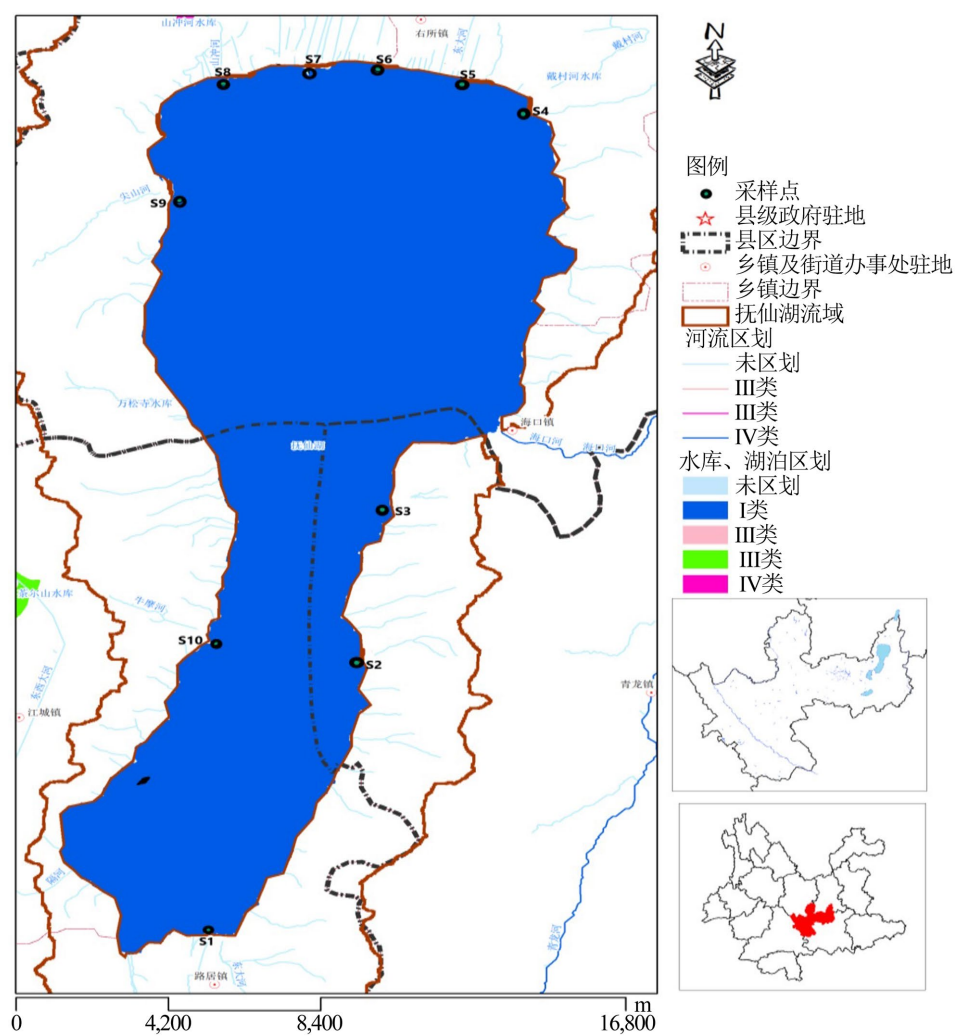


Figure 1. Sampling point distribution map of water environment in Fuxian Lake Lakeside Area
图 1. 抚仙湖湖滨区水环境中采样点分布图

Table 2. Measurement results of typical antibiotics
表 2. 典型抗生素测定结果

抗生素		r ²	回收率(%)	LODs	LOQs	RSD (%)
罗红霉素	RXM	0.9978	102.2	0.01	0.02	0.74
红霉素	EM-H ₂ O	0.9981	95.8	0.12	0.37	2.89
土霉素	OTC	0.9991	92.5	0.04	0.13	2.85
四环素	TCN	0.9969	88.6	0.02	0.06	2.95
金霉素	CTC	0.9997	90.2	0.07	0.22	4.04
磺胺嘧啶	SD	0.9956	90.4	0.01	0.02	0.79
磺胺二甲嘧啶	SMT	0.9974	85.2	0.01	0.02	1.48
磺胺甲噁唑	SMX	0.9935	99.1	0.03	0.1	4.12
氧氟沙星	OFL	0.9962	97	0.02	0.06	4.58
诺氟沙星	NOR	0.9946	93.6	0.08	0.25	5.04
环丙沙星	CIP	0.9959	102.5	0.48	1.44	4.98
恩诺沙星	ENR	0.9973	110.3	0.01	0.02	4.18

3. 结果与讨论

3.1. 抚仙湖湖滨区抗生素浓度水平

抚仙湖湖滨区 10 个采样点共检出 6 种抗生素，分别为磺胺甲噁唑(SMX)、氧氟沙星(OFL)、罗红霉素(RXM)、红霉素(EM-H₂O)、磺胺二甲嘧啶(SMT)和磺胺嘧啶(SD)，浓度范围为 nd~14.32 ng/L，整体低于国内河流抗生素平均值(303 ng/L)，处于中等低下污染水平[20]。其中 SMX 和 OFL 为主要污染因子，检出率均达 100%，平均浓度分别为 7.61 ng/L、3.65 ng/L；RXM 检出率 90%，平均浓度 0.07 ng/L；EM-H₂O、SMT、SD 检出率均低于 50%，平均浓度分别为 0.64 ng/L、0.01 ng/L、0.04 ng/L，污染贡献较低。

从污染成因看，SMX 多用于人类疾病治疗，OFL 因在水环境中稳定性强、半衰期长，二者检出特征与抚仙湖周边人口密集区的生活污水排放密切相关；而 SMT、SD 主要应用于畜牧养殖，抚仙湖周边生态管控严格、养殖业规模小，导致其检出率和浓度显著低于南四湖丰水期(SMT 检出率 40%、平均 0.535 ng/L) [21]。对比国内其他水体，抚仙湖 SMX 平均浓度高于鄱阳湖及丰水期洞庭湖(约 5 倍)，但仅为太湖的 1/6；OFL 平均浓度高于洞庭湖(40 倍)，但低于太湖(1/8) [22]，且 SMX、OFL 检出率远高于大辽河(25%) [23]，表明抚仙湖抗生素污染以人源输入为主要特征，与农业养殖源主导的水体存在显著差异(详情见表 3)。

Table 3. Statistical characteristics of antibiotics in the water bodies of the Fuxian Lake riparian zone

表 3. 抚仙湖湖滨区水体中抗生素的统计特征

抗生素		含量(ng/L)			
		Min	Max	Mean	Fre
罗红霉素	RXM	nd	0.19	0.07	90%
红霉素	EM-H ₂ O	nd	4.56	0.64	30%
土霉素	OTC	nd	nd	nd	0%
四环素	TCN	nd	nd	nd	0%
金霉素	CTC	nd	nd	nd	0%
磺胺嘧啶	SD	nd	0.35	0.04	10%
磺胺二甲嘧啶	SMT	nd	0.05	0.01	20%
磺胺甲噁唑	SMX	1.36	14.32	7.61	100%
氧氟沙星	OFL	1.17	6.63	3.65	100%
诺氟沙星	NOR	nd	nd	nd	0%
环丙沙星	CIP	nd	nd	nd	0%
恩诺沙星	ENR	nd	nd	nd	0%

3.2. 抚仙湖湖滨区抗生素污染的空间分布特征

明确抗生素浓度整体特征后，进一步分析其空间分布差异，可更精准识别污染热点及驱动因素，为靶向防控提供依据。结果显示，抚仙湖湖滨区抗生素污染存在显著空间异质性：东部采样点(S1~S5)抗生素浓度范围为 nd~14.32 ng/L，西部采样点(S6~S10)则为 nd~4.59 ng/L，东部整体污染程度显著高于西部。从典型点位来看，S1 (大鲫鱼河对应湖内)污染最为突出，检出全部 6 种抗生素，总浓度达 26.10 ng/L，为全区域最高；S3 (世家大河对应湖内)检出种类最少，仅检测出 SMX 和 OFL2 种；西部 S6~S10 采样点检出抗生素种类为 2~4 种，且各抗生素浓度普遍低于 5 ng/L，污染水平相对温和(详情见表 4)。

Table 4. Antibiotic concentrations in the water of the Fuxian Lake riparian zone
表 4. 抚仙湖湖滨区水体中抗生素浓度

点位	罗红霉素	红霉素	土霉素	四环素	金霉素	磺胺嘧啶	磺胺二甲嘧啶	磺胺甲噁唑	氧氟沙星	诺氟沙星	环丙沙星	恩诺沙星
S1	0.19	4.56	nd	nd	nd	0.35	0.05	14.32	6.63	nd	nd	nd
S2	0.10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	12.14	5.86	nd	nd	nd
S3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	11.51	5.46	nd	nd	nd
S4	0.02	1.04	nd	nd	nd	nd	nd	12.13	5.16	nd	nd	nd
S5	0.06	nd	nd	nd	nd	nd	nd	13.75	6.48	nd	nd	nd
S6	0.08	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.24	1.73	nd	nd	nd
S7	0.03	nd	nd	nd	nd	nd	nd	4.59	1.55	nd	nd	nd
S8	0.02	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.49	1.17	nd	nd	nd
S9	0.13	0.79	nd	nd	nd	nd	nd	1.36	1.19	nd	nd	nd
S10	0.06	nd	nd	nd	nd	nd	0.05	1.52	1.22	nd	nd	nd

从空间差异成因来看，核心驱动因素为人类活动强度与生态管控力度的区域失衡：东部采样点覆盖区域村庄密集、餐饮酒店集中，人口活动频繁，生活污水排放量较大，即便经污水处理厂处理，仍有部分抗生素未能彻底去除，长期持续输入导致抗生素在水体中形成伪持久性累积，进而推高污染浓度；而西部多为湿地公园与核心风景区，一方面湿地公园的水生植物、微生物可通过吸附、降解作用净化水体中的抗生素，另一方面风景区严格的环保管控措施有效减少了人类活动带来的污染输入，双重作用下西部抗生素污染程度显著降低。其中 S1 作为污染热点，其周边农村面源污染(如分散生活污水、农业径流)叠加城镇排污影响，进一步加剧了局部抗生素累积，这一现象也印证了人类活动强度与抗生素污染水平呈正相关的一般规律，提示后续抚仙湖抗生素污染防治需优先聚焦东部入湖河流，针对性强化污染源头管控。

3.3. 抚仙湖湖滨区抗生素的风险评价

利用环境中生态风险评价的方法，抗生素残留在环境中的生态风险可以根据 RQs 的大小来评价，表征生态风险的不同程度：RQs<0.1 为低风险，0.1, 0.1<1 为中等风险，RQs 风险，为高风险。基于最坏情况考虑，RQs 的计算用最敏感物种的 PNEC，并且采用抗生素浓度的最大值进行计算，结果见表 5。

Table 5. Toxicological data of antibiotics against the most susceptible species
表 5. 抗生素对应最敏感物种的毒理数据

抗生素	最敏感物种	毒性类型	毒性数据/(mg/L)		PNEC/(ng/L)
			EC50	NOEC	
RXM	<i>P. subcapitata</i>	急性	0.001		100
EM-H ₂ O	<i>P. subcapitata</i>	急性	0.02		20
SD	<i>S. capricornutum</i>	急性	2.2		2200
SMT	<i>S. vacuolatus</i>	急性	19.52		19520
SMX	<i>S. leopoliensis</i>	急性	0.027		27
OFL	<i>P. subcapitata</i>	慢性		0.00113	11.3

由表 5 可见, 结果显示, 检出的 6 种抗生素风险等级分化明显: 磺胺甲噁唑(SMX, $RQs = 0.53$)、氧氟沙星(OFL, $RQs = 0.587$)、红霉素(EM-H₂O, $RQs = 0.228$)均处于中等风险水平($0.1 < RQs < 1$); 罗红霉素(RXM)、磺胺嘧啶(SD)、磺胺二甲嘧啶(SMT)的 RQs 值均 <0.1 , 为低风险。从区域整体风险来看, 抚仙湖抗生素总风险值($RQSUM = 1.347$)介于珠江三角洲(1.222)与黄河三角洲(1.943)之间, 整体呈现中等风险特征(详情见表 6)。

Table 6. Risk quotients (RQs) of antibiotics in the water bodies of the Fuxian Lake riparian zone
表 6. 抚仙湖湖滨区水体中抗生素的 RQs

抗生素	Max MEC	Min MEC
RXM	0.19	1.90E-03
EM-H ₂ O	4.56	2.28E-01
SD	0.35	1.59E-04
SMT	0.05	2.56E-06
SMX	14.32	5.30E-01
OFL	6.63	5.87E-01

抚仙湖作为深水型湖泊, 水体环境稳定, 抗生素长期残留可能对水生生物产生慢性毒性, 甚至诱导细菌抗药性[22], 需警惕“隐性风险”累积。对比国内典型区域, 抚仙湖总风险值远低于长江三角洲(8.769)、江汉平原(20.204), 这一差异既源于抚仙湖 I 类水源地严格的污染管控, 也得益于其大容积水体的稀释作用, 印证了水源地保护的成效; 但与珠江三角洲相比风险略高, 提示即便在保护严格的区域, 人源抗生素(SMX, OFL)的持续输入仍可能推高生态风险。

4. 结论

抚仙湖湖滨区水环境中共检出 6 种抗生素, 浓度范围为 nd~14.32 ng/L, 其中磺胺甲噁唑是主要抗生素污染因子, 其检出率和平均浓度分别为 100%、7.61ng/L。利用风险熵值法计算抚仙湖湖滨区水环境中抗生素的 RQs 值, 结果显示红霉素、磺胺甲噁唑和氧氟沙星呈中等风险。

参考文献

- [1] 梁惜梅, 施震, 黄小平. 珠江口典型水产养殖区抗生素的污染特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 304-310.
- [2] Sanderson, H., Brain, R.A., Johnson, D.J., Wilson, C.J. and Solomon, K.R. (2004) Toxicity Classification and Evaluation of Four Pharmaceuticals Classes: Antibiotics, Antineoplastics, Cardiovascular, and Sex Hormones. *Toxicology*, **203**, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2004.05.015>
- [3] 代朝猛, 周雪飞, 张亚雷, 等. 环境介质中药物和个人护理品的潜在风险研究进展[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(2): 77-80.
- [4] Zhou, X.F., Dai, C.M., Zhang, Y.L., Surampalli, R.Y. and Zhang, T.C. (2010) A Preliminary Study on the Occurrence and Behavior of Carbamazepine (CBZ) in Aquatic Environment of Yangtze River Delta, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **173**, 45-53. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1369-8>
- [5] Jiang, L., Hu, X., Yin, D., Zhang, H. and Yu, Z. (2011) Occurrence, Distribution and Seasonal Variation of Antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China. *Chemosphere*, **82**, 822-828. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.11.028>
- [6] 杨常青, 王龙星, 侯晓虹, 等. 大辽河水系河水中 16 种抗生素的污染水平分析[J]. 色谱, 2012, 30(8): 756-762.
- [7] Luo, Y., Xu, L., Rysz, M., Wang, Y., Zhang, H. and Alvarez, P.J.J. (2011) Occurrence and Transport of Tetracycline, Sulfonamide, Quinolone, and Macrolide Antibiotics in the Haihe River Basin, China. *Environmental Science & Technology*, **45**, 1827-1833. <https://doi.org/10.1021/es104009s>
- [8] 孙凯. 洪泽湖湿地典型抗生素污染特征与生态风险[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2015.

- [9] Xu, W., Zhang, G., Zou, S., Ling, Z., Wang, G. and Yan, W. (2009) A Preliminary Investigation on the Occurrence and Distribution of Antibiotics in the Yellow River and Its Tributaries, China. *Water Environment Research*, **81**, 248-254. <https://doi.org/10.2175/106143008x325719>
- [10] Gao, L., Shi, Y., Li, W., Liu, J. and Cai, Y. (2012) Occurrence, Distribution and Bioaccumulation of Antibiotics in the Haihe River in China. *Journal of Environmental Monitoring*, **14**, 1248-1255. <https://doi.org/10.1039/c2em10916f>
- [11] Zou, S., Xu, W., Zhang, R., Tang, J., Chen, Y. and Zhang, G. (2011) Occurrence and Distribution of Antibiotics in Coastal Water of the Bohai Bay, China: Impacts of River Discharge and Aquaculture Activities. *Environmental Pollution*, **159**, 2913-2920. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.04.037>
- [12] Gulkowska, A., He, Y., So, M.K., Yeung, L.W.Y., Leung, H.W., Giesy, J.P., *et al.* (2007) The Occurrence of Selected Antibiotics in Hong Kong Coastal Waters. *Marine Pollution Bulletin*, **54**, 1287-1293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.008>
- [13] Kim, S. and Carlson, K. (2006) Temporal and Spatial Trends in the Occurrence of Human and Veterinary Antibiotics in Aqueous and River Sediment Matrices. *Environmental Science & Technology*, **41**, 50-57. <https://doi.org/10.1021/es060737+>
- [14] Wiegel, S., Aulinger, A., Brockmeyer, R., Harms, H., Löffler, J., Reincke, H., *et al.* (2004) Pharmaceuticals in the River Elbe and Its Tributaries. *Chemosphere*, **57**, 107-126. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.05.017>
- [15] Tamtam, F., Mercier, F., Le Bot, B., Eurin, J., Tuc Dinh, Q., Clément, M., *et al.* (2008) Occurrence and Fate of Antibiotics in the Seine River in Various Hydrological Conditions. *Science of the Total Environment*, **393**, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.12.009>
- [16] Managaki, S., Murata, A., Takada, H., Tuyen, B.C. and Chiem, N.H. (2007) Distribution of Macrolides, Sulfonamides, and Trimethoprim in Tropical Waters: Ubiquitous Occurrence of Veterinary Antibiotics in the Mekong Delta. *Environmental Science & Technology*, **41**, 8004-8010. <https://doi.org/10.1021/es0709021>
- [17] 汪祎勤. 抚仙湖生态环境动态监测工作手记[J]. 中国测绘, 2017(3): 75-77.
- [18] 王建萍. 抚仙湖保护: 实践·问题·对策[J]. 中共云南省委党校学报, 2019, 20(2): 128-132.
- [19] 曾海鳌, 吴敬禄. 近 50 年来抚仙湖重金属污染的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2007(1): 128-132.
- [20] 雷晓宁. 新疆典型湖泊中抗生素的污染状况与分布特征[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2014.
- [21] 李瑞萍, 张欣欣, 刘卓, 杨军, 黄应平. 池塘养殖水体 pH、营养盐、叶绿素 a 及 3 种磺胺类抗生素分布特征及其相关性分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2582-2588.
- [22] 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]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2017.
- [23] 秦延文, 张雷, 时瑶, 等. 大辽河表层水体典型抗生素污染特征与生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 361-368.