

中国典型抗生素污染特征、测试方法及生态风险评估综述

全 瑶¹, 宋 寒^{2*}, 朱盈蕊³, 宿婧婧¹, 李琦路⁴, 任明浩¹

¹华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

²河南省科学院质量检测与分析测试研究中心, 河南 郑州

³郑州市食品药品检验所, 河南 郑州

⁴河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南 新乡

收稿日期: 2026年1月15日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年2月28日

摘 要

论文系统总结了我国地表水、地下水及沉积物中磺胺类、喹诺酮类、大环内酯类和四环素类抗生素的污染分布特征及其环境行为。结果表明, 磺胺类总体污染水平较低且区域差异不显著; 喹诺酮类在经济发达、工农业活动密集区浓度偏高; 大环内酯类空间差异明显, 受局地排放源影响显著; 四环素类在部分西北地区相对较高。河流中抗生素浓度整体高于湖泊, 地下水以四环素类和喹诺酮类为主检出。抗生素迁移转化行为受理化性质及两性离子特征控制, 与传统有机污染物存在明显差异。同步归纳了抗生素样品前处理及色谱-质谱联用检测技术, 并比较了其环境适用性。生态风险评价结果显示, 部分水环境已达到中至高风险水平。上述认识可为抗生素环境行为研究及污染防控提供参考。

关键词

典型抗生素, 环境介质, 迁移转化, 检测方法, 生态风险

A Review on the Characteristics of Antibiotic Contamination, Analytical Methods, and Ecological Risks in China

Yao Tong¹, Han Song^{2*}, Yingrui Zhu³, Jingjing Su¹, Qilu Li⁴, Minghao Ren¹

¹School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Quality Inspection and Testing Research Center, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou Henan

³Zhengzhou Institute for Food and Drug Control, Zhengzhou Henan

⁴Key Laboratory of Yellow-Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, College of Environment, Henan Normal University, Xinxiang Henan

文章引用: 全瑶, 宋寒, 朱盈蕊, 宿婧婧, 李琦路, 任明浩. 中国典型抗生素污染特征、测试方法及生态风险评估综述[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(2): 260-275. DOI: 10.12677/aep.2026.162027

Received: January 15, 2026; accepted: February 20, 2026; published: February 28, 2026

Abstract

This paper systematically summarizes the distribution characteristics and environmental behavior of sulfonamide, quinolone, macrolide, and tetracycline antibiotics in surface water, groundwater, and sediments in China. The results show that sulfonamide antibiotics generally have low pollution levels with no significant regional differences; quinolones have higher concentrations in economically developed areas with intensive industrial and agricultural activities; macrolides show significant spatial variations and are significantly influenced by local emission sources; and tetracyclines are relatively high in some northwestern regions. Antibiotic concentrations in rivers are generally higher than in lakes, and tetracyclines and quinolones are the main antibiotics detected in groundwater. The migration and transformation behavior of antibiotics is controlled by their physico-chemical properties and zwitterionic characteristics, showing significant differences from traditional organic pollutants. The paper also summarizes antibiotic sample pretreatment and chromatography-mass spectrometry detection techniques and compares their environmental applicability. Ecological risk assessment results indicate that some aquatic environments have reached medium to high risk levels. These findings can provide a reference for research on the environmental behavior of antibiotics and pollution control.

Keywords

Typical Antibiotics, Environmental Media, Migration and Transformation, Detection Methods, Ecological Risk

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. 引言

随着城市化、工业化和农业现代化的加速推进,由人类活动向流域水环境内排放的污染物日趋复杂,新污染物(Emerging Contaminants)已成为除传统污染物外影响水环境安全的重要因素[1]。目前,国际上被广泛关注的新污染物主要包括:抗生素[2]、内分泌干扰物[3]、微塑料及持久性有机污染物[4]。抗生素是指具有抵抗或杀灭微生物活性的天然或合成化合物[5]。自1928年发现青霉素以来,抗生素被广泛用于人类疾病的预防和治疗,并作为生长促进剂用于集约化畜牧和养殖业[6][7]。

大部分抗生素半衰期较短,但持续输入和高频使用,导致其在水环境中普遍检出。研究表明,抗生素进入人体和动物体内后,无法被完全吸收,10%~90%的抗生素可能以母体化合物或生物活性代谢物的形式排出体外[2]。即使经过污水处理厂(waste water treatment plants)的处理,仍有大量的抗生素通过污水处理厂出水、农业径流以及水产和畜禽养殖废水进入各类水环境介质中[8]。目前,抗生素不仅在地下水[9]、地表水[10]、沉积物[11]等水环境中被广泛检出,还在土壤、生物体等其他环境介质中被检出。研究表明,抗生素能引发水生生物的急性或慢性中毒。尽管环境中的抗生素浓度低于抑制水平,但长期暴露于低浓度的抗生素环境中会导致耐药菌株的出现[12]。

作为世界上最大的发展中国家,中国是药品生产和消费大国。早在2011年,中国药品产量已达到约200万吨[13]。2013年,中国抗生素的生产量和消费量分别为24.85万吨和16.2万吨,消费产品中的抗生

素有 46%最终被释放到环境中[13] [14]。抗生素使用量的增加以及由此产生的抗生素残留在环境中的积累带来了严重的问题。抗生素的滥用加剧了环境中的选择压力,进而诱导细菌产生抗生素耐药基因经排泄后将养殖区域及其周边环境造成潜在基因污染[15]。此外,残留抗生素还对非目标生物产生显著生态毒性效应,如诱导轮虫的摄食抑制和体型减小,并抑制藻类的正常生长。在群落层面,抗生素会显著降低微生物多样性,改变其种群结构和功能特性。上述多级效应最终干扰生态系统的物质循环过程,导致生态系统功能失调[16]。

目前,中国环境中抗生素的研究主要集中在各类环境介质中抗生素的含量分布、迁移转化规律及潜在生态风险。在系统梳理已有研究成果的基础上,对中国地表水、地下水和沉积物等水环境介质中典型抗生素的类型、含量和分布特征进行了总结,并归纳了其在不同环境介质中的迁移转化特点。同时对当前抗生素检测的主要分析方法进行了概述,以期为中国环境介质中抗生素污染防治与环境监管提供科学依据。

2. 典型抗生素残留特征

2.1. 磺胺类

磺胺类抗生素(Sulfonamides)发现于 1908 年,1933 年开始试用于临床,被广泛应用于牲畜养殖和水产养殖业等。磺胺类化学稳定性,在地表水、地下水、沉积物中均有检出,通常在 $\text{ng/L} \sim \mu\text{g/L}$ 数量级[17]。

磺胺类抗生素污染调查最早是在美国开展。1999 年, Kolpin 等[18]调查了美国 139 条河流抗生素污染,结果显示磺胺甲恶唑检出最大浓度为 520 ng/L 。此后,多个研究团队在不同国家和地区的水体中陆续报道了磺胺类抗生素的广泛存在。2009 年, Watkinson 等[19]在澳大利亚昆士兰东南部城市流域监测发现,磺胺甲恶唑和甲氧苄啶在地表水中的最大检测浓度分别为 2000 ng/L 和 150 ng/L 。2016 年, Ngumba 等[20]发现肯尼亚内罗毕河水中磺胺甲恶唑、甲氧苄啶最大(中位)浓度分别为 $13,800 \text{ ng/L}$ (1800 ng/L)和 2650 ng/L (327 ng/L)。2022 年, Duan 等[21]综述了全球水体中磺胺类抗生素的分布特征,结果显示:欧洲部分河流如法国沙尔莫瓦兹河中磺胺甲噁唑浓度达 3066 ng/L [22]。

总体来看,中国环境中磺胺类抗生素的污染程度不高。除华中地区,其他区域的污染含量均值较为一致。华东、华北及东北等重点区域,污染负荷尤为突出。华东地区的江浙沪、安徽为高值区,含量分别达到 112.80 ng/L 和 89.05 ng/L [23];河北省磺胺甲恶唑含量高达 124.62 ng/L [24],该省磺胺类总体水平亦达 95.60 ng/L [25];东北地区的浓度差异明显,辽河样点高达 93.93 ng/L [23],而吉林省仅 0.17 ng/L [26],表明该区水体污染具有明显的空间不均性。华南、西南、西北地区的磺胺类污染处于中等水平。海南省与广东省的含量分别为 47.13 ng/L 与 13.62 ng/L ;重庆市磺胺甲噁唑含量为 78.55 ng/L [24];华中地区磺胺类污染整体较低,河南省磺胺甲噁唑含量仅为 0.76 ng/L [27]。西北地区浓度介于 $4.66 \sim 57.71 \text{ ng/L}$,新疆维吾尔自治区样点值最高 57.71 ng/L ,表现出局部性较强的污染特征。

2.2. 喹诺酮类

喹诺酮类抗生素(Quinolones)作为一种人畜共用的人工合成类抗菌药,广泛应用于泌尿系统感染治疗,被世界卫生组织认为是至关重要的抗微生物药物。该类抗生素具有显著的环境吸附性(易结合土壤/沉积物),虽然临床不良反应发生率相对较低,但大规模使用可导致持久性环境残留[28]。

近年来,喹诺酮类抗生素在全球范围内的水环境中均有检出,甚至在南极洲地区也有检出[29]。总结发现,中国环境中喹诺酮类抗生素的污染分布呈现出明显的空间异质性。虽然其含量在各区域变化范围接近,但平均值和中位值差异显著。华东地区整体浓度较高,范围为 $0.75 \sim 155.90 \text{ ng/L}$,其中,太湖样点浓度最高 155.90 ng/L [23],其次为山东省 56.70 ng/L [23] [30]和安徽省 19.84 ng/L [23];江苏省与上海市

样点浓度相对较低分别为 0.75 ng/L [31]和 3.65 ng/L [23]。华北地区喹诺酮类浓度波动较大,海河样点浓度最高 248.66 ng/L [32],其次为黄河下游 123.89 ng/L [32]和河北省 43.70 ng/L [25];北京与天津的浓度分别为 2.53 ng/L [33]和 3.30 ng/L [34],说明主要污染集中于流域下游和城市工业区。

华南地区整体处于中等偏高水平,其中珠江下游 113.00 ng/L [32]和广东省 111.99 ng/L [35]较高,而香港仅为 1.39 ng/L [35],区域差异明显,可能与工业密度及排放管控差异有关。华中地区河南省浓度较低,为 14.77 ng/L [27],西南地区浓度介于 16.75~108.20 ng/L [31][32][36],最大值出现于长江上游[32]。西北地区浓度差异较大,其中新疆维吾尔自治区最高 132.70 ng/L [37],青海省和渭河分别为 26.66 ng/L [38]和 6.65 ng/L [39]。东北地区辽河浓度为 124.27 ng/L [23],反映工业与农业排放叠加效应显著。

总体来看,喹诺酮类抗生素在中国各区域呈现明显的空间差异,经济发达、工业与农业活动密集的区域抗生素浓度普遍偏高,而中部地区污染相对较轻。

2.3. 大环内酯类

大环内酯类抗生素(Macrolide Antibiotics)是由 12-16 碳内酯环分子结构构成的广谱抗菌药物,对革兰氏阳性菌具有抑菌作用,使其成为人用临床和畜禽养殖中的常用药物[40]。

中国环境中大环内酯类抗生素的赋存呈现出高度的空间异质性,区域差异显著。东北地区变化范围最大,辽河流域水体污染水平较高,达到 201.88 ng/L [23]。华北、西南地区污染水平接近,如北京市(36.02 ng/L [41])、重庆市(56.79 ng/L [42]);华东、华南、西北地区表现出一定程度的污染,如海南省(34.07 ng/L [43]);华中地区污染水平较低。如河南省(2.08 ng/L [27])等地,其浓度均不足 10.00 ng/L,南渡江流域水体的平均含量也处于 9.92 ng/L 的较低水平[43]。同一区域内部亦存在巨大差异,以华东地区为例,山东省内不同研究报道的含量介于 9.81 至 81.55 ng/L 之间[41][44],而上海市则处于 2.40 ng/L 的较低水平[23];华南地区的广东省(0.11 ng/L [45])也处于较低水平。在华北以外的其他区域中,西北地区呈现由低至中等偏高的差异性,如宁夏仅为 4.66 ng/L [46],而新疆维吾尔自治区达到 57.71 ng/L [38]。这种高、低值区在空间上交错分布的复杂格局,加之其在重点流域水环境被普遍检出且在全国抗生素谱系中占比居高,共同确证了局地排放源强度(如人口密度、医疗与养殖活动)是塑造其环境赋存格局的根本驱动力。

2.4. 四环素

四环素类抗生素(Tetracyclines)是一种价格低、效果好的广谱抗菌药,通常以亚治疗剂量添加于畜禽养殖饲料中,用于疾病预防与生长促进,以四环素、土霉素和金霉素等为最常用品种[47]。此外,四环素类抗生素还可以抑制细菌蛋白质合成,在高浓度时具有杀菌作用[35][47]。据不完全统计,四环素类抗生素在全球各类抗生素中的消耗量居于首位[36]。该类物理化学性质稳定,在各种水体环境介质中均有检出[47][48],并且是中国典型河流中检出频率和占比最高的抗生素类型之一[49]。

中国水体中四环素类抗生素的污染呈现出显著的区域差异性。与其他抗生素污染不同,四环素类抗生素在西北地区污染水平较高,新疆维吾尔自治区水体中检出浓度为 95.48 ng/L [37],这可能是特殊的气候水文条件与农业用药模式导致污染物的高效富集。类似的高富集现象在江汉平原的地下水系统中亦有报道,其四环素浓度高达 86.6 ng/L [9]。华东地区污染尤为突出,如江苏省与浙江省交界水体浓度高达 75.00 ng/L [23],上海市与安徽省部分水体也分别检出 24.35 ng/L 与 21.35 ng/L [23],反映了该区域高度城市化和集约化农业活动带来的复合污染效应;华南的广东省与华中的河南省水体中四环素浓度分别为 33.61 ng/L 与 43.08 ng/L [27][45],表明流域水环境是该类污染物的重要汇区。与此形成鲜明对比的是,华北的北京市与东北的吉林省水体中浓度极低(分别为 0.07 ng/L [8]与 0.01 ng/L [26]),这很可能与当地相

对完善的污水处理基础设施及污染源强度较低有关。上述空间分异规律与宏观流域水环境研究结果凸显了对其区域风险进行针对性管控的紧迫性。

3. 中国水环境中抗生素分布与迁移

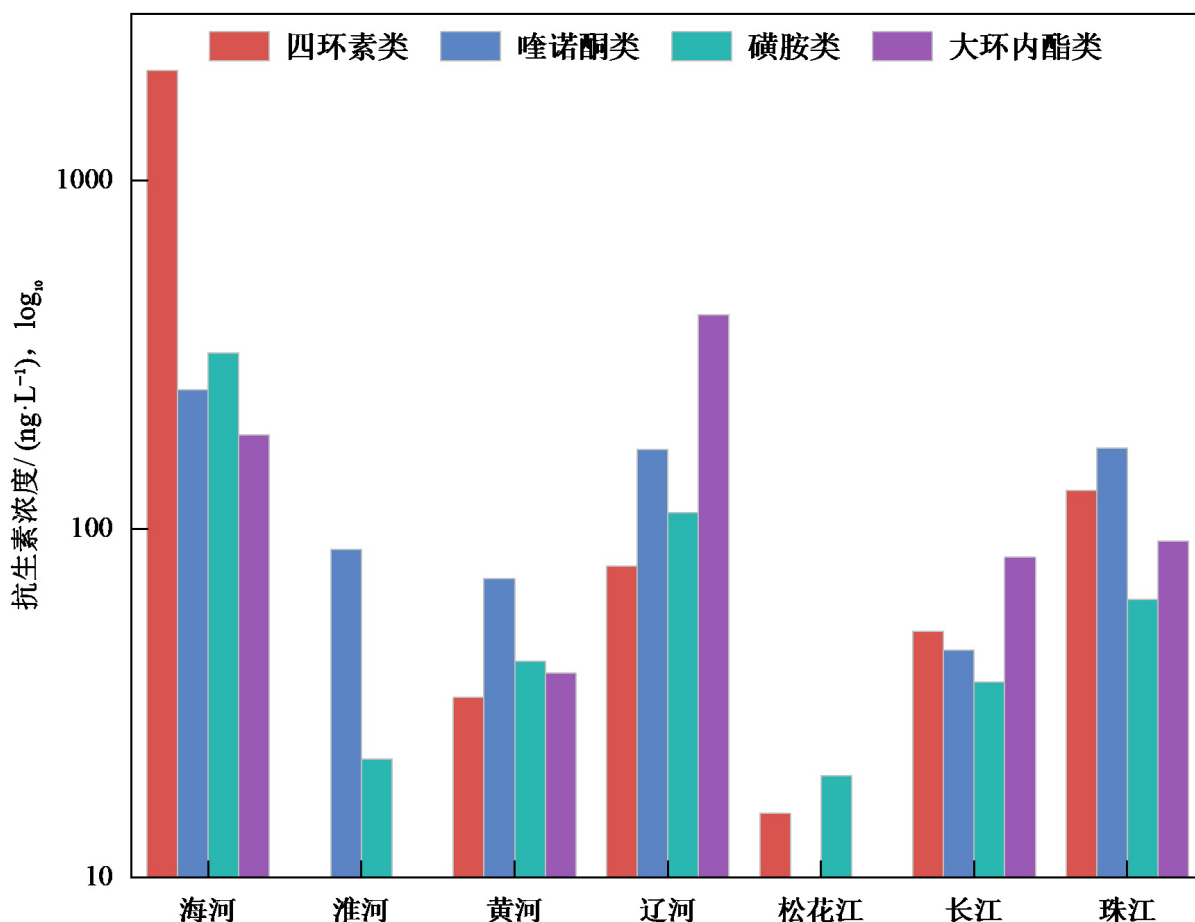
近年来,不同国家地表水中抗生素污染普遍存在,但污染水平和类型存在明显地域差异。美国多条河流中已检出多种磺胺类抗生素,部分河段浓度高达数百 ng/L,显示出较强的人为输入特征。越南湄公河水体中亦检测出多种磺胺类化合物,浓度范围为 5~50 ng/L,表明东南亚地区水体抗生素污染较为突出。相比之下,中国地表水中抗生素种类更为复杂,既包括磺胺类、四环素类,也有大环内酯类、喹诺酮类等,且不同流域水环境污染水平差异显著,如辽河流域水环境中红霉素平均浓度达 201.88 ng/L,而珠江流域水环境中四环素类最高可达 349 ng/L,呈现出区域分布不均的特点。

3.1. 地表水

由于抗生素在人类医疗和畜牧业中的广泛使用,以及在污水处理过程中的去除效率不足,导致抗生素残留在全球地表水中被广泛检出。抗生素污染在全球范围内具有明显的区域差异性[10]。2019年,Boxall和Wilkinson等[50]调查了全球91条河流发现,从泰晤士河到湄公河等多个流域水环境中,近三分之二的研究地点的水域中含有抗生素,最高超过100 ng/L。同年,Moles等[51]对埃布罗河流域(西班牙北部)的河流中的选定抗生素(阿奇霉素、恩诺沙星、甲氧苄啶和磺胺嘧啶)进行长期(4年)的研究表明:恩诺沙星和磺胺嘧啶几乎存在于所有地表水控制点,含量在20~180 ng/L范围内。在美洲,已测得抗生素浓度高达15,000 ng/L [52];非洲研究报告显示,部分河流中磺胺甲恶唑和甲氧苄啶的最高浓度分别达到3320 ng/L和3890 ng/L [10]。

抗生素在中国主要的江河流域水环境及湖泊中已被普遍检出;地表水中抗生素残留的主要检出类别为磺胺类、四环素类、大环内酯类、氟喹诺酮类[53]。Yi等[54]基于2013~2024年发表的文献,分析了中国七大主要流域地表水中58种抗生素,发现40多种抗生素的检出率超过50%,浓度范围从未检出至最高7632.10 ng/L,平均浓度普遍低于30 ng/L,中位数多低于10 ng/L,表明地表水被抗生素大规模污染。Yin等[55]系统地综述了中国长江、黄河、海河、辽河、淮河、松花江及珠江七大流域地表水中70种典型抗生素的污染特征,结果显示中国地表水中最常检出的抗生素依次为磺胺甲噁唑、脱水红霉素、磺胺嘧啶、诺氟沙星、氧氟沙星、环丙沙星、土霉素和四环素。Zhang等[56]对中国七个人口稠密城市地表水中抗生素研究表明,磺胺类抗生素是这些城市地表水中主要的抗生素类别,北京(136 ng/L)、上海(259.6 ng/L)、苏州(269.5 ng/L)、广州(851 ng/L)和西安(113.68 ng/L)等磺胺类化合物含量较高。喹诺酮类药物以广州(805.11 ng/L)为主要检出区,显著高于其他城市,而四环素类在苏州的浓度达到峰值(1322 ng/L)。

总结前人研究发现,中国七大流域水环境中典型抗生素污染呈现不同特征(图1)。海河流域水环境的四环素类污染尤为突出(最高值4108.37 ng/L [57]),其磺胺类、喹诺酮类和大环内酯类的最高浓度分别可达678.47 ng/L [57]、295.92 ng/L [57]和231.00 ng/L [32]。辽河流域水环境污染程度次之,大环内酯类抗生素含量最高(1191.80 ng/L [37]),磺胺类和喹诺酮类含量接近(分别为195.28 ng/L [57]和286.00 ng/L [37]),四环素类含量最低(200.60 ng/L [37])。松花江流域水环境污染程度较低,其中四环素类和磺胺类检出,浓度分别为15.30 ng/L [37]和19.60 ng/L [37]。长江、黄河和珠江流域水环境污染特征基本一致,四类抗生素均有检出且含量接近,珠江流域水环境污染稍高于黄河和长江流域水环境。珠江流域水环境和黄河流域水环境的喹诺酮类含量最高(分别为328.10 ng/L [37]和123.89 ng/L [32]);长江流域水环境大环内酯类含量最高256.71 ng/L [32]。淮河流域水环境中喹诺酮类和磺胺类检出,含量分别为87.50 ng/L [57]和21.90 ng/L [57]。



注：数据来源参考相关研究[23] [32] [37] [57]。海河[32] [37] [57]、淮河[57]、黄河[32] [37] [57]、辽河[23] [32] [37] [57]、松花江[37]、长江[23] [32] [37] [57]、珠江[32] [37] [57]。

Figure 1. Pollution characteristics of four major classes of typical antibiotics in surface waters across the seven major river basins of China

图 1. 中国七大流域地表水中四大类典型抗生素污染特征图

3.2. 地下水

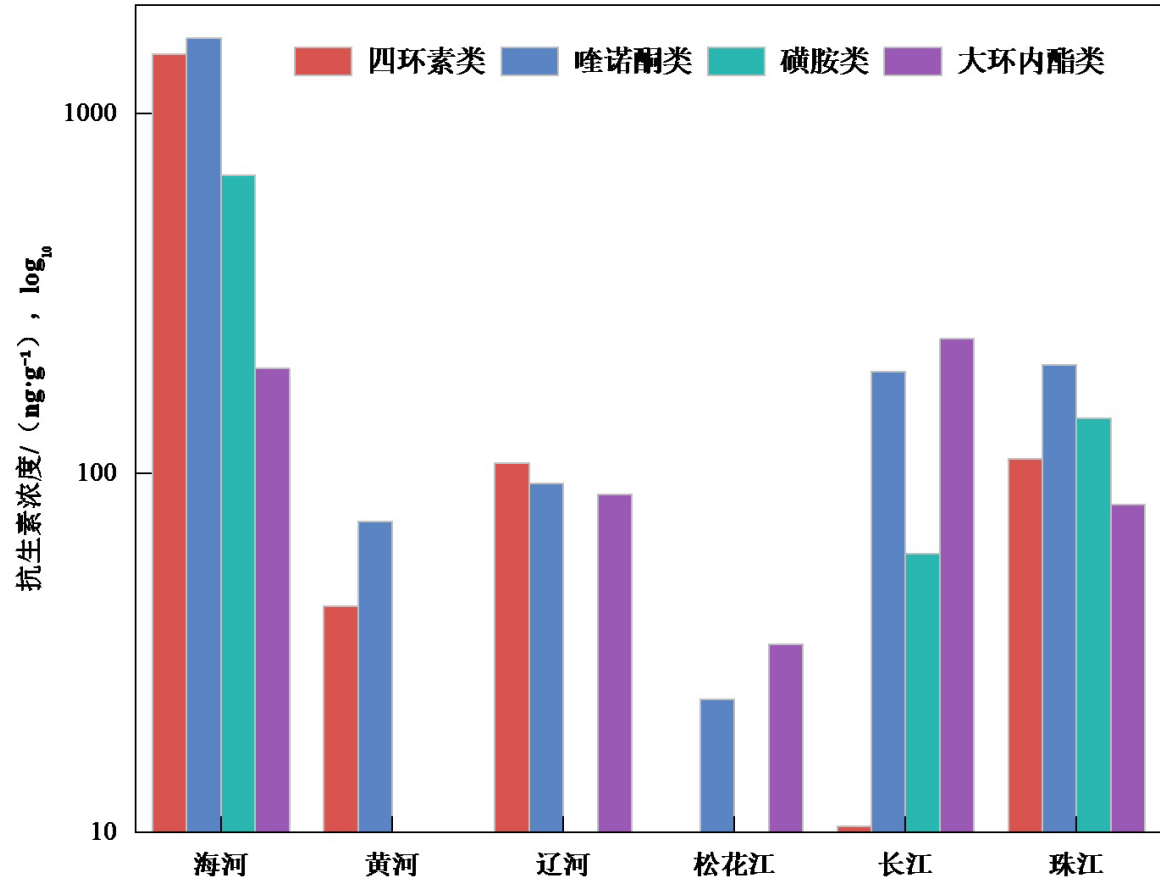
地下水是全球淡水资源的主要来源，占地球可用淡水总量的 97%。随着地表水中抗生素的污染加剧，在地表水与地下水间持续的物质交换与水力交互作用下，地下水也存在抗生素污染风险。抗生素可通过土壤浸出、沉积物渗漏及地表水-地下水交换等途径迁移至地下水系统。尽管土壤对污染物向地下水的运移具有一定的阻滞作用，但无法完全避免地下水体遭受污染，且地下水污染很难治理[58]。

近年来研究表明，中国地下水已受到不同程度的抗生素污染[9]。现有监测数据显示，地下水中抗生素的常见浓度多处于 ng/L 水平，一般约为 0.1~100 ng/L，在不同地区之间可跨越数个数量级。陈桂淋等[59]的研究进一步指出，尽管区域差异显著，但中国地下水中抗生素的整体污染水平通常处于数十至数百 ng/L 范围，典型水平约在 100~200 ng/L 左右[59]，以四环素类和喹诺酮类等高频检出，从空间上来看，中国地下水的抗生素研究主要集中在华北[23]，其总体浓度水平普遍低于 10 ng/L。相比之下，西北地区的相关研究数量明显偏少，监测点有限，显示出研究覆盖不足且数据代表性较弱[24]。抗生素的种类在不同区域呈现出不同特征，东北地区磺胺类检出最多，华北、华东地区喹诺酮类检出最多，而在西南地区主要是喹诺酮类和四环素类最常检出[60]。

基于城市尺度的监测情况来看, 六个城市的地下水均检出了多类抗生素, 但污染水平差异明显。北京市地下水中抗生素整体浓度水平相对较低(如磺胺二甲嘧啶 17.50 ng/L [33]), 但个别点位仍出现较高检出值, 其中磺胺二甲嘧啶达 126.75 ng/L、恩诺沙星 20.95 ng/L [33] [61]。天津市喹诺酮类最为突出, 环丙沙星高达 42.50 ng/L [61], 并伴随磺胺二甲氧嘧啶与四环素的检出, 此外, 杨大杰(2022 年)亦报道了天津多种低浓度喹诺酮类(氧氟沙星 2.20 ng/L [34]、诺氟沙星 6.90 ng/L [34])。毕节市污染最重, 四环素类浓度普遍偏高, 如土霉素 44.71 ng/L、强力霉素 30.35 ng/L, 喹诺酮类(氧氟沙星 16.47 ng/L)与磺胺类(磺胺甲噁唑、磺胺吡啶)也呈现持续检出[61]。石家庄市以喹诺酮类为主, 整体浓度较低(如诺氟沙星 3.14 ng/L [61]), 也有杨大杰(2022 年)提供的氧氟沙星 1.98 ng/L、环丙沙星 1.08 ng/L 等较低检出值[34] [61]。哈尔滨市以磺胺类污染最为突出, 磺胺吡啶达 68.60 ng/L [61], 而喹诺酮类普遍较低(如氧氟沙星 0.10 ng/L [34])。上海市污染最低, 仅有少量喹诺酮类被检测到(氧氟沙星、恩诺沙星均为 1.30 ng/L [34])。

综上, 六市地下水抗生素污染呈现出明显的空间差异特征: 毕节污染最重, 其次为天津与北京(部分点位), 石家庄与哈尔滨处于中等水平, 而上海污染最低。这种差异很可能与区域农业活动、畜禽养殖规模、人口密度及污染物输入路径的差异密切相关。

3.3. 沉积物



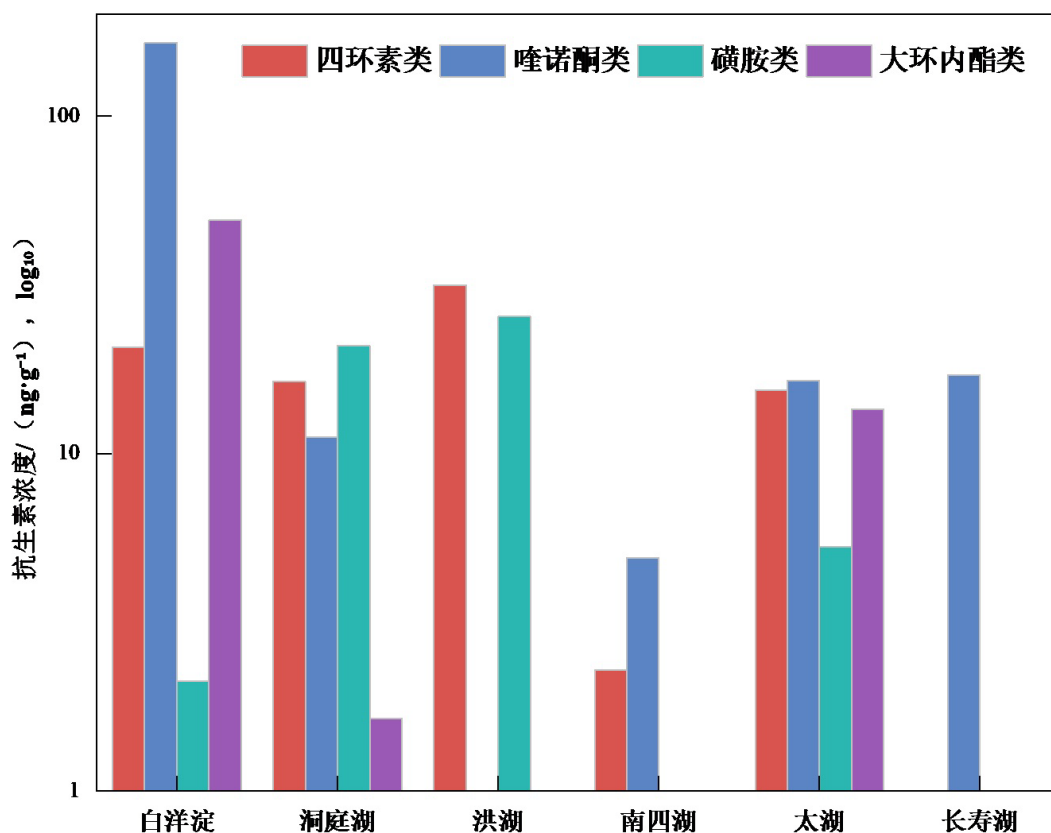
注: 数据来源参考相关研究[37] [41] [65]。海河[37] [65]、黄河[37] [65]、辽河[37] [65]、松花江[37] [65]、长江[37] [41]、珠江[37]。

Figure 2. Distribution characteristics of four major classes of typical antibiotics in sediments of the six major river basins in China
图 2. 中国六大流域沉积物中四大类典型抗生素污染特征图

沉积物也是水生环境中抗生素迁移和转化过程中的重要载体。当水文条件发生变化时, 沉积物可以作为抗生素的重要二次来源, 并向地表水释放污染物。此外, 有机污染物可以与沉积物强烈结合而难以降解, 使抗生素污染具有持久性[7] [32] [62]。

目前, 关于中国水域沉积物抗生素污染特征的研究尚不全面, 主要集中在沿海地区以及各大流域[11]。中国四大河流沉积物抗生素浓度呈现显著空间差异, 海河沉积物中抗生素的污染程度尤为突出(图 2)。海河沉积物中抗生素浓度(0.15~110 ng/g)高于辽河(0.09~23.4 ng/g)、长江(0.31~14.8 ng/g)、黄河(0.04~9.04 ng/g), 且主要为喹诺酮类和四环素类, 磺胺类则主要为磺胺二甲嘧啶和磺胺嘧啶, 检测浓度分别为 216.44、85.29 ng/g [63]。珠江广州河段沉积物共有 24 种抗生素被检出, 氟喹诺酮类和磺胺类抗生素占比较高, 表明水产养殖活动导致该流域抗生素含量偏高[2] [64]。辽河沉积物中未检出磺胺类, 其他三类抗生素含量接近。黄河沉积物中未检出磺胺类和大环内酯类; 松花江沉积物中抗生素含量较低, 四环素类和磺胺类未检出。

湖泊沉积物中主要抗生素种类存在差异。长寿湖的主要抗生素为氧氟沙星(24.3 ng/g)和诺氟沙星(9.96 ng/g), 太湖为恩诺沙星(0.54 ng/g)和罗红霉素(0.29 ng/g), 白洋淀为氧氟沙星(3.05 ng/g) [66]。Liu 等[67]综述了中国湖泊沉积物中检出的 39 种抗生素, 结果显示诺氟沙星在白洋淀沉积物中的浓度最高达 1140 ng/g, 磺胺甲恶唑在洪湖沉积物中也达 118.76 ng/g, 表明中国湖泊沉积物的抗生素污染水平处于全球较高水平, 其中喹诺酮类抗生素潜在风险最为突出(图 3)。



注: 数据来源参考相关研究[41] [64]-[69]。白洋淀[65] [67]、洞庭湖[67] [68]、洪湖[67]、南四湖[69]、太湖[41] [65]-[67]、长寿湖[66]。

Figure 3. Distribution characteristics of four major classes of antibiotics in sediments from typical lakes in China
图 3. 中国典型湖泊沉积物中四大类抗生素污染特征图

3.4. 污水处理厂去除效率及其对水环境抗生素输入的影响

污水处理厂是抗生素进入自然水环境的主要人为来源,其去除效果显著影响抗生素进入受纳水体的量和浓度。在城市污水、医院排放水以及部分工业废水中,多种抗生素被普遍检出。尽管常规污水处理技术能够在一定程度上减少这些污染物的浓度,但由于抗生素的理化性质各异,它们在污水处理中的去除效率也有所不同。某些抗生素尽管经过处理,仍然以一定浓度随排放水进入地表水体,持续存在于环境中[18] [19]。

研究表明,各类抗生素在污水处理厂中的去除效果差异较大。例如,磺胺类抗生素由于其较强的亲水性,在传统生化处理过程中去除效果较为有限。相比之下,喹诺酮类和四环素类抗生素由于容易吸附在污泥颗粒上,通常表现出较高的去除率。然而,这种“去除”更体现了抗生素从水相转移至污泥相的过程,而非完全降解。在随后的污泥处置或环境变化过程中,这些抗生素可能重新释放,成为潜在的二次污染源。同时,污水处理厂排放的出水中残留的抗生素具有长期排放的特性,尽管其浓度处于 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别,长期的排放仍然会对受纳水体中的抗生素背景水平产生重要影响。特别是在城市河流、下游河段及枯水期的水体中,污水处理厂排放的水体往往成为主要的抗生素来源,直接影响水环境中抗生素的空间分布[49] [70]。

污水处理厂的去除效率不仅决定了抗生素是否进入水体环境,还直接影响其初始浓度和组成特征。基于此,抗生素在水体中的迁移、分配及转化过程对其在不同环境介质中的分布模式起着关键作用。因此,考虑污水处理厂的去除效果作为水环境抗生素污染源的重要因素,有助于深入理解抗生素在水体中的分布特征及其形成机制。

3.5. 水环境中抗生素迁移转化规律

抗生素在生物体内通常难以完全吸收,经部分代谢后可进入市政污水系统[70]。在污水处理及固体废物处置过程中,部分抗生素未被有效去除,进而通过再生水、污泥或渗滤液进入土壤和水体环境,并在不同介质中发生迁移、分配与转化,最终影响其环境分布格局及潜在生态风险[71]。

抗生素在环境中的迁移行为与其在水相与固相之间的分配特性息息相关。分配系数(K_d)是衡量抗生素在土壤、沉积物及悬浮颗粒物中富集程度的关键指标,也是决定其在环境中行为的关键因素。研究显示,抗生素的 K_d 值通常随着固相介质有机碳含量(TOC)的增加而提高,较高的 TOC 通过疏水性分配及分子相互作用增强了抗生素在固相中的吸附作用,从而限制了其在水相中的迁移[72]。

环境的 pH 值会通过影响抗生素的电离状态进一步调节其在水环境中的分配。由于抗生素通常含有多个可离解的官能团,水体 pH 值变化可使其呈现不同的电荷形式。在弱酸性环境中,部分抗生素会更容易被固相介质吸附,表现为较高的 K_d ;而在中性或偏碱性条件下,抗生素的电离度增强,可能与固相表面产生更多静电排斥,导致其 K_d 值降低,水相中的迁移性增强。此外,悬浮颗粒物(SPM)在抗生素迁移与分配过程中起到重要载体作用。抗生素能吸附在悬浮颗粒物上并随之发生输运或沉降,这会影响其在水体与沉积物之间的分布。在悬浮颗粒物较多的环境中,抗生素以颗粒结合态的比例增大,导致较高的表观 K_d ,尤其在水动力条件较强的水体中尤为突出[73]。

在这些迁移与分配机制的共同作用下,抗生素在水环境中可能经历生物转化、光化学反应或异构化等过程,生成的转化产物在生态效应和环境行为上可能与母体化合物有所不同。这些转化产物的分布特征及其生态风险可能显著不同于原药物,从而影响抗生素在水环境中的总体归趋与风险评估。为了直观呈现典型抗生素的转化产物及其生态风险特征,表 1 列出了不同类别抗生素的母体化合物、主要转化产物、环境介质及其毒性与风险变化特征。

Table 1. Environmental fate and associated risk changes of typical antibiotics and their major transformation products
表 1. 典型抗生素及其主要转化产物的环境行为与风险变化

抗生素类别	母体化合物	主要代谢/转化产物	主要环境介质	毒性/生态效应特征	与母体相比的风险特征	参考文献
磺胺类	磺胺甲恶唑 (SMX)	N ⁴ -乙酰-SMX	地表水、沉积物	对藻类仍具抑制作用，可维持选择压力	毒性略低但环境持久性增强	[21]
喹诺酮类	环丙沙星 (CIP)	去乙基-CIP	沉积物、悬浮颗粒物	对微生物和藻类仍具较高抑制活性	抗菌活性保留，生态风险不可忽略	[74]
四环素类	四环素(TC)	4-epi-TC	水体、沉积物	对藻类和细菌具有残余毒性	毒性接近母体，稳定性更高	[47]
大环内酯类	红霉素 (ERY)	红霉素脱水产物	地表水	对藻类具有慢性毒性	急性毒性降低，慢性风险存在	[41]

4. 抗生素检测方法

4.1. 前处理技术

由于水体中抗生素的赋存浓度通常处于微量或痕量水平，难以直接检测其浓度，因此在仪器分析前必须对水样进行一系列前处理，以实现目标抗生素的有效富集、分离和净化。当前市面上前处理技术种类繁多，选择适宜高效的前处理方法对最终分析结果至关重要[75]。时至今日，样品预处理技术体系已趋于成熟，各类方法发展至数十种之多。经典的预处理方法主要包括固相萃取、固相微萃取、磁性固相萃取、液相微萃取、液膜萃取、超临界流体萃取、液-液萃取，以及微波辅助提取等仍具有重要地位[76]。

Table 2. Comparison of different pretreatment methods for antibiotic analysis in water samples
表 2. 不同前处理方法在水体抗生素分析中的性能比较

前处理方法	典型吸附材料/试剂	回收率(%)	LOD (ng·L ⁻¹)	主要优点	主要局限性	参考文献
固相萃取 (SPE)	HLB、C18、MAX	70~100	0.1~10	富集效率高、重复性和稳定性好，适用于多类抗生素的常规分析	操作步骤较多、耗时	[77]
固相微萃取 (SPME)	涂层纤维	50~90	1~50	溶剂用量少、操作简便	定量稳定性较差	[76]
液液萃取 (LLE)	有机溶剂	60~95	10~100	方法成熟、设备要求低	溶剂消耗大、选择性差	[76]
在线 SPE	在线富集模块	80~100	<1	自动化程度高、灵敏度高	成本高、维护复杂	[77]

液-液萃取基于目标化合物在两种不互溶溶剂间分配系数的差异实现分离，具有原理简单、适用范围较广等优点，曾被广泛应用于多类污染物的前处理分析。然而，该方法存在有机溶剂消耗量大、富集效率有限、操作过程耗时且成本较高等不足，在痕量污染物分析中的应用逐渐受到限制。相较而言，固相萃取通过固态吸附剂对目标物的选择性保留与洗脱实现富集和净化，在操作稳定性、重复性和富集效率等方面具有明显优势，已成为水体抗生素分析中应用最为广泛的前处理技术之一。但其操作流程相对

繁琐、前处理时间较长,在一定程度上限制了分析效率的进一步提升[77]。为比较不同前处理技术在水体抗生素分析中的适用性,表2汇总了固相萃取、固相微萃取、QuEChERS、液-液萃取及在线SPE等常用方法的典型吸附材料(或试剂)、回收率及检出限(LOD)。

4.2. 检测技术

土壤和水体基质复杂,且多种抗生素在环境中多以痕量水平存在,对分析方法的灵敏度和选择性提出了较高要求[78]。液相色谱(LC)因不受目标化合物挥发性和热稳定性限制,适用于大多数抗生素的分离分析,是环境样品中抗生素检测的基础分离手段[15][79]。随着色谱柱填料粒径减小及系统耐压能力的提升,LC技术进一步发展为高效液相色谱(HPLC)和超高效液相色谱(UPLC),从而显著提升了复杂基质样品中抗生素的分离效率与分析通量[79]。

在此基础上,液相色谱与质谱联用的靶向分析技术(LC-MS/MS、UPLC-MS/MS)凭借检出限低、选择性强和重现性好等优势,已成为水体、沉积物及生物样品中抗生素定性定量分析的主流技术。例如,Li等[39]用HPLC-ESI-MS/MS系统分析了渭河流域水体与沉积物中抗生素的分布特征;Tang等[5]利用UPLC-MS/MS对安徽省多类型水体中抗生素污染水平及其季节变化特征进行了系统评估,均验证了该类技术在复杂环境介质中的适用性。相比之下,气相色谱-质谱(GC-MS)主要适用于挥发性较高、热稳定性良好的化合物,尽管已有研究将其用于地下水中多类抗生素的检测[33],但由于大环内酯类抗生素极性高、沸点高,通常需进行复杂的衍生化处理,从而限制了其在环境抗生素高通量分析中的应用。

5. 抗生素风险评估

5.1. 抗生素生态毒性风险及其混合暴露效应

抗生素在不同水环境介质中的广泛存在,凸显了对水生环境中抗生素开展生态风险评估的必要性和紧迫性。目前,抗生素生态风险评估方法主要包括定性分析和定量分析两类。定性分析主要依赖专家经验对潜在风险进行识别和分级,可用于总体风险特征的初步判断[80];定量分析则通过污染物暴露水平与毒性阈值之间的量化关系评估生态风险,其中风险商值法(Risk Quotient, RQ)、暴露-反应法和概率风险评估方法(PERA)等被广泛应用[81]。

在各类定量方法中,风险商值法因计算简便、数据需求相对较低,被广泛用于环境中抗生素生态风险的初步筛查。该方法通过比较环境中抗生素的实测浓度(MEC)与预测无效应浓度(PNEC)的比值来判定风险等级,RQ值越大,表明其潜在生态风险越高[81]。基于RQ方法的研究结果表明,我国不同区域水体中部分抗生素已呈现出较高生态风险水平。例如,Wang等[82]对北方流域地表水的评估发现,环丙沙星、氧氟沙星和磺胺甲恶唑在短期和长期暴露条件下均存在较高生态风险;Ci等[30]在小清河流域的研究表明,多种抗生素对藻类具有显著风险,其中克拉霉素的风险商值最高。南方流域研究亦显示,青霉素G、红霉素等抗生素在部分水体中表现出中至高等生态风险。

除单一抗生素的生态毒性风险外,水环境中抗生素复合污染所引发的混合毒性风险同样值得高度关注。与实验条件下针对单一化合物开展的毒性测试不同,自然水体中抗生素通常以多类别、多结构类型的形式长期共存,其生态效应往往体现为多污染物共同作用的综合结果,而非单一化合物效应的简单叠加。在这一背景下,仅依据单一抗生素的毒性阈值对生态风险进行判定,可能难以真实反映环境情景下的实际风险水平。已有研究表明,多种抗生素在共同暴露条件下,可能通过作用靶点相似、毒性作用路径重叠或对生物体代谢过程产生交互干扰等机制,引发加和效应,甚至在特定浓度组合和比例条件下表现出协同毒性,从而显著放大其对水生生物的生态影响[75]。在混合暴露体系中,即便各单一抗生素的环境浓度均处于低风险或可接受范围,其联合存在仍可能对藻类、浮游植物及微生物群落产生显著抑制效

应, 表现为生长速率降低、光合效率下降或群落结构发生改变。尤其是藻类等初级生产者, 对多抗生素混合体系通常表现出更高的敏感性, 其受损可能进一步通过食物网传递, 影响更高营养级生物并削弱水生生态系统的整体稳定性[74]。

从风险评价方法角度看, 当前广泛采用的风险商值(RQ)方法主要基于单一污染物的毒性数据构建, 未充分考虑不同抗生素之间潜在的交互作用, 其适用性更多体现在单一污染物评估或初步风险筛查阶段。在抗生素普遍共存的水环境中, 仅依赖单一化合物 RQ 值进行风险判定, 可能低估混合毒性所带来的累积效应及放大风险, 尤其难以反映长期、低剂量、多组分联合暴露条件下的真实生态压力。因此, 在开展水环境抗生素生态风险研究时, 有必要在单一化合物风险评估结果的基础上, 引入混合毒性风险的系统讨论, 并结合多抗生素共存特征, 对其潜在生态影响进行综合分析, 以提升风险评估结论对实际环境情景的解释力和科学合理性。

5.2. 低浓度抗生素长期暴露诱导 ARGs 选择压力风险

与传统的生态毒性评估主要关注生物的急性或慢性毒性不同, 环境中低浓度抗生素(通常为 $\text{ng}\sim\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别)由于长期暴露的特性, 更易对微生物群落施加选择压力, 导致抗生素抗性基因(ARGs)在环境中的富集与扩散。研究表明, 抗生素即使浓度远低于最小抑菌浓度(MIC), 仍然能够作为“亚抑制浓度选择因子”, 从而在微生物群落中促进耐药菌株的竞争优势, 并帮助抗性基因在环境中保持稳定。低浓度、长期暴露的抗性风险具有潜伏性强、累积效应显著的特点, 且往往无法通过传统的基于毒性阈值的生态风险评估方法充分识别。在水环境中, 抗生素残留不仅直接影响微生物群落结构, 还可通过促进水平基因转移(horizontal gene transfer, HGT)显著加速 ARGs 在不同细菌之间的传播。污水处理厂出水、河流及沉积物被认为是抗生素、抗性菌(ARB)和 ARGs 的重要汇集与扩散节点, 其中活性污泥和受纳水体为 ARGs 的扩增和转移提供了有利条件。研究显示, 即便在抗生素输入量降低后, 已建立的抗性基因库仍可在环境中长期维持, 并通过食物链、水体循环等途径对生态系统稳定性和公共健康构成潜在威胁。因此, 从生态风险评估角度看, 低浓度抗生素诱导的 ARGs 选择压力及其传播风险, 已成为水环境抗生素污染研究中亟需重点关注的关键问题, 其危害性在时间尺度和空间尺度上可能超过单一化合物毒性效应本身[83]。

6. 结论

综合国内外研究结果表明, 不同国家和地区水体中抗生素的检出水平与分布特征存在显著差异。针对中国不同环境介质中四大类抗生素的赋存特征与迁移行为进行系统梳理后, 可得到以下认识:

(1) 抗生素污染在我国水环境中具有普遍存在但区域差异显著的特征。总体上, 华东、华北和华南地区污染水平相对较高, 部分河流和湖泊水体中抗生素浓度可达 $100\sim 200\text{ ng/L}$ 以上。不同水体类型中, 河流的污染程度普遍高于湖泊和海湾, 城市水体间的差异反映了人类活动强度和污水处理水平的影响。

(2) 抗生素在水环境中的迁移行为受其理化性质与环境条件的共同调控, 表现出多相共存和显著的环境依赖性。与传统疏水性有机污染物不同, 抗生素因具有多重电离性和两性分子结构, 其迁移过程同时受到理化作用与生物转化的影响, 呈现出更强的动态性和复杂性。

(3) 在空间分布上, 我国水体抗生素污染呈现普遍性与地域分异性并存的格局。北方河流中氟喹诺酮类和磺胺类抗生素占主导地位, 南方水体则表现出不同的抗生素风险谱系。总体而言, 部分区域的抗生素污染风险仍不容忽视, 有必要加强重点流域监测, 并结合迁移机制研究推进精准风险管控。

基金项目

河南省青年骨干教师培养计划(2024GGJS063); 华北水利水电大学青年教师培养计划(202413704); 河南省高等学校重点科研项目(24B610004)。

参考文献

- [1] Wang, H., Gao, X. and Zuo, Y. (2024) Research and Application of Water Treatment Technologies for Emerging Contaminants (ECs): A Pathway to Solving Water Environment Challenges. *Water*, **16**, Article No. 1837. <https://doi.org/10.3390/w16131837>
- [2] Li, S., Shi, W., Liu, W., Li, H., Zhang, W., Hu, J., et al. (2018) A Duodecennial National Synthesis of Antibiotics in China's Major Rivers and Seas (2005-2016). *Science of the Total Environment*, **615**, 906-917. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.328>
- [3] 王亚韡, 张秋瑞, 于南洋, 等. 新污染物[J]. 化学进展, 2024, 36(11): 1607-1784.
- [4] 彭怡荫, 陈希, 杨立彬, 刘畅, 郇学军, 卢仪思, 于茹月. 黄河流域新污染物研究发文现状分析及治理进展[J/OL]. 生态与农村环境学报, 2025-06-06. <https://link.cnki.net/doi/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0268>, 2025-10-12.
- [5] Tang, J., Han, Y., Zha, Y. and Li, X. (2024) Distribution, Seasonal Characteristics, Ecological Risks and Human Health Risks of 9 Antibiotics in the Main Water Environment of Anhui Province, China. *Frontiers in Environmental Science*, **12**, Article ID: 1408363. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1408363>
- [6] Liu, D., Xu, Y., Junaid, M., Zhu, Y. and Wang, J. (2022) Distribution, Transfer, Ecological and Human Health Risks of Antibiotics in Bay Ecosystems. *Environment International*, **158**, Article ID: 106949. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106949>
- [7] Zhao, S., Liu, X., Cheng, D., Liu, G., Liang, B., Cui, B., et al. (2016) Temporal-Spatial Variation and Partitioning Prediction of Antibiotics in Surface Water and Sediments from the Intertidal Zones of the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, **569**, 1350-1358. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.216>
- [8] 赵晓帅, 郑其冰, 马瑞, 等. 北京市城市河流中抗生素的污染特征及多层次生态风险评估[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3165-3175.
- [9] Tong, L., Huang, S., Wang, Y., Liu, H. and Li, M. (2014) Occurrence of Antibiotics in the Aquatic Environment of Jiangnan Plain, Central China. *Science of The Total Environment*, **497**, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.068>
- [10] Li, S., Liu, Y., Wu, Y., Hu, J., Zhang, Y., Sun, Q., et al. (2022) Antibiotics in Global Rivers. *National Science Open*, **1**, 99-119. <https://doi.org/10.1360/nso/20220029>
- [11] Zhang, Q., Zhang, G., Liu, D., Zhang, X., Fang, R., Wang, L., et al. (2022) A Dataset of Distribution of Antibiotic Occurrence in Solid Environmental Matrices in China. *Scientific Data*, **9**, Article No. 276. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01384-5>
- [12] Deng, W., Li, N. and Ying, G. (2018) Antibiotic Distribution, Risk Assessment, and Microbial Diversity in River Water and Sediment in Hong Kong. *Environmental Geochemistry and Health*, **40**, 2191-2203. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0092-1>
- [13] Li, Y., Ding, J., Zhang, L., Liu, X. and Wang, G. (2019) Occurrence and Ranking of Pharmaceuticals in the Major Rivers of China. *Science of the Total Environment*, **696**, Article ID: 133991. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133991>
- [14] Cao, S., Zhang, P., Halsall, C., Hou, Z. and Ge, L. (2024) Occurrence and Seasonal Variations of Antibiotic Micro-Pollutants in the Wei River, China. *Environmental Research*, **252**, Article ID: 118863. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118863>
- [15] 任骄阳. 北京市潮白河流域抗生素污染分布与风险评估[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [16] 牛颖, 安圣, 陈凯, 等. 2012~2021 年中国地下水抗生素污染现状及分析技术研究进展[J]. 岩矿测试, 2023, 42(1): 39-58.
- [17] 吴雯艳, 胡红美, 何鹏飞, 等. 水环境中磺胺类抗生素的超高效液相色谱-串联质谱法测定及其生态风险评估[J]. 分析化学, 2024, 52(8): 1182-1200.
- [18] Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Thurman, E.M., Zaugg, S.D., Barber, L.B., et al. (2002) Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999-2000: A National Reconnaissance. *Environmental Science & Technology*, **36**, 1202-1211. <https://doi.org/10.1021/es011055j>
- [19] Watkinson, A.J., Murby, E.J., Kolpin, D.W. and Costanzo, S.D. (2009) The Occurrence of Antibiotics in an Urban Watershed: From Wastewater to Drinking Water. *Science of the Total Environment*, **407**, 2711-2723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.059>
- [20] Ngumba, E., Gachanja, A. and Tuhkanen, T. (2016) Occurrence of Selected Antibiotics and Antiretroviral Drugs in Nairobi River Basin, Kenya. *Science of the Total Environment*, **539**, 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.139>
- [21] Duan, W., Cui, H., Jia, X. and Huang, X. (2022) Occurrence and Ecotoxicity of Sulfonamides in the Aquatic Environment:

- A Review. *Science of the Total Environment*, **820**, Article ID: 153178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153178>
- [22] Dinh, Q.T., Moreau-Guigon, E., Labadie, P., Alliot, F., Teil, M., Blanchard, M., *et al.* (2017) Occurrence of Antibiotics in Rural Catchments. *Chemosphere*, **168**, 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.106>
- [23] 于娇, 金凯馨, 吴玲玲. 浅谈抗生素在中国多介质中污染现状研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(7): 1635-1640.
- [24] Li, Z., Li, M., Zhang, Z., Li, P., Zang, Y. and Liu, X. (2020) Antibiotics in Aquatic Environments of China: A Review and Meta-Analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **199**, Article ID: 110668. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110668>
- [25] 李清雪, 董天羽, 孙王茹, 等. 典型北方城市河流中抗生素污染特征及风险评价[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(4): 213-229.
- [26] Yu, Y., Wu, G., Wang, C., Lu, N., Yuan, X. and Zhu, X. (2019) Pollution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance of Coliform Bacteria in the Yitong River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **191**, Article No. 516. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7660-4>
- [27] Lü, D., Yu, C., Zhuo, Z., Meng, S. and Liu, S. (2022) The Distribution and Ecological Risks of Antibiotics in Surface Water in Key Cities along the Lower Reaches of the Yellow River: A Case Study of Kaifeng City, China. *China Geology*, **5**, 1-10. <https://doi.org/10.31035/cg2022032>
- [28] 韩金龙. 补水过程中喹诺酮类抗生素迁移规律研究[D]: [硕士学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
- [29] 孟顺龙, 李鸣霄, 陈曦, 等. 我国典型淡水水域环境中喹诺酮类抗生素污染的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(3): 580-593.
- [30] Ci, M., Zhang, G., Yan, X., Dong, W., Xu, W., Wang, W., *et al.* (2021) Occurrence of Antibiotics in the Xiaoqing River Basin and Antibiotic Source Contribution—A Case Study of Jinan City, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 25241-25254. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12202-z>
- [31] 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 等. 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5286-5293.
- [32] 蒋煜, 王世全, 杨帆, 等. 我国典型流域地表水中抗生素污染现状及生态风险评价[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(6): 217-224.
- [33] 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 等. 北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5074-5080.
- [34] 杨大杰, 欧阳友, 李炳华, 等. 我国水环境中喹诺酮类抗生素赋存特征及生态风险评估[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 97-108.
- [35] 付彩霞, 宋伟, 裘文慧, 等. 粤港澳大湾区典型抗生素环境分布特征与生态风险[J]. 地球环境学报, 2024, 15(5): 711-727.
- [36] 韩迁, 张玉娇, 赖承钺, 等. 成都市河流中四环素、喹诺酮类抗生素污染特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2023, 32(11): 1922-1932.
- [37] 赵富强, 高会, 张克玉, 等. 中国典型河流域抗生素的赋存状况及风险评估研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(1): 94-102.
- [38] 张凤娇, 毛旭锋, 魏晓燕, 等. 青海西宁城市湿地地表水中抗生素的赋存特征和生态风险[J]. 湿地科学, 2024, 22(3): 453-462.
- [39] Li, Q., Gao, J., Zhang, Q., Liang, L. and Tao, H. (2017) Distribution and Risk Assessment of Antibiotics in a Typical River in North China Plain. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **98**, 478-483. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-2023-0>
- [40] 李敏. 水中多种大环内酯和磺胺类抗生素的同时分析方法构建及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2023.
- [41] 杨妍, 王子宇, 葛林科, 等. 我国水体中大环内酯类抗生素的分布特征及环境光化学行为[J]. 环境化学, 2024, 43(3): 734-750.
- [42] 张文斌, 赵晶, 张秀, 等. 重庆市水环境中抗生素的污染特征及其风险评价[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(6): 314-324.
- [43] 黄丹瑜, 王晟, 程龙, 等. 南渡江流域抗生素污染的时空变化及多层次生态风险评估[J/OL]. 环境科学, 2025-01-14. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjxx.202501140>, 2025-06-18.
- [44] Cao, M., Fan, J., Guo, C., Chen, M., Lv, J., Sun, W., *et al.* (2023) Comprehensive Investigation and Risk Assessment of Organic Contaminants in Yellow River Estuary Using Suspect and Nontarget Screening Strategies. *Environment International*, **173**, Article ID: 107843. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107843>

- [45] Lao, X., Tam, N.F.Y., Zhong, M., Wu, Q., Liu, Z., Huang, X., *et al.* (2024) Distribution and Risk Assessment of Antibiotic and Bisphenol Compounds Residues in Drinking Water Sources of Guangdong. *Environmental Earth Sciences*, **83**, Article No. 475. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11756-2>
- [46] 周瑞娟, 孟江红, 张卫红, 等. 黄河宁夏段干流 PPCPs 时空分布特征及生态风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(2): 610-620.
- [47] Xu, L., Zhang, H., Xiong, P., Zhu, Q., Liao, C. and Jiang, G. (2021) Occurrence, Fate, and Risk Assessment of Typical Tetracycline Antibiotics in the Aquatic Environment: A Review. *Science of the Total Environment*, **753**, Article ID: 141975. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141975>
- [48] Zhang, J., Yang, Y., Sun, C. and Wu, L. (2023) Sample Preparation and Instrumental Detection Methods for Tetracycline Antibiotics. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **104**, 8102-8131. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2193890>
- [49] Zhang, Q., Ying, G., Pan, C., Liu, Y. and Zhao, J. (2015) Comprehensive Evaluation of Antibiotics Emission and Fate in the River Basins of China: Source Analysis, Multimedia Modeling, and Linkage to Bacterial Resistance. *Environmental Science & Technology*, **49**, 6772-6782. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00729>
- [50] Matviichuk, O., Mondamert, L., Geffroy, C., Dagot, C. and Labanowski, J. (2023) Life in an Unsuspected Antibiotics World: River Biofilms. *Water Research*, **231**, Article ID: 119611. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119611>
- [51] Moles, S., Gozzo, S., Ormad, M.P., Mosteo, R., Gómez, J., Laborda, F., *et al.* (2022) Long-Term Study of Antibiotic Presence in Ebro River Basin (Spain): Identification of the Emission Sources. *Water*, **14**, Article No. 1033. <https://doi.org/10.3390/w14071033>
- [52] Danner, M., Robertson, A., Behrends, V. and Reiss, J. (2019) Antibiotic Pollution in Surface Fresh Waters: Occurrence and Effects. *Science of the Total Environment*, **664**, 793-804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.406>
- [53] 张杨权, 栾杰, 冯琳, 等. 我国西南地区地表水抗生素分布特征及环境效应研究进展[J]. 中国公共卫生管理, 2025, 41(1): 62-66.
- [54] Yi, C., Shang, J., Shen, Z., Sun, Y., Yang, Y., Zheng, X., *et al.* (2025) Distribution and Risk Characteristics of Antibiotics in China Surface Water from 2013 to 2024. *Chemosphere*, **375**, Article ID: 144197. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144197>
- [55] Yin, Z. (2021) Distribution and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in the Surface Waters of Seven Major Rivers, China. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **23**, 1088-1100. <https://doi.org/10.1039/d1em00079a>
- [56] Zhang, C., Chen, Y., Chen, S., Guan, X., Zhong, Y. and Yang, Q. (2023) Occurrence, Risk Assessment, and *in Vitro* and *in Vivo* Toxicity of Antibiotics in Surface Water in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **255**, Article ID: 114817. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114817>
- [57] 门聪, 蔡恒江, 傅晗, 等. 北京市通州区河流中抗生素的赋存特征、生态风险及主要来源[J]. 环境科学, 2025, 46(10): 6264-6273.
- [58] Huang, F., An, Z., Moran, M.J. and Liu, F. (2020) Recognition of Typical Antibiotic Residues in Environmental Media Related to Groundwater in China (2009-2019). *Journal of Hazardous Materials*, **399**, Article ID: 122813. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122813>
- [59] 陈桂淋, 武广元, 苏帆, 等. 我国地下水抗生素污染及生态风险研究进展[J]. 地下水, 2020, 42(5): 8-13.
- [60] 王妍妍, 曹文庚, 龙敏, 等. 含抗生素地下水的时空分布、治理技术现状与进展[J/OL]. 中国地质, 2024-09-03. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240903.1111.004>, 2025-08-09.
- [61] 孔慧敏, 赵晓辉, 徐琬, 等. 我国地下水环境抗生素赋存现状及风险评价[J]. 环境工程, 2023, 41(2): 219-226.
- [62] Wang, L., Li, H., Dang, J., Guo, H., Zhu, Y. and Han, W. (2021) Occurrence, Distribution, and Partitioning of Antibiotics in Surface Water and Sediment in a Typical Tributary of Yellow River, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 28207-28221. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12634-1>
- [63] 徐琳, 罗义, 徐冰洁. 海河底泥中 12 种抗生素残留的液相色谱串联质谱同时检测[J]. 分析测试学报, 2010, 29(1): 17-21.
- [64] 刘叶新, 周志洪, 区晖, 等. 珠江广州河段沉积物中典型抗生素的污染特征[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2018, 50(4): 48-54.
- [65] 李威, 李佳熙, 李吉平, 等. 我国不同环境介质中的抗生素污染特征研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 205-214.
- [66] 沈娴, 李西西, 任浩宇, 等. 白洋淀不同功能区上覆水和沉积物典型抗生素的赋存与生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2025, 37(6): 2077-2089.
- [67] Liu, X., Lu, S., Guo, W., Xi, B. and Wang, W. (2018) Antibiotics in the Aquatic Environments: A Review of Lakes,

- China. *Science of the Total Environment*, **627**, 1195-1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.271>
- [68] 陈金明, 卢少勇, 葛飞, 等. 东洞庭湖表层沉积物中抗生素及抗性基因的时空分异特征[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 697-705.
- [69] 桑文才. 南四湖沉积物中抗生素及其抗性基因的赋存特征和环境风险[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2023.
- [70] Yuan, Q., Sui, M., Qin, C., Zhang, H., Sun, Y., Luo, S., *et al.* (2022) Migration, Transformation and Removal of Macrolide Antibiotics in the Environment: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 26045-26062. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18251-2>
- [71] 王晓娟, 年夫照, 夏运生, 等. 抗生素使用现状及其在生态环境系统的行为研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 286-292.
- [72] 田永静, 武宇圣, 黄天寅, 等. 我国地表水和沉积物 PPCPs 赋存与交互迁移影响因素[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 585-596.
- [73] 王浩加, 李子琼, 郑子帅, 等. 不同水文时期河流中典型抗生素的分配系数及其在沉积物中的生态风险[J]. 环境科学学报, 2026, 46(1): 178-193.
- [74] 孟磊, 杨兵, 薛南冬. 氟喹诺酮类抗生素环境行为及其生态毒理研究进展[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 76-88.
- [75] 王萌. 鄱阳湖周边水体典型抗生素检测、分布与生态风险评价[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
- [76] Luo, Y., Sun, Y., Wei, X., He, Y., Wang, H., Cui, Z., *et al.* (2024) Detection Methods for Antibiotics in Wastewater: A Review. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **47**, 1433-1451. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03033-0>
- [77] Badawy, M.E.I., El-Nouby, M.A.M., Kimani, P.K., Lim, L.W. and Rabea, E.I. (2022) A Review of the Modern Principles and Applications of Solid-Phase Extraction Techniques in Chromatographic Analysis. *Analytical Sciences*, **38**, 1457-1487. <https://doi.org/10.1007/s44211-022-00190-8>
- [78] 孟甜甜, 杨丰春, 赵传明, 等. 高效液相色谱-三重四极杆质谱联用法测定水体及土壤中 6 种抗生素[J]. 环境化学, 2024, 43(10): 3574-3578.
- [79] 刘远飞. 珠三角典型城市制药企业和周边水环境抗生素的污染特征及风险评价[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [80] Coleman, M.E. and Marks, H.M. (1999) Qualitative and Quantitative Risk Assessment. *Food Control*, **10**, 289-297. [https://doi.org/10.1016/s0956-7135\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/s0956-7135(99)00052-3)
- [81] 陈昱如. 长江流域典型抗生素的归趋模拟及风险削减研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2024.
- [82] Wang, J., Wei, H., Zhou, X., Li, K., Wu, W. and Guo, M. (2019) Occurrence and Risk Assessment of Antibiotics in the Xi'an Section of the Weihe River, Northwestern China. *Marine Pollution Bulletin*, **146**, 794-800. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.016>
- [83] Shao, S., Hu, Y., Cheng, J. and Chen, Y. (2018) Research Progress on Distribution, Migration, Transformation of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Aquatic Environment. *Critical Reviews in Biotechnology*, **38**, 1195-1208. <https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1471038>