

# 环境中的抗生素和抗性基因的分布迁移转化研究进展

黄俞童, 张志恒, 黄恒安, 卢恺富, 庞兴龙, 黄月群, 董堃\*

桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年1月17日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月27日

## 摘要

由于过度使用抗生素导致抗生素耐药细菌(Antibiotic resistant bacteria, ARB)和抗生素耐药基因(Antibiotic resistance genes, ARGs)在环境中的出现和传播, 二者被视为严重威胁着全球公共卫生的新兴环境污染物。因此对环境中的抗生素和抗性基因分布、迁移、转化, ARGs和ARB之间的关系进行了综述。最后本文还提出了抗生素和ARGs未来的研究方向。

## 关键词

抗生素抗性基因, 抗生素, 耐药菌, 迁移, 转化

# Advances in Research on the Distribution, Migration and Transformation of Antibiotics and Resistance Genes in the Environment

Yutong Huang, Zhiheng Zhang, Hengan Huang, Kaifu Lu, Xinglong Pang, Yuequn Huang, Kun Dong\*

School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jan. 17<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As overuse of antibiotics leads to the emergence and spread of antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistance genes (ARGs) in the environment, they are considered as emerging envi-

\*通讯作者。

文章引用: 黄俞童, 张志恒, 黄恒安, 卢恺富, 庞兴龙, 黄月群, 董堃. 环境中的抗生素和抗性基因的分布迁移转化研究进展[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(1): 126-130. DOI: 10.12677/aep.2023.131015

ronmental pollutants that seriously threaten global public health. Therefore, the distribution, migration and transformation of antibiotics and resistance genes in the environment, and the relationship between ARGs and ARBs were reviewed. Finally, the future research directions of antibiotics and ARGs are proposed.

## Keywords

Antibiotic Resistance Gene, Antibiotic, Antibiotic Resistant Bacteria, Migration, Conversion

Copyright © 2023 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

抗生素是一种被应用广泛的化学药剂，不仅在预防和治疗疾病方面发挥着重要作用，而且可以作为生长促进剂应用于养殖业[1]。随着我国抗生素应用至疾病和养殖业的需求量和消耗量不断增加，大量的抗生素通过生物的食物链进入到环境中[2]，但是现在绝大多数的抗生素难以被人和动物吸收。我国是世界上最大的抗生素生产国和消耗国，滥用的情况较为明显，据统计国内的水产养殖业抗生素的使用量超过 1 万吨[3]。现在已经在海湾、湖泊、河口等多水域中检测超过 70 种抗生素[4]。本文就抗生素的种类及其在河流、沉积物、海水中的分布、迁移转化，ARGs 与抗生素、微生物群落和环境因子间的关联特性，潜在的风险等进行综述。

## 2. 抗生素的分类

根据其化学结构，抗生素分为几类，包括大环内酯类、 $\beta$ -内酰胺类、四环素类、喹诺酮类、氟喹诺酮类、磺胺类、和青霉素类。抗生素在不同环境(如水、土壤和大气)中存在的趋势取决于其理化性质、辛醇/水分度系数(Kow)、分配系数(Kd)、分离常数(pKa)、蒸气压和亨利定律常数(KH)青霉素等抗生素在环境中容易分解。同时，氟喹诺酮类和四环素类药物更稳定，因此它们可以在环境中存在更长时间，传播更多，最终以更高的浓度积累。环丙沙星和红霉素也耐降解，因为它们的结构中缺乏  $\beta$ -内酰胺。氟喹诺酮类和磺胺类药物是最危险的抗生素；然而，这些抗生素可能会因阳光照射而降解。这两种抗生素(氟喹诺酮类和磺胺类药物)对环境的影响包括可能的硝化和反硝化过程，亚硝酸盐和氮氧化物在水生环境中的积累。抗生素根据其化学结构和功能可分为不同的类别，如  $\beta$ -内酰胺类(BLs)、氟喹诺酮类(FQs)、大环内酯类(MLs)、磺胺类(SFs)、四环素类(TCs)等[5]。

大环内酯(ML)抗生素形成一组 12~16 个器官内酯环，被一种或多种糖(氨基糖)取代。该组的其他特征包括亲脂性，在水中溶解度低，弱酸性。大环内酯类药物通常具有抑菌性；然而，其中一些药物在非常高浓度下可能具有杀菌作用。该组常用于治疗呼吸道、皮肤和软组织感染[6]。

磺胺类药物(SAs)来源于对氨基苯 - 磺酰胺官能团。该基团具有酸性和碱性[7]。这些抗生素是世界上使用最广泛的抗生素之一。这些抗生素在光热下的分解半衰期超过一年。与其他抗生素相比，它们对固体基质的吸附能力也相对较低。此外，这种类型的抗生素的其他应用是作为缓蚀剂和聚合物的生产。这些抗生素最常用于兽医学[8]。

四环素类是用于兽医和人类医学、农业的主要抗生素之一，并作为食品添加剂促进动物的生长。这

些是两性且可降解的抗生素，碱性不稳定，但在酸中稳定。这些抗生素造成严重的环境问题，并对人类健康造成严重损害。由于常规污水处理不能完全消除这些微污染物，据报道，处理厂中四环素的去除效率在 12%~80% 之间[9]。研究表明，用于治疗动物的四环素药物中约有 25%~75% 或 70%~90% 通过尿液和粪便进入环境。

喹诺酮类药物的特性是脂溶性和耐酸性水解、碱度、高温和紫外线辐射损伤。该组有许多应用，包括传染病的治疗和促进畜牧业和水产养殖业[10]。它们通过未经处理的人类和动物废水或水产养殖产品直接排放进入水生环境。

### 3. 河流中抗生素抗性基因的分布及迁移转化

调查抗生素在水生环境中的发生有助于我们评估它们对生态系统平衡的潜在威胁[11]。由于抗生素污染，许多河流面临严重问题。水生环境中抗生素的存在导致这些污染物在生物群中的积累[12]。近年来，抗生素因其对河流系统中的水生生态系统和公共健康的潜在威胁而脱颖而出[4]。在地表水、地下水和饮用水中经常发现各种抗生素。河流中高浓度的抗生素也会影响人群、生物体和水流。流经河流中污染物的浓度一直在增加，这是由于污水排放到这些水源造成的。此外，与上游相比，河流下游的人口密度、脱水以及季节性径流的连续流量不足是河流下游抗生素浓度高的主要因素[13]。对人类抗生素认知和作用机制的研究表明，它们在鱼类、藻类、鸟类和其他生活在河流中的物种中的功能不同。暴露于污水的河流中的抗生素浓度高于未暴露于污水的河流。河口沉积物是抗生素的储存库，也是受环境条件变化影响的二次污染的潜在来源[14]。降低河流中抗生素的浓度可能与稀释效应有关。废水和流出物中浓度的变化是由于污染物的化学转化以及净化系统对去除抗生素几乎没有影响[15]。已经进行了许多研究来评估世界各地河流中的抗生素。有关丹江口水库和汉江 ARGs 的污染现状与分布规律的研究，采用高通量测序的方法，在春秋两季样本中检测出 21 和 19 类 ARGs，其中 9 类 ARGs 是水体 ARGs 的主要组成部分。杆菌肽类 ARGs 是水体中最主要的 ARGs，而  $\beta$ -内酰胺类 ARGs 在春季丹江口水库陶岔采样点中占比最高。秋季水体各采样点的 ARGs 组成结构差异比春季小，通过 NMDS 和 ANOSIM 分析发现 ARGs 的组成存在显著的季节差异，甲氧苄氨嘧啶类、多粘菌素类和多重耐药类 ARGs 是具有显著季节差异的 ARGs 种类。由相关性分析发现 13 类具有互相显著强相关关系的 ARGs，其中相关性最强的 ARGs 很可能共存于一种微生物中。此外，四环素类和氨基糖苷类 ARGs 可能作为预测水源区中与其共存 ARGs 相对丰度的指示种类。

### 4. 沉积物中的抗生素抗性基因分布及其迁移转化

Yuan 等[16]对杭州湾典型的水产养殖区的水源、池塘水体、沉积物中检测到 8 中抗生素，浓度最高可达到 39.62 ng/L、102.80 ng/L 和 13.60 ng/g。黄薇等[17]在大黄鱼养殖海域的沉积物利用宏基因组测序技术，共检测出 781 个 ARGs 亚型。沉积物被认为是污染的宿主，并接收大量的有机污染物。抗生素通过农业和水产养殖活动的废水进入水生环境，最终到达沉积物。沉积物由于其高吸收能力而充当抗生素的储存库。海南省东寨滩涂养殖基地采集该区域的海水和沉积物，ARGs 在各沉积物样品中的检出率均为 100%，海水样品中 ARGs 的检出率在 80%~100% 之间。其中，*qnr S* 的检出率最高，存在于所有海水和沉积物样品中，而 *sul2* 的检出丰度最高。比较海水和沉积物中 ARGs 的相对丰度，发现沉积物中 ARGs 的污染程度高于海水[18]。沉积物中抗生素的浓度取决于季节变化、水流、沉积物特征以及该地区抗生素的使用量，随着时间的推移，沉积物中的微生物活动可以降低抗生素的浓度。然而，一些抗生素或其代谢物可以在环境中停留很长时间，具体取决于条件。许多抗生素可以与沉积物颗粒结合。研究表明，抗生素在沉积物中的吸收受水流量和体积及其理化性质变化的影响，根据既往研究，存在溶解性有机碳和胶体物质时，抗生素的迁移性增加[19]。沉积物是抗生素抗性基因积累和繁殖的理想环境，抗生素随时间

推移的吸收或排泄以及环境温度升高等因素会降低水生环境中抗生素的浓度,并最终降低沉积物的浓度。

## 5. 海水中抗生素的分布

抗生素在环境中的稳定性和积累会危及人类健康。这些化合物在水资源中的存在已成为最重要的公共卫生问题之一。已经进行了许多研究来确定抗生素在水生环境中的命运和作用。在海洋环境中,寒冷季节的抗生素浓度高于温暖季节。抗生素继续进入环境可能会通过食物链对生态系统和人类构成潜在风险。欧盟的研究表明,环丙沙星(CIX)、氧氟沙星(OFX)、红霉素(ETM)和磺胺嘧啶(SDZ)可能对水生生物构成较高的环境风险。人类和其他生物体使用 100 多种抗生素。到目前为止,已在地表水和沉积物中观察到 70 种抗生素在中国黄海,抗生素 ENR 和 CIP 在海水样品中的发生率最高,浓度分别为 0.56~125.96 ng/L 和 14.94~48.26 ng/L [20]。

可以得出结论,在不同的抗生素中,氟喹诺酮类和磺胺类药物在大多数研究环境中的浓度最高。海洋、湖泊和河流沉积物中氟喹诺酮类药物的平均浓度为 539.79 ng/g,海洋和湖泊水中氟喹诺酮类药物的平均浓度分别为 204.85 ng/L 和 369.74 ng/L。此外,磺胺类药物在河流中的浓度最高,平均浓度为 191.11 ng/L。虾、鱼等水生组织中的抗生素会威胁人类作为这些水生生物消费者的健康。据报道,氟喹诺酮类药物是海洋生物(鱼、虾、牡蛎、长须鲸等)中含量最高的抗生素,其平均浓度为 145.77 ng/g。在世界不同国家中,报告的抗生素浓度最高的是中国。此外,在水生环境中进行的研究结果显示,暴露于各种废水(城市、农村、兽医、水产养殖等)的环境具有更高的浓度和更多种类的不同抗生素。因此,有必要采取必要的方法来减少这些污染物进入环境。对于将来的调查,可以提出以下建议:

检测更多水生生物中抗生素的浓度。抗生素的功能在不同的生物体中是不同的;因此,有必要同时研究不同生物(鱼,藻类等)中抗生素的浓度。由于抗生素可以在水生环境的沉积物中积累,因此建议未来的研究研究不同深度沉积物中抗生素的浓度。抗生素的广泛使用和缺乏先进的污水处理系统造成了水源污染,因此需要更多地检测抗生素污染并改进处理系统以去除污染物。

## 基金项目

广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2022117);广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2021KY0265)。

## 参考文献

- [1] Gothwal, R. and Shashidhar, T. (2015) Antibiotic Pollution in the Environment: A Review. *CLEAN—Soil, Air, Water*, **43**, 479-489. <https://doi.org/10.1002/clen.201300989>
- [2] Lin, X.M., Lin, L., Yao, Z.J., et al. (2015) An Integrated Quantitative and Targeted Proteomics Reveals Fitness Mechanisms of *Aeromonas hydrophila* under Oxytetracycline Stress. *Journal of Proteome Research*, **14**, 1515-1525. <https://doi.org/10.1021/pr501188g>
- [3] Li, S.J., Ju, H.Y., Zhang, J.Q., et al. (2019) Occurrence and Distribution of Selected Antibiotics in the Surface Waters and Ecological Risk Assessment Based on the Theory of Natural Disaster. *Environmental Science and Pollution Research International*, **26**, 28384-28400. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06060-7>
- [4] 赵富强,高会,张克玉,孔亮,那广水.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. <https://doi.org/10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.01.018>
- [5] 吴长青,冯俊,沈滢,张玉柱.动物源性食品中抗生素残留的分类及检测方法的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2019,10(21):7126-7132. <https://doi.org/10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2019.21.006>
- [6] 岑霞,程思宇,石宗民,谢卓鸿,张凌菱,杨滨,应光国.大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制[J/OL].环境科学,1-10. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202209221>, 2022-12-13.
- [7] 秦立得,张小雨,赵思俊,李陆梅,李木子,宋翠平.畜禽养殖业中磺胺类药物对农田土壤的影响及降解措施研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2022(20):25-30+35. <https://doi.org/10.13881/j.cnki.hljxmsy.2021.11.0124>

- [8] Zainab, S.M., Junaid, M., Rehman, M.Y.A., *et al.* (2021) First Insight into the Occurrence, Spatial Distribution, Sources, and Risks Assessment of Antibiotics in Groundwater from Major Urban-Rural Settings of Pakistan. *Science of the Total Environment*, **791**, Article ID: 148298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148298>
- [9] 张冰, 赵琳, 陈坦. 城市污水处理厂抗生素抗性基因研究进展[J/OL]. 环境工程技术学报, 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20221207.1536.001.html>, 2022-12-13.
- [10] 潘智宇, 印尤强, 苏玉斌. 常见抗生素与新型抗菌药物在临床上的研究应用进展[J]. 中国抗生素杂志, 2022, 47(9): 865-871. <https://doi.org/10.13461/j.cnki.cja.007384>
- [11] 张国栋, 董文平, 刘晓晖, 刘莹, 张玲丽, 闫先收, 王炜亮. 我国水环境中抗生素赋存、归趋及风险评估研究进展[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1491-1500.
- [12] 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉. 辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4553-4561. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201704206>
- [13] 唐娜, 张圣虎, 陈致宏, 宋宁慧, 徐怀洲, 张芹. 长江南京段表层水体中 12 种磺胺类抗生素的污染水平及风险评估[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 505-512.
- [14] 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升. 白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5303-5311. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202103061>
- [15] Liu, Y.H., Chen, Y., Feng, M.J., *et al.* (2021) Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes and Their Correlations in River-Type Drinking Water Source, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 42339-42352. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13637-8>
- [16] Yuan, J.L., Ni, M., Liu, M., *et al.* (2019) Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in a Typical Estuary Aquaculture Region of Hangzhou Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, **138**, 376-384. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.037>
- [17] 黄薇, 刘洋, 饶秋华, 罗钦, 王为刚, 宋永康, 罗士炎. 大黄鱼养殖海域沉积物中抗生素抗性基因分布特征及其影响因素[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20221011.1724.004.html>, 2022-12-13.
- [18] 姜春霞, 黎平, 李森楠, 刁晓平, 黄炜, 王道儒, 叶翠杏. 海南东寨港海水和沉积物中抗生素抗性基因污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 128-135. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.01.015>
- [19] Anthony, G.L., Tang, X.Y., Liu, C. and Cheng, J.H. (2022) Transport of Veterinary Antibiotics in Farmland Soil: Effects of Dissolved Organic Matter. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, 1702. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031702>
- [20] 李兆新, 董晓, 吴蒙蒙, 孙晓杰, 彭吉星, 邢丽红, 郭萌萌, 潘明轩. 黄海桑沟湾养殖区海水中喹诺酮类抗生素的残留状况[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(2): 182-186+192. <https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2018.02.004>