

河南省不同环境介质抗生素污染特征与生态风险

王硕, 陈伟胜, 童玲, 谷梦洁, 杨恩照, 昂加, 高翔

(华北水利水电大学 生态环境学院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】为考察河南省多环境介质抗生素污染状况, 本研究系统分析水、土和沉积物及食品中抗生素的污染特征, 并评估其生态风险。【方法】基于文献数据, 对比分析了不同环境介质中抗生素的检出率和污染水平, 并采用风险熵值法和食品安全指数法分别评估了水体和沉积物的生态风险与食品的膳食暴露风险。【结果】①各介质中抗生素检出种类数量依次为: 河流湖泊 (28 种) > 土壤和沉积物 (13 种) > 饮用水 (12 种) > 食品 (9 种)。②检出率最高的抗生素依次为大环内酯类 (罗红霉素)、四环素类 (土霉素)、磺胺类 (磺胺嘧啶) 和喹诺酮类 (恩诺沙星)。四环素类在各种介质中的浓度均为最高。③生态风险评价显示, 河流湖泊中 12 种抗生素存在高风险, 土壤和沉积物中 8 种存在高风险, 四环素类和喹诺酮类是较为突出的高风险类别。食品的膳食暴露风险在安全阈值内。【结论】揭示了河南省不同环境介质中抗生素污染特征与生态风险的显著分异, 特别是四环素类的高风险主导地位, 为识别区域优先控制污染物提供了关键数据支持。

关键词: 抗生素; 环境介质; 污染特征; 生态风险; 河南

中图分类号: X820.4; X592 **文献标志码:** A **文章编号:**

收稿时间/Received: 2025-11-17

修回日期/Revised: 2026-02-04

基金项目: 河南省重点研发专项 (No.241111320200); 河南省 2025 年科技发展计划 (No.252400410365)。

第一作者: 王硕 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事流域新污染物防控方面的研究。

E-mail: z20241060634@stu.ncwu.edu.cn。

通信作者: 童玲 (1979—), 女, 副教授, 博士, 从事土壤污染与治理方面的研究。E-mail: tongling@ncwu.edu.cn。

抗生素是一类通过抑制微生物生长或杀灭病原体发挥作用的天然或人工合成化合物,在全球水体和其它环境介质中被广泛检出^[1]。我国作为全球最大的抗生素生产与消费国,约50%以上未被完全吸收的抗生素及其活性代谢产物进入环境,使其成为我国水体、土壤和沉积物中新型污染物的主要来源^[2]。磺胺类(Sulfonamides)、喹诺酮类(Quinolones)、四环素类(Tetracyclines)和大环内酯类(Macrolides)是我国消费量最大且在环境中残留最普遍的四类抗生素^[3]。已有研究表明,黄河流域、辽河流域、珠江三角洲、内蒙古等不同区域不同介质中呈现出不同抗生素污染特征,其分布受人口、地理与水文等因素综合影响^[4-5]。

抗生素进入环境后,会在水、土、气、生物等多介质间发生复杂的迁移与转化^[6]。因此,系统调查不同环境介质中抗生素的污染特征,是加强其环境管控、削减生态风险的迫切需求^[1]。现有研究多集中于长三角、珠三角等发达地区^[4],对于典型农业与人口大省——河南省的关注明显不足^[7]。河南省密集的畜禽养殖和医疗活动导致抗生素环境排放量较大,所带来的持久性、累积性及生态风险不容忽视。目前尚缺乏在省级尺度上系统的、对比性的多环境介质抗生素污染特征与生态风险的研究报道。本研究旨在系统分析河南省水、土和沉积物等典型环境介质中抗生素的污染水平、分布特征,并评估其生态风险,以期为该区域新污染物的治理与风险管控提供科学依据。

1 数据收集与生态风险评估方法

1.1 数据收集与处理

研究数据主要来源于 Web of Science 和 CNKI 知网已发表的文献,以“antibiotic/抗生素”“China/中国”“Henan/河南”以及河南省主要地市、河流湖泊等水体名称等作为关键词,

分别整理了河南省河流湖泊等地表水、土壤和沉积物、饮用水源及食品中的四类抗生素(大环内酯类、四环素类、磺胺类和喹诺酮类)浓度数据。筛选原则为:①具有抗生素浓度的数据,包含采样点数、平均值和最大值。②优先取用我省较新的具有代表性区域的数据。③数据分别来源期刊论文和学位论文时,优先选用期刊论文数据。④抗生素的分析检测为国家/行业标准方法或美国环保署标准方法。共获取近10年河南省境内水样160份,涵盖黄河干流(河南段)及其10条主要支流、沙颍河、惠济河、沂河、丹江口水库等重点水域,以及省内17个地市的主要水厂水源水与出厂水;收集土壤与沉积物样品102份,采集自丹江口水库与沙颍河沉积物,以及郑州市7个县级市区的农田、养殖场、冶炼厂周边等典型区域;另采集18个地市的鸡肉、鱼肉、蛋类及蔬菜等食品样品共计1433份。

将检出的文献报道抗生素数据分别归入地表水、土壤和沉积物、饮用水源、食品四类不同环境介质,综合点位数及检出抗生素的点位数,重新计算各环境介质不同抗生素的检出率。同时,比较不同文献报道的四类抗生素的累积浓度,以历史最高值计入,比较不同环境介质四类抗生素的浓度分布特征。

1.2 抗生素生态风险评估方法

1.2.1 水体抗生素生态风险评估方法

采用欧盟环境风险评价方法——风险熵值法(Risk Quotient, RQ)^[5]评估目标抗生素的生态风险。将环境中的抗生素风险分为4个层次:RQ≥10,表示高风险;10>RQ≥1,表示中等风险;1>RQ≥0.1,表示低风险;RQ<0.1,则认为几乎无风险^[8]。研究采用的抗生素浓度范围源于已有文献报道数据^[9-22],各种抗生素的水环境PNEC值均收集自己发表的学术文献与政府官方文件,其确定依据为最敏感生物的最敏感终点,详见表1。

表1 用于抗生素生态风险评估的水体抗生素预测无效应浓度

类别	抗生素名称	PNEC _{water} /(ng/L)	文献
磺胺类 (Sulfonamides, SAs)	磺胺喹噁啉(Sulfaquinolone, SQ)	131 000	[23]
	磺胺噻唑(Sulfathiazole, ST)	1 000	[24]
	磺胺甲噁唑(Sulfamethoxazole, SMZ)	27	[23]
	磺胺二甲嘧啶(Sulfadimidine, SM2)	3 550	[25]

	磺胺吡啶 (Sulfapyridine, SP)	10 000	[23]
	磺胺嘧啶 (Sulfadiazine, SD)	1 226	[23]
	磺胺氯吡嗪 (Sulfachloropyrazine, SCPZ)	8 030	[24]
	磺胺氯吡啶 (Sulfachloropyridazine, SCPD)	26 400	[23]
	磺胺甲氧吡嗪 (Sulfamethoxyypyridazine, SMP)	2 085	[24]
	磺胺间甲氧嘧啶 (Sulfamonomethoxine, SMM)	10 000	[23]
	磺胺甲噻二唑 (Sulfamethizole, SMT)	7 160	[26]
喹诺酮类 (Quinolones, QNs)	诺氟沙星 (Norfloxacin, NOR)	103.8	[23]
	恩诺沙星 (Enrofloxacin, ENR)	28.8	[23]
	左氧氟沙星 (Levofloxacin, LVX)	7.9	[27]
	环丙沙星 (Ciprofloxacin, CIP)	17	[23]
	莫西沙星 (Moxifloxacin, MXF)	0.34	[28]
	加替沙星 (Gatifloxacin, GAT)	270	[26]
	氧氟沙星 (Ofloxacin, OFL)	11.3	[23]
	洛美沙星 (Lomefloxacin, LOM)	19.9	[23]
	氟罗沙星 (Fleroxacin, FLE)	2 351 000	[24]
	二氟沙星 (Difloxacin, DIF)	100 000	[24]
大环内酯类 (Macrolides, MLs)	阿奇霉素 (Azithromycin, AZM)	150	[23]
	克拉霉素 (Clarithromycin, CLR)	800	[24]
	罗红霉素 (Roxithromycin, ROX)	47	[23]
	泰乐菌素 (Tylosin, TYL)	150	[23]
	洛奇霉素 (Rokitamycin, AIV)	10 000	[23]
四环素类 (Tetracyclines, TCs)	四环素 (Tetracycline, TC)	1.75	[24]
	金霉素 (Chlortetracycline, CTC)	170	[23]
	土霉素 (Oxytetracycline, OTC)	5	[23]
	地美环素 (Demeclocycline, DMC)	316	[29]

水环境中抗生素的生态风险计算公式如下:

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC_{water}} \quad (1)$$

式中: RQ 为风险熵值; $PNEC_{water}$ 为水中污染物的预测无效应浓度, ng/L; MEC 为污染物实测环境浓度, ng/L。

1.2.2 沉积物抗生素生态风险评估方法

已有文献报道河南省土壤和沉积物抗生素污染共 13 种^[13-17], 采用风险熵值法对沉积物中抗生素的生态风险进行分析。由于缺乏淡水沉积物的生物毒性数据, 因此, $PNEC_{susp}$ 采用平衡分配法进行推导^[5, 30], 将获取到的水环境预测无效应浓度 $PNEC_{water}$ 值转换成基于相应风险的沉积物环境预测无效应浓度 $PNEC_{susp}$ 值, 计算公式如下^[8]:

$$PNEC_{susp} = \frac{K_{susp-water}}{RHO_{susp}} \times PNEC_{water} \times 1000 \quad (2)$$

$$RHO_{susp} = F_{solid_{susp}} \times RHO_{solid} + F_{water_{susp}} \times RHO_{water} \quad (3)$$

$$K_{susp-water} = F_{water_{susp}} + F_{solid_{susp}} \times \frac{K_{susp}}{1000} \times RHO_{solid} \quad (4)$$

$$K_{psusp} = Foc_{susp} \times K_{oc} \quad (5)$$

式中： $PNEC_{susp}$ 为沉积物环境预测无效应浓度， ng/kg ； $PNEC_{water}$ 为水环境预测无效应浓度， ng/L ； RHO_{susp} 为悬浮物体积密度， kg/m^3 ； $K_{susp-water}$ 为悬浮物-水分配系数， m^3/m^3 ， K_{psusp} 为污染物在悬浮物中的固-水分配系数， L/kg ； RHO_{water} 为水的密度， kg/m^3 ； RHO_{solid} 为固体的密度， kg/m^3 ； $Fsolid_{susp}$ 为悬浮物中固体物质的体积分数， m^3/m^3 ； $Fwater_{susp}$ 为悬浮物中水的体积分数， m^3/m^3 ； Foc_{susp} 为悬浮物中固体物质的有机碳质量分数， kg/kg ； K_{oc} 为有机碳-水分配系数， L/kg ，其值从EPISuiteV4.10软件获得，优先使用软件数据库中的实测值，没有实测值则采用软件计算值。其余参数的标准值如下： RHO_{water} 取 $1\ 000\ kg/m^3$ ； RHO_{solid} 取 $2\ 500\ kg/m^3$ ； $Fsolid_{susp}$ 取 $0.1\ m^3/m^3$ ； $Fwater_{susp}$ 取 $0.9\ m^3/m^3$ ； Foc_{susp} 取 $0.1\ kg/kg$ 。

1.2.3 食品抗生素生态风险评估方法

膳食暴露评估采用点评估法及食品安全指数法评估河南省食品中抗生素的生态风险。根据已有文献报道的河南省各类食品的抗生素残留情况^[13,19-22]和居民消费量，计算得到每日抗生素的膳食暴露量，并用食品安全指数法描述其安全状态和残留风险。其中，根据《中国居民膳食指南（2022）》，成年人人均每天各类食物的推荐摄入量，取最高类蔬菜的最高值 $500\ g$ 。成年男性的平均体质量为 $63\ kg$ 。评估计算公式为：

1) 日膳食暴露量计算式为：

$$EDI = \frac{R \times F}{bw} \quad (6)$$

式中：EDI 为膳食暴露量， $\mu g/kg \cdot bw \cdot d$ ； R 为兽药残留浓度， $\mu g/kg$ ； F 为食物消费量， g/d ； bw 为中国标准人体重，按照 $63\ kg$ 计算。

2) 食品安全指数计算式为：

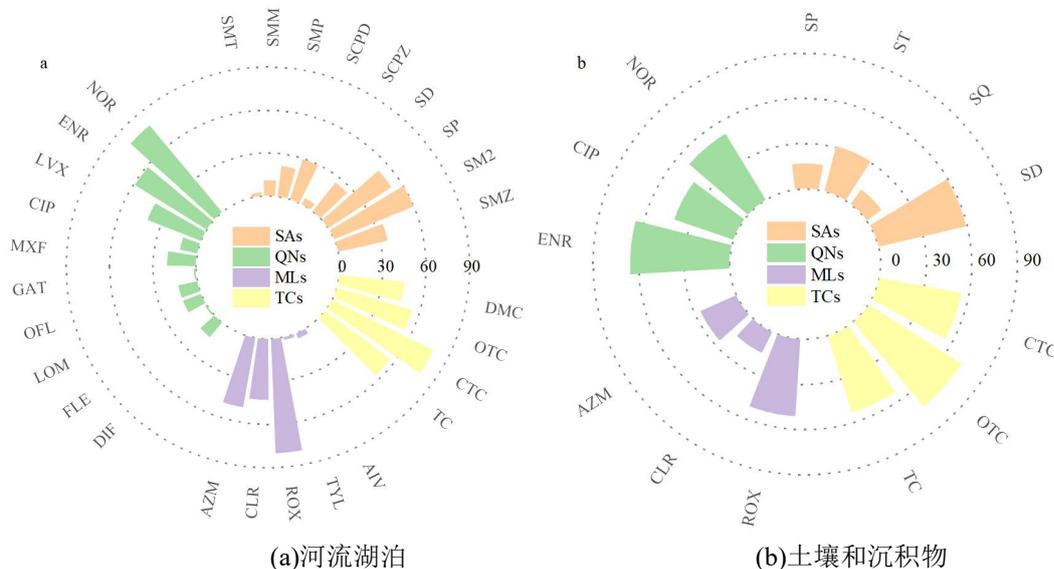
$$IFS = \frac{R \times F}{SI \times bw} \quad (7)$$

式中：IFS 为食品安全指数；SI 为安全摄入量， $\mu g/kg \cdot bw \cdot d$ ，本次评估以每日允许摄入量 (Acceptable Daily Intake, ADI) 表示，兽药残留 ADI 值参考《食品安全国家标准 食品中 41 种兽药最大残留限量》(GB 31650.1—2022)。IFS 值用于衡量食品安全风险，其数值与风险水平呈正相关：IFS < 1 表示风险较小，IFS = 1 表示风险可接受，IFS > 1 则表示风险不可接受^[20]。

2 不同环境介质中抗生素的污染

特征

抗生素的广泛使用导致其在各类环境介质中普遍残留，其赋存状态、迁移转化规律及潜在风险因介质特性差异而显著不同，呈现多介质、广分布的污染格局。河南省典型环境介质中抗生素的检出率如图 1 所示。



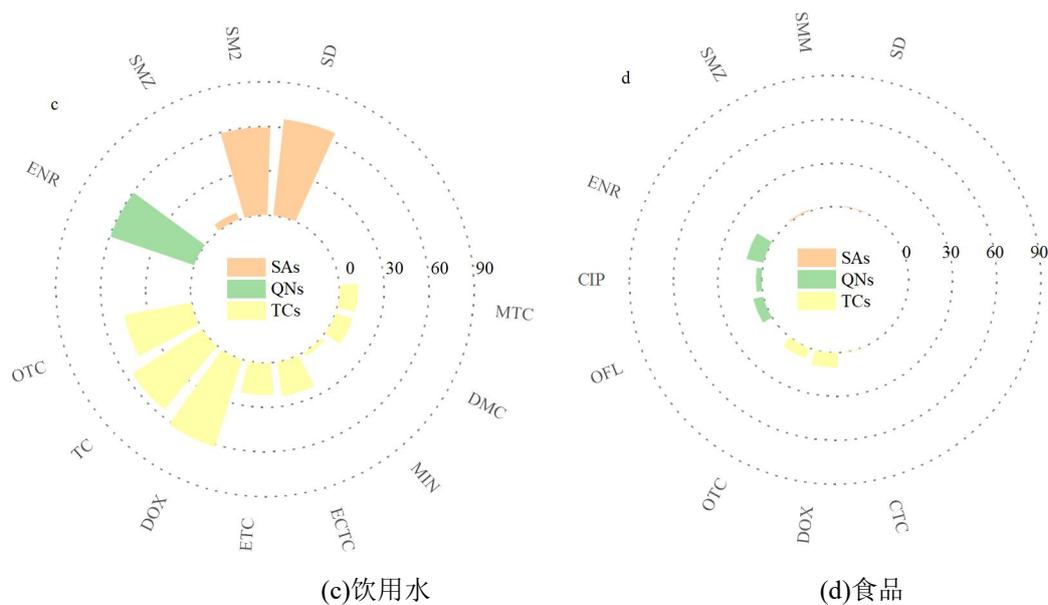


图1 河南省不同介质中的抗生素检出率/%

Fig.1 Detection rates of antibiotics in different environmental media in Henan Province/%

从图 1(a)中可以看出:河南省河流湖泊等
地表水中共检出抗生素 28 种, 其中喹诺酮类
10 种、四环素类 4 种、大环内酯类 5 种、磺
胺类 9 种。检出率以罗红霉素最高为 80%, 其
次为诺氟沙星 78.67%, 氟罗沙星检出率较低
仅 1.33%。

从图 1(b)中可以看出, 河南省土壤和沉积
物中共检出抗生素 13 种, 其中磺胺类 4 种、
喹诺酮类、四环素类和大环内酯类各 3 种。检
出率以土霉素最高为 72.61%, 其次为恩诺沙
星 56.48%, 磺胺喹噁啉类检出率较低仅
11.76%。

饮用水中的抗生素污染主要源于受污染
的地表水或地下水水源。河南省饮用水来源主
要是南水北调和本地水库, 已有研究表明河南
段南水北调干渠抗生素无潜在健康风险^[31], 因
此本研究主要评估本地水库的生态风险。从图
1(c)中可以看出, 河南省饮用水源中共检出抗
生素 12 种, 其中磺胺类 3 种、喹诺酮类 1 种、
四环素类 8 种。检出率以磺胺嘧啶最高为
65.31%, 其次为多西环素 61.54%, 米诺环素
检出率较低仅 3.08%。

从图 1(d)中可以看出, 河南省食品中共检
出抗生素 9 种, 其中喹诺酮类、四环素类和磺
胺类各有 3 种。检出率以恩诺沙星最高, 为
11.82%; 其次为多西环素 10.26%, 磺胺间甲
氧嘧啶检出率较低仅 0.14%。

各环境介质中不同种类抗生素历史最高

浓度如图 2 所示。图 2 显示, 河流湖泊等地表
水体中, 四环素类浓度最高, 其次为喹诺酮类,
磺胺类和大环内酯类浓度较低; 土壤和沉积物
中, 四环素类浓度最高, 其次为喹诺酮类, 磺
胺类和大环内酯类浓度较低; 饮用水源中四环
素类浓度最高, 其次是磺胺类与喹诺酮类; 食
品中四环素类浓度最高, 其次是喹诺酮类, 磺
胺类浓度较低。

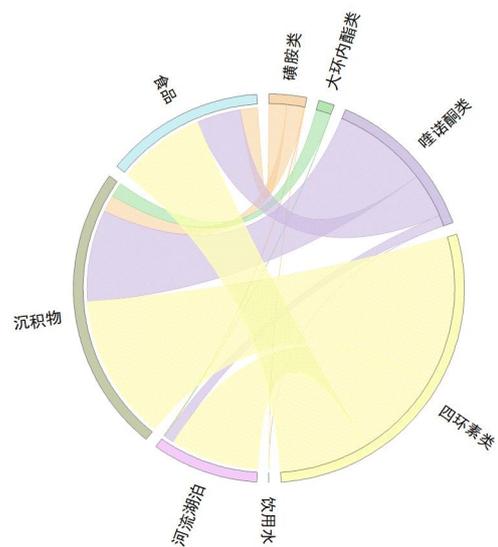


图2 河南省不同介质中的抗生素浓度图 (水环境
/(µg/L), 沉积物/(µg/kg), 食品/(µg/kg))
Fig.2 Antibiotic concentrations in different
environmental media in Henan Province(µg/L for
water,µg/L for sediment,µg/L for food)

3 抗生素生态风险评估

采用风险熵值法 (RQ) 对已报道的抗生素进行生态风险评估, 选用抗生素最大检出浓度计算生态风险。地表水和沉积物的风险评估结果分别如图 3 和图 4 所示, 食品中抗生素暴露水平及食品安全指数见表 2。地下水和饮用水当前检出浓度水平低, 对人体健康的直接风险小, 不做评估。

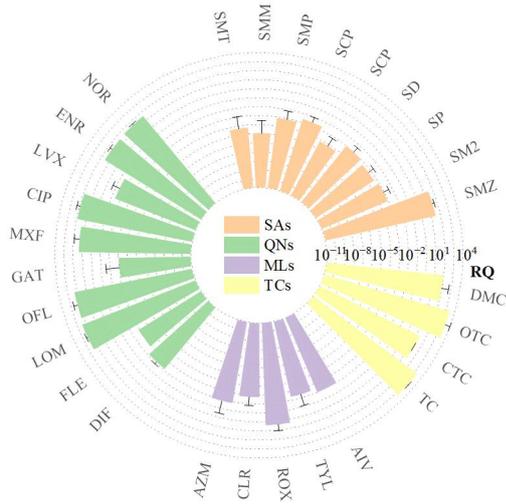


图 3 地表水常见抗生素生态风险评价

Fig.3 Ecological risk assessment of common antibiotics in surface water

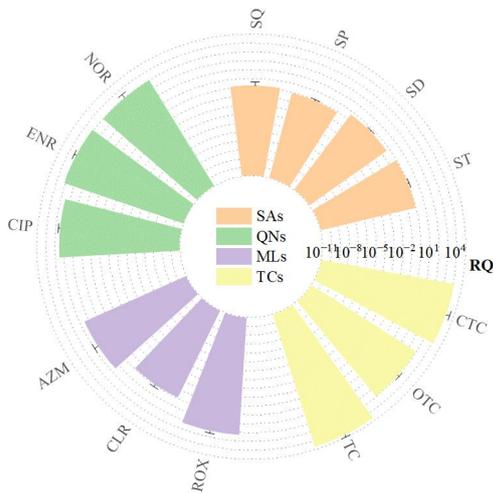


图 4 土壤和沉积物常见抗生素生态风险评价

Fig.4 Ecological risk assessment of common antibiotics in soil and sediment

图 3 中显示, 河南省河流湖泊等地表水中已见报道的 28 种抗生素中, 14 种抗生素 (泰乐菌素、加替沙星、克拉霉素、二氟沙星、洛奇霉素、磺胺氯吡啶、磺胺甲氧吡啶、磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶、磺胺吡啶、氟罗沙星、磺胺甲噻二唑、磺胺氯吡啶、磺胺间甲氧嘧啶) 的风险值 $RQ < 0.1$, 可认为没有生态风险; 2 种抗生素 (阿奇霉素、左氧氟沙星) 的风险值 $0.1 < RQ < 1$, 具有低生态风险; 12 种抗生素 (土霉素、四环素、地美环素、氧氟沙星、洛美沙星、环丙沙星、莫西沙星、恩诺沙星、磺胺甲噻唑、诺氟沙星、金霉素、罗红霉素) 的风险值 $RQ > 10$, 具有高风险。其中, 高风险抗生素中, 四环素类抗生素 4 种, 喹诺酮类抗生素 6 种, 磺胺类和大环内酯类抗生素各 1 种, 可见, 四环素类和喹诺酮类抗生素是河南省河流湖泊地表水中主要的生态风险贡献者。

图 4 中显示, 河南省土壤和沉积物已有报道的 13 种抗生素中, 都具有一定的生态风险 ($RQ > 0.01$), 其中有 8 种显示出高生态风险, 包括 3 种四环素类 (四环素、金霉素和土霉素)、3 种喹诺酮类 (环丙沙星、诺氟沙星和恩诺沙星) 和 2 种大环内酯类 (罗红霉素和阿奇霉素), 其 RQ 超过 10; 大环内酯类的克拉霉素和磺胺类的磺胺嘧啶显示出中等生态风险, 其余 3 种磺胺类抗生素 (磺胺噻唑、磺胺喹噁和磺胺吡啶) 显示出低生态风险。

河南省食品中共检出 9 种抗生素, 包括 3 种磺胺类、3 种喹诺酮类和 3 种四环素类, 对抗生素的膳食风险评估结果见表 2。结果显示, 按最大残留量计算膳食暴露风险, 河南省食品抗生素残留的 IFS 最大值皆低于安全阈值 1, 表明食品中残留抗生素带来的健康风险比较低, 安全状态可以接受, 这一结果与张利锋等^[20]的研究结果一致。因此, 河南省食品中抗生素的膳食暴露风险处于安全阈值内, 未发现对人体健康构成显著危害, 但需持续关注并防范因违规使用导致的残留累积风险。

表 2 食品中抗生素暴露水平及食品安全指数

Tab.2 Exposure levels of antibiotics and food safety index in food

类别	抗生素名称	ADI/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d}$)	EDI/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d}$)	EDI _{max} /($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d}$)	IFS	IFS _{max}
----	-------	--	--	--	-----	--------------------

	磺胺嘧啶	50	4.20E-02	2.30E-01	8.40E-04	4.60E-03
磺胺类	磺胺间甲氧嘧啶	50	3.89E-03	8.41E-02	7.78E-05	1.68E-03
	磺胺甲噁唑	50	1.03E-02	5.19E-02	2.06E-04	1.04E-03
喹诺酮类	恩诺沙星	6.2	4.91E-02	6.21E-01	7.92E-03	1.00E-01
	环丙沙星	3	6.11E-03	2.12E-01	2.04E-03	7.06E-02
	氧氟沙星	5	4.60E-03	1.05E-01	9.21E-04	2.10E-02
四环素类	土霉素	30	5.48E-03	1.96E-01	1.83E-04	6.53E-03
	强力霉素	3	5.48E-03	1.64E+00	1.83E-03	5.48E-01
	金霉素	30	4.05E-03	1.12E-02	1.35E-04	3.73E-04

4 分析与讨论

研究表明,河南省不同环境介质中抗生素的分布与生态风险存在显著差异。总体而言,抗生素检出种类数量按地表水>土壤和沉积物>饮用水源>食品的顺序递减。这一梯度不仅揭示了地表水作为污染直接受体,水中抗生素的来源和影响因素可能更加多样化;也反映出作为污染终端和重点管控对象的饮用水源与食品中的抗生素残留已得到相对有效控制。同时,在河南省已有研究中,河流湖泊作为直接污染受体较其他介质关注度更高。

不同环境介质中抗生素残留种类亦存在显著不同:在地表水中,喹诺酮类检出种类最广,大环内酯类(以罗红霉素为代表)检出率最高,而四环素类浓度水平最高。河南省水环境介质结果与于娇等^[32]的研究相近,但与江苏、北京等不同地域的研究结果存在明显差异^[29, 33],这种差异可能主要源于区域用药习惯的不同^[4]。从已有数据看,河南省淮河、黄河流域抗生素污染关注度明显高于海河流域和长江流域。在土壤和沉积物中,磺胺类检出种类最多,但四环素类在检出率与浓度上均占主导,已有文献表明黄河沉积物中的抗生素含量显著低于多数河流,但河南省缺乏对比性研究。饮用水源中四环素类检出种类最多,浓度水平亦最高,磺胺类(以磺胺嘧啶为代表)检出率最高。河南省养殖区地下水、丹江口水库、主要水厂等水源水中抗生素种类存在显著差异,与其他省份检出种类之间亦存在显著差异。可见,不同地域因抗生素使用情况和水处理工艺的不同,饮用水源中抗生素的残留亦不尽相同^[2, 18]。食品中除大环内酯类外的三类抗生素检出抗生素种类数相同,喹诺酮类检出率最高,而四环素类浓度水平最高。相较于 Zhou 等^[34]

在太湖地区梅梁湾和竹山湾水产生物中检出的 24 种抗生素,河南省食品样品中检出的抗生素种类相对较少。

不同环境介质中均为四环素类浓度水平最高,喹诺酮类其次,但从浓度数量级看,土壤和沉积物($10^2\sim 10^5$)>地表水($10^{-1}\sim 10^5$)>食品($10^{-1}\sim 10^2$)>饮用水源($10^{-3}\sim 10^{-1}$),其中土壤和沉积物是抗生素最主要的汇^[35]。这归因于抗生素通过废水灌溉、粪便施用等途径输入后,在固相介质中降解缓慢、易于长期累积,尤其以价格低廉、应用广泛的四环素类为甚。风险评价显示,河南省抗生素的总体生态风险偏高,开封市城区地表水在 2020 年 11 月的风险峰值,可能与新冠疫情初期的抗生素使用变化有关^[12]。值得注意的是,高风险点位主要富集于省内的淮河与黄河流域,这与我国流域尺度的高风险区分布格局(长江、黄淮和珠江)^[4]部分吻合,但本研究揭示了更多的高风险抗生素种类,表明区域风险更具复杂性。

对比不同介质的生态风险熵值(RQ),土壤和沉积物的风险水平(四环素最高 RQ 为 9.18×10^4)约是地表水(土霉素最高 RQ 为 9.58×10^3)的 10 倍,且两者高风险抗生素种类的重叠率约为 37.93%。这说明,水环境介质的稀释作用可能在一定程度上降低了其生态风险估值,土壤和沉积物中抗生素残留的生态风险及其累积作用需要引起更高警惕。这可能来源于对抗生素风险和 Related 环境检测的不同认识水平导致的差异。就具体类别而言:四环素类在水体和沉积物中均构成高风险,是最需优先管控的类别。喹诺酮类作为最常见的风险抗生素,需密切关注其在环境介质间的迁移。磺胺类由于较高的溶解度和自然衰减^[31],其在水相中的风险相对较低。值得注意的是大环内酯类素罗红霉素在水相和沉积物之间风险等

级出现显著的跃升,其在沉积物中表现出更突出的高风险,因此,罗红霉素在环境中的累积和潜在危害不容忽视。全面的抗生素生态风险管理必须同时考虑水体和沉积物两个关键环境介质中抗生素的迁移和转化,并重点关注四环素类和喹诺酮类等高风险抗生素。

综上,河南省不同环境介质中不同种类抗生素的分布特征及其生态风险存在明显差异,应重点关注四环素类与喹诺酮类等高风险抗生素在环境介质间的迁移、转化、累积和潜在危害,此外,多种抗生素带来的复合环境效应值得今后深入研究。

5 结论

本文通过收集现有文献数据,梳理了四类典型抗生素在河南省不同环境介质中的分布特征,并采用风险熵值法对其进行生态风险评估,主要得出以下结论:

1) 河南省不同环境介质中抗生素分布特征存在较大差异:四种典型介质河流湖泊等地表水、土壤和沉积物、饮用水及食品检出抗生素种类依次为28种、13种、12种和9种,各介质中检出率最高的抗生素依次为罗红霉素(80%)、土霉素(72.61%)、磺胺嘧啶(65.31%)和恩诺沙星(11.82%)。

2) 在河流湖泊、土壤和沉积物、饮用水、食品四类环境介质中,四环素类抗生素浓度均为最高。浓度最高的抗生素种类依次为四环素类、喹诺酮类、磺胺类和大环内酯类。

3) 河南省不同环境介质中抗生素生态风险存在显著差异:土壤和沉积物中存在8种高风险抗生素,整体生态风险最高。河流湖泊等地表水中存在12种高风险抗生素,生态风险次之。食品和饮用水源中抗生素风险较低或可忽略。

参考文献

[1] LUISA A,SUAREZ E G P,MAGGIO C,et al.Assessment of ecological risks posed by veterinary antibiotics in European aquatic environments:A comprehensive review and analysis[J].The Science of The Total Environment,2024,954:176280.

[2] WANG H,ZHANG S,LIN Z,et

al.Occurrence,removal and ecological risk assessment of antibiotics in rural domestic wastewater treatment systems in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Journal of hazardous materials,2025,495:139127.

[3] MEN C,JIANG H,MA Y,et al.A nationwide probabilistic risk assessment and a new insight into source-specific risk apportionment of antibiotics in eight typical river basins in China:Human health risk and ecological risk[J].Journal of Hazardous Materials,2025,484:136674.

[4] YI C,SHANG J,SHEN Z,et al.Distribution and risk characteristics of antibiotics in China surface water from 2013 to 2024[J].Chemosphere,2025,375:144197.

[5] BAO F,ZHOU Y,ZHANG Z,et al.A perspective of spatial variability and ecological risks of antibiotics in the agricultural-pastoral ecotone soils in eastern Inner Mongolia[J].Chemosphere,2024,353:141627.

[6] HIDAYATULLAH I M,STEVEN S,KUSMAYADI A,et al.Advances in Antibiotic Biodegradation:Emerging Strategies and Challenges in Mitigating Environmental Contamination and Resistance[J].Current Pollution Reports,2025,11(1):35.

[7] 焦士兴,林璐霜,王安周,等.黄河流域9省区经济发展、产业结构与环境污染的关系[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(05):22-30+7.[JIAO S X,Lin L S,WANG A Z,et al.Relationship among the economic development,industrial structure and environmental pollution in the nine provincial regions of the Yellow River Basin[J].Journal of North China university of water re sources and electric power (natural science edition),2024,45(5):22-30+37.]

[8] 杨思月.河流-地下水交互带抗生素赋存形态及其影响因素研究[D].西安:长安大学,2024.[YANG S Y.Study on the Forms of Antibiotics in River-Groundwater Hyporheic Zone and its Influencing Factors[D].Xian:Chang'an University,2024.]

[9] 于小朋.黄河中下游(河南段)水环境中新污染物的分布特征、潜在风险与吸附/解吸行为研究[D].郑州:华北水利水电大学,2023.[YU X P.Distribution characteristics,potential risk and adsorption/desorption behavior of emerging

- contaminants in aquatic environment of the middle and lower reaches of the Yellow River (Henan section)[D].Zhengzhou:North China University of Water Resources and Electric Power,2023.]
- [10] 黄子晏,丁婷婷,杜士林,等.沙颍河流域抗生素污染特征与生态风险评价[J].环境监控与预警,2020,12(05):117-123+131.[HUANG Z Y,DING T T,DU S L,et al.Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics of the Shaying River Basin[J].Environmental Monitoring and Forewarning,2020,12(05):117-123+131.]
- [11] 杜士林.沙颍河流域水环境优控污染物筛选及潜在生态风险评价研究[D].桂林:桂林理工大学,2020.[DU S L.The research on screening of priority pollutants in the water environment and potential ecological risk assessment in Shaying River Basin[D].Guilin:Guilin university of technology,2020.]
- [12] Lü D Y,YU C,ZHUO Z J,et al.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[J].China Geology,2022,5(3):411-420.
- [13] 明佳佳,雷丽丹,李倩.2021年郑州市农田土壤和白菜中四环素类抗生素残留监测及膳食风险评估[J].现代疾病预防控制,2023,34(07):549-553.[MING J J,LEI L D,LI Q.Monitoring and risk assessment of tetracycline antibiotics residue in farmland soil and cabbage in Zhengzhou,2021[J].Modern Disease Control and Prevention,2023,34(07):549-553.]
- [14] 李静.丹江口水库抗生素抗性基因分布及其影响因素分析[D].湖北:湖北医药学院,2024.[LI J.Distribution and influencing factors of antibiotic resistance genes in Danjiangkou Reservoir[D].Hubei:Hubei University of Medicine,2024.]
- [15] 童玲,丁晶晶,杨笑颜,等.环丙沙星在贾鲁河沉积物中的吸附解吸行为研究[J].河南科学,2024,42(06):845-856.[TONG L,DING J J,YANG X Y,et al.Adsorption and Desorption Behavior of Ciprofloxacin in the Jialu River Sediments[J].Henan Science,2024,42(06):845-856.]
- [16] 毛雯雯,文颖,韩瑞,等.集中养殖区土壤和地下水中抗生素和激素赋存特征研究[J].灌溉排水学报,2024,43(09):82-87.[MAO W W,WEN Y,HAN R,et al.Distribution of antibiotics and hormones in soil and groundwater in intensive livestock farming areas[J].Journal of Irrigation and Drainage,2024,43(09):82-87.]
- [17] 张凤丽.某冶炼厂周围农田土壤中抗生素抗性基因分布及其影响因素[D].郑州:郑州大学,2018.[ZHANG F L.The Distribution of Antibiotic Resistance Genes and its Influencing Factors in Agricultural Soil nearby a Smelting Plant[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2018.]
- [18] 常青.河南省饮用水中四环素类抗生素残留调查及其健康风险研究[J].中国食品卫生杂志,2023,35(06):854-859.[CHANG Q.Investigation of tetracycline antibiotic residues in drinking water and its health risk study in He'nan Province[J].Chinese Journal of Food Hygiene,2023,35(06):854-859.]
- [19] 马青青,张二鹏,卢素格,等.2018-2021年河南省蛋类食品中31种兽药残留调查及健康风险评估[J].河南预防医学杂志,2022,33(06):405-408+424.[MA Q Q,ZHANG E P,LU S G,et al.Health risk assessment based on the survey of 31 veterinary drug residues in egg foods in Henan province from 2018 to 2021[J].Henan Journal of Preventive Medicine,2022,33(06):405-408+424.]
- [20] 张利锋,杨瑞春,袁鹏,等.河南省市售鸡肉和鸡蛋中抗生素残留及膳食暴露风险评估[J].现代预防医学,2021,48(12):2189-2193.[ZHANG L F,YANG R C,YUAN P,et al.Antibiotic residues and dietary exposure risk assessment in chicken and eggs sold in Henan Province[J].Modern Preventive Medicine,2021,48(12):2189-2193.]
- [21] 张利锋,杨瑞春,袁鹏,等.2020年河南省9个城市市售淡水鱼中抗生素残留水平监测分析[J].河南预防医学杂志,2021,32(08):583-586.[ZHANG L F,YANG R C,YUAN P,et al.Monitoring and analysis of antibiotic residual levels in freshwater fish sold in nine cities of Henan province,2020[J].Henan Journal of Preventive Medicine,2021,32(08):583-586.]
- [22] 金彩霞,司晓薇,王子英,等.养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评估[J].环境科学,2016,37(04):1562-1567.[JIN C X,SI X W,WANG Z Y,et al.Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Livestock[J].Environmental

- Science,2016,37(04):1562–1567.]
- [23] 赵思雅,申珊齐,李爱民.太湖抗生素、抗性基因的时空分布特征及生态风险评估[J].生态毒理学学报,2024,19(03):192–207.[ZHAO S Y,SHEN S Q,LI A M.Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Antibiotics and Resistance Genes and Ecological Risk Assessment in Lake Taihu[J].Asian Journal of Ecotoxicology,2024,19(03):192–207.]
- [24] JIAWEI Z,HUI G,JIANGHONG S,et al.A tiered probabilistic approach to assess antibiotic ecological and resistance development risks in the fresh surface waters of China[J].Ecotoxicology and environmental safety,2022,243:114018
- [25] 李清洋,吴梓昊,王亚,等.珠海市典型区浅层含水层PPCPs 污染特征与生态风险评价[J].环境科学学报,2025,45(04):205–218.[LI Q Y,WU Z H,WANG Y,et al.Pollution characteristics and ecological risk assessment of shallow aquifer in typical areas of Zhuhai City[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2025,45(04):205–218.]
- [26] 赵江陆.长江流域重庆段水体中新污染物时空分布特征及风险评级[D]北京:中国环境科学研究院,2024.[ZHAO C J.Spatiotemporal Variations and Priority Ranking of Emerging Contaminants in the Chongqing section of the Yangtze River Basin[D]Beijing:Chinese Research Academy of Environmental Sciences,2024.]
- [27] 周力,刘珊,郭家骅,等.基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序[J].环境科学,2021,42(06):2748–2757.[ZHOU L,LIU S,GUO J H,et al.Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks[J].Environmental Science,2021,42(06):2748–2757.]
- [28] 赵学威,邢学睿,邢立亭,等.岩溶水系统喹诺酮类抗生素分布特征及风险评估[J].中国农村水利水电,2025,(05):171–179.[ZHAO X W,XING X R,XING L T,et al.The Distribution Characteristics and Risk Assessment of Quinolone Antibiotics in Karst Water Systems[J].China Rural Water and Hydropower,2025,(05):171–179.]
- [29] 杨俊,王汉欣,吴韵斐,等.苏州市水环境中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J].生态环境学报,2019,28(02):359–368.[YANG J,WANG H X,WU Y F,et al.Occurrence,Distribution and Risk Assessment of Typical Antibiotics in the Aquatic Environment of Suzhou City[J].Ecology and Environmental Sciences,2019,28(02):359–368.]
- [30] 桑文才,李金阳,林嫣然,等.南四湖沉积物抗生素的组成特征和环境风险[J].农业环境科学学报,2024,43(7):1609–1620.[SANG W C,LI J Y,LIN Y R,et al.Composition profile and environmental risks of antibiotics in sediments of Nansi Lake[J].Journal of Agro-Environment Science,2024,43(7):1609–1620.]
- [31] 于婉柔.南水北调中线干渠抗生素污染分布特征及环境行为研究[D]北京:北京交通大学,2021.[YU W R.Study on the occurrence and environmental behavior of antibiotics in the mid route of the South-to-North Water Transfer Project[D]Beijing:Beijing Jiaotong University,2021.]
- [32] 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(07):1635–1640.[YU J,JIN K X,WU L L.The status of antibiotic contamination in multiplemedia of China:Areview[J].Applied Chemical Industry,2024,53(07):1635–1640.]
- [33] MEN C,MA Y,JIANG H,et al.Probabilistic ecological risk characterizing and source-specific risk apportionment of antibiotics in rivers in the sub-center of Beijing,China[J].Journal of Environmental Sciences,2025,158:694–709.
- [34] ZHOU L J,WANG W X,LV Y J,et al.Tissue concentrations,trophic transfer and human risks of antibiotics in freshwater food web in Lake Taihu,China[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2020,197.
- [35] YE F,CHU K,HUA Z,et al.Distribution and fate of antibiotics in water-sediment-biofilm phases and their potential risks in urban lakes within a large-scale city in eastern China[J].Journal of hazardous materials,2025,496:139421.

Pollution characteristics and ecological risks of antibiotic in different

environmental media in Henan Province

WANG Shuo, CHEN Weisheng, TONG Ling, GU Mengjie, YANG Enzhao, ANG Jia, GAO Xiang

(School of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: **【Objective】**This study aims to systematically analyze the contamination characteristics of antibiotics in multiple environmental media (water, soil and sediment, and food) in Henan Province and to assess their ecological risks. **【Methods】** Based on literature data, the detection rates and pollution levels of antibiotics in different environmental media were compared and analyzed. The Risk Quotient (RQ) method and the Food Safety Index (IFS) method were employed to evaluate the ecological risks in water bodies and sediments, as well as the dietary exposure risks in food, respectively. **【Results】** (1) The number of antibiotic types detected in each medium followed the order: rivers and lakes (28 types) > soil and sediment (13 types) > drinking water (12 types) > food (9 types). (2) The antibiotics with the highest detection rates were macrolides (roxithromycin), tetracyclines (oxytetracycline), sulfonamides (sulfadiazine), and quinolones (enrofloxacin), respectively. Tetracyclines exhibited the highest concentrations in all media. (3) Ecological risk assessment indicated that 12 antibiotics in rivers and lakes and 8 antibiotics in soil and sediment posed high risks, with tetracyclines and quinolones being the most prominent high-risk categories. The dietary exposure risks associated with food were within safe thresholds. **【Conclusion】** This study reveals significant differentiation in antibiotic contamination characteristics and ecological risks in different environmental media in Henan Province, particularly highlighting the dominant high-risk status of tetracyclines. It provides key data support for identifying regional priority control pollutants.

Keywords: antibiotics; environmental media; pollution characteristics; ecological risk; Henan Province