· 调查报告与分析 ·

2024 年马鞍山市饮用水中抗生素污染特征及风险评估

李艳艳[1]，李蒙蒙[2]，裴昌鑫[2]，魏昊[1]，叶梦娟[1]，周燕[1]

1. 马鞍山市疾病预防控制中心(马鞍山市卫生监督所)环境与职业健康中心，马鞍山 243000；
2. 马鞍山市疾病预防控制中心(马鞍山市卫生监督所)理化检验科，马鞍山 243000
通信作者：周燕，E-mail：1418863648@qq.com

【摘　要】目的 了解安徽省马鞍山市饮用水抗生素污染状况，评估水中抗生素的生态风险和人群健康风险，为饮水卫生和抗生素污染治理提供科学依据。**方法** 2024 年采集 36 份饮用水样品，使用固相萃取—高效液相色谱—串联质谱联用技术检测水源水、出厂水和末梢水中 4 类 13 种抗生素浓度，对检出抗生素进行生态风险评估和健康风险评估。**结果** 共检出 3 类 7 种抗生素，检出率为 0.00%～75.00%，检出浓度为 ND～43.70 ng/L，检出浓度最高的抗生素是恩诺沙星(43.70 ng/L)。水处理工艺对抗生素的去除效果较好，去除率达 89.97%，其中磺胺甲恶唑、磺胺氯哒嗪和克拉霉素的去除率均达到 100.00%。水源水中磺胺氯哒嗪和克拉霉素对 3 种水生生物均未表现出生态风险，磺胺甲恶唑和恩诺沙星对无脊椎动物和鱼类未表现出生态风险，而对水藻表现出低水平的生态风险。在以最敏感物种水藻为指示生物的前提下，抗生素的复合毒性存在中等生态风险。饮用水单体抗生素克拉霉素的 RQ_H 最高，但<1×10^{-2}，对不同年龄段人群的健康风险均可忽略不计。抗生素的联合作用对不同年龄段人群的健康风险 RQ_{sum}<1×10^{-2}，呈现先升高再降低再升高的趋势。**结论** 马鞍山市饮用水抗生素污染以恩诺沙星为主，抗生素的联合作用存在中等生态风险。

【关键词】 抗生素；饮用水；生态风险；健康风险；风险评估；马鞍山市

Characterization and risk assessment of antibiotic contamination in drinking water in Ma′anshan city

LI Yanyan[1], LI Mengmeng[2], PEI Changxin[2], WEI Hao[1], YE Mengjuan[1], ZHOU Yan[1] (*1. Environmental and Occupational Health Center of Ma'anshan Center for Disease Control and Prevention (Ma'anshan Health Supervision Institute)*, *Ma'anshan* 243000, *China*; *2. Microbial Laboratory Department of Ma'anshan Center for Disease Control and Prevention (Ma'anshan Health Supervision Institute)*, *Ma'anshan* 243000, *China*)
Corresponding author: ZHOU Yan, E-mail: 1418863648@qq.com

【Abstract】 Objective To understand the status of antibiotic contamination in drinking water in Ma′anshan city, Anhui province and assess the ecological and human health risks of antibiotics, thus providing a scientific basis for drinking water management and antibiotic contamination control. **Methods** In 2024, 36 drinking water samples were collected. Solid-phase extraction-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry was employed to measure the concentrations of 13 antibiotics of 4 categories in source water, finished water, and tap water. Ecological and health risks were assessed for the detected antibiotics. **Results** A total of 7 antibiotics of 3 categories were detected, with the detection rates ranging from 0.00% to 75.00% and concentrations ranging from ND (not detected) to 43.70 ng/L. The antibiotic with the highest concentration was enrofloxacin (43.70 ng/L). The water treatment process demonstrated good removal efficiency for antibiotics, with a removal rate of 89.97%. Specifically, sulfamethoxazole, sulfachloropyridazine, and clarithromycin were completely removed (100.00%). In source water, sulfachloropyridazine and clarithromycin showed no ecological risk to three aquatic organisms, while sulfamethoxazole and enrofloxacin showed no ecological risk to invertebrates and fish but exhibited low-level ecological risk to algae. Under the premise of using the most sensitive species, algae, as an indicator, the combined toxicity of antibiotics posed a moderate ecological risk. Among the detected antibiotics, clarithromycin had the highest health risk quotient (RQ_H), which, however, was less than 1×10^{-2}, indicating negligible health risks to people of all age groups. The combined effect of antibiotics showed the $RQ_{sum} < 1\times10^{-2}$, presenting an increasing-decreasing-increasing trend. **Conclusions** Antibiotic contamination in the drinking water in Ma′anshan is primarily dominated by enrofloxacin. The combined effect of antibiotics poses a moderate ecological risk.

【Keywords】 antibiotics; drinking water; ecological risk; health risk; assessment; Ma′anshan city

抗生素是一类广泛用于治疗人类和动物致病微生物感染的药物[1]。由于抗生素的大量生产和不合理使用，导致其在不同的环境介质中积累和扩散，而水环境被认为是其主要储存库[2]。已有研究显示，抗生素在水体中的残留不仅可以通过生物富集作用影响水生动植物的生长，进而由食

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1147364
基金项目：2023 年马鞍山市科技局项目(YL-2023-38)
第一作者：李艳艳(1997—)，医师，硕士，研究方向：环境卫生风险评估。
收稿日期：2025-03-10 修回日期：2025-07-09 录用日期：2025-08-02
利益冲突：不存在 伦理审查：免除审查 出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

物网和食物链影响人体健康，还可以通过诱导水环境产生耐药微生物和抗性基因来影响人体对抗菌药物的耐药性[3]。更有研究显示，生命早期摄入抗生素有可能增加肠道菌群紊乱和肥胖问题的风险[4]。我国是抗生素生产和使用大国，主要应用于农业和医疗行业[5]。为管控抗生素风险，我国于 2023 年首次将抗生素列入《重点管控新污染物》[6] 名单。目前在我国主要流域的地表水以及水源水均有不同种类的抗生素检出，然而传统的生活饮用水处理工艺尚不能完全去除抗生素[2]。河南省曾在下辖 17 个地市的出厂水和末梢水中检出抗生素[7]。因此，开展水环境中抗生素污染状况监测并进行生态风险和健康风险评估对抗生素污染治理和人群健康保障有重要意义。安徽省马鞍山市地处长江中下游，以长江水作为主要水源，其抗生素污染状况与当地居民健康密切相关。本研究以安徽省马鞍山市长江水源水、出厂水和末梢水为采样对象，检测其抗生素残留量，并进一步对其可能导致的生态风险和人群健康风险进行评估，以期为长江区域水源水和马鞍山市饮用水中抗生素的风险治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1　样品采集　分别于 2024 年 3、5、9 和 11 月在马鞍山市设置 1 个水源水、2 个出厂水采样点和 6 个末梢水采样点采集水样。参照 GB/T 5750.2—2023《生活饮用水标准检验方法 第 2 部分：水样的采集和保存》[8] 进行样品采集和保存，采样时使用 1 L 棕色玻璃采样瓶，现场添加 150 mg 抗坏血酸，4 ℃ 以下避光低温保存，于 48 h 内完成检测。

1.2　样品检测

1.2.1　仪器与试剂　5 500+液相色谱质谱联用仪（AB SCIEX 公司），Oasis HLB 固相萃取小柱（500 mg/6 mL, Waters 公司），全自动固相萃取仪（莱伯泰科公司），MFV-24 智能氮吹仪（广州得泰科技有限公司）。甲醇、乙腈、甲酸（CNW 公司）；13 种抗生素标准品：四环素、土霉素、磺胺甲基嘧啶、磺胺甲恶唑、甲氧苄啶、磺胺氯哒嗪 、克拉霉素、萘啶酸、替米考星、氧氟沙星、恩诺沙星、环丙沙星、诺氟沙星（ANPEL 公司）。4 种抗生素内标物：恩诺沙星–d5、四环素–d6、替米考星–d3（ANPEL 公司）、甲氧苄啶–13C3（阿尔塔科技有限公司）。

1.2.2　标准溶液配制　取适量 13 种抗生素标准溶液，配制成混合工作液，用甲醇稀释，浓度为 1 000 ng/mL，−18 ℃ 避光保存。分别取内标溶液，用甲醇稀释，配制内标混合液，浓度为 1 000 ng/mL，−18 ℃ 避光保存。

1.2.3　样品前处理　取 500 mL 水样，通过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤，加入 1 000 ng/mL 的内标混合液 10 μL 充分混匀，加入浓盐酸调节水 pH 约为 2.0，再加入 0.25 g EDTA。用 HLB 固相萃取柱富集净化：分别用 5 mL 甲醇和纯水活化平衡萃取柱，以 6 mL/min 速度将样品过柱，上样完成后用 5 mL 纯水淋洗去杂质，负压抽干柱中残留水分，干燥 10 min 后，用 6 mL 甲醇洗脱，35 ℃ 下用氮气吹至近干。取 5% 乙腈水溶液 0.5 mL 复溶，上机测定。

1.2.4　色谱条件　ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱（2.1 mm × 100 mm，1.8 μm）进样体积：5 μL；柱温：40 ℃；流动相 A：0.1% 甲酸–水溶液，流动相 B 相：乙腈；流速：0.3 mL/min。

1.2.5　质谱条件　电喷雾离子源（ESI+），离子化电压为 5 500 V，离子源温度为 550 ℃，气帘气为 35 psi，喷撞气为 9 psi，喷雾气为 50 psi，辅助加热气为 55 psi，同位素内标法结合多反应监测模式（MRM）。

1.2.6　结果计算　通过与标准物质比对，根据抗生素的保留时间和特征离子确定待测组分；分别将测定的 13 种抗生素峰面积与对应的内标物质峰面积比值代入标准曲线，得到进样浓度，样品实际浓度由进样浓度除以浓缩倍数 1 000 得到。

1.2.7　质量控制　采用外标法进行抗生素定量分析，为提升检测准确性，在 1 L 去离子水的空白样本中加入内标物质计算其回收率，加标浓度 20 ng/L 时回收率为 83.36%～104.92%，相对标准偏差（RSD）为 2.47%～8.68%；加标浓度 100 ng/L 时回收率为 89.46%～110.32%，RSD 为 3.22%～8.84%。以信噪比 S/N ≥ 3 和 S/N ≥ 10 计算出方法的检测限和定量限分别为 0.03～0.10 ng/L 和 0.10～0.30 ng/L。

1.3　风险评估方法

1.3.1　生态风险评估　使用欧盟风险评价技术指导文件中的风险熵值法（RQ_E）[9] 对马鞍山市水源地中抗生素的生态风险进行评价。其公式如下：RQ_E=MEC/PNEC 式中，MEC 为抗生素的测量浓度（ng/L），为评估目标抗生素最大生态风险，以水源水中检出抗生素最大浓度计算；PNEC 为抗生素的无效应浓度（ng/L）。以对水藻、无脊椎动物和鱼类等 3 种不同敏感度的水生生物的生态风险来评估马鞍山市水源水中抗生素的生态风险。文献检索 3 种水生生物的 PENC 值[10]，计算得到的生态风险。当 RQ_E<0.01 为无风险；0.01≤RQ_E<0.1 为低风险；0.1≤RQ_E<1 为中等风险；RQ_E≥1 为高风险。

1.3.2　健康风险评估（表 1，2）　使用基于日均可接

受摄入量(ADI)的风险熵值(RQ_H)模型对马鞍山市饮水途径摄入抗生素的健康风险进行评估，其计算公式如下：RQ_H = MEC/DWEL 式中，RQ_H 是目标抗生素的健康风险熵；MEC 是目标抗生素的实测浓度(μg/L)，为评估目标抗生素的对人体的最大健康风险，以末梢水中检出抗生素的最大值计算；DWEL 是饮水当量值(μg/L)。DWEL=(ADI×BW×HQ)/(DWI×AB×FOE)，其中 ADI 是日均可接受量 [μg/(kg·d)]，参考已报道文献[11−12] 得到，见表 1；BW 是人均体重(kg)；HQ 为最高风险，以 1 计，DWI 是每日饮水量(L/d)，AB 是胃肠吸收率，以 1 计，FOE 是暴露频率，以 0.96 计。不同年龄段人群的人均体重及每日饮水量参考中国人群暴露参数手册[13−14]，见表 2。美国环境保护署[15] 认为当 RQ_H< 0.01 时，表示抗生素带来的健康风险可忽略；0.01≤ RQ_E<0.1 表示抗生素带来的健康风险为低风险；0.1≤ RQ_H<1 表示抗生素带来的健康风险为中等风险，RQ_H≥1 表示抗生素带来的健康风险为高风险。

表 1　目标抗生素的日均可接受量
Table 1　ADI of target antibiotics

抗生素名称	ADI[μg/(kg·d)]
磺胺甲恶唑[11]	130
磺胺氯哒嗪[11]	50
恩诺沙星[11]	6.2
氧氟沙星[11]	3.2
克拉霉素[12]	0.2

表 2　不同年龄段人群的人均体重及每日饮水量
Table 2　BW and DWI of different age groups

年龄段	BW/kg	DWI/(L/d)
0～<3个月	6.4	0.18
3～<6个月	7.9	0.35
6～<9个月	9.1	0.59
9～<12个月	9.8	0.81
1～<2岁	11.2	0.91
2～<3岁	13.5	0.81
3～<4岁	15.6	0.86
4～<5岁	17.7	0.85
5～<6岁	19.6	0.86
6～<9岁	26.5	1.19
9～<12岁	36.8	1.28
12～<15岁	47.3	1.38
15～<18岁	54.8	1.41
18～<45岁	60.1	2.32
45～<60岁	62.4	2.35
60～<80岁	59.4	2.22
≥80岁	54.3	1.90

1.4　统计分析　使用 Excel 2019 软件绘制表格，Graph Prism 9 软件绘制图片。抗生素去除率(%)=(水源水抗生素浓度−出厂水抗生素浓度)/水源水抗生素浓度×100%。

2　结　果

2.1　马鞍山市饮用水抗生素污染情况(表 3)　2024 年采集的马鞍山市饮用水中，共检出 3 类 7 种抗生素，检出率为 0.00%～ 75.00%，检出浓度为 ND ～ 43.70 ng/L，检出浓度最高的抗生素为恩诺沙星。水源水、出厂水和末梢水中均检出恩诺沙星，均未检出甲氧苄啶、磺胺甲基嘧啶、环丙沙星、诺氟沙星、四环素和土霉素。水源水中抗生素浓度为 ND～43.70 ng/L，检出浓度最大的抗生素是恩诺沙星。出厂水中抗生素浓度为 ND～10.40 ng/L，检出浓度最高的抗生素是恩诺沙星。末梢水中抗生素浓度为 ND～29.50 ng/L，检出浓度最高的抗生素是替米考星。

表 3 2024 年马鞍山市饮用水抗生素检出结果
Table 3 Antibiotic detection results in drinking water of Ma′anshan city in 2024

抗生素类别	抗生素名称	水源水（*n*=4）		出厂水（*n*=8）		末梢水（*n*=24）	
		检出浓度/（ng/L）	检出率/%	检出浓度/（ng/L）	检出率/%	检出浓度/（ng/L）	检出率/%
磺胺类	磺胺甲恶唑	ND ～ 7.09	75.00	ND	0.00	ND ～ 5.53	4.17
	甲氧苄啶	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.00
	磺胺甲基嘧啶	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.00
	磺胺氯哒嗪	ND～3.79	50.00	ND	0.00	ND～3.16	4.17
喹诺酮类	恩诺沙星	ND～43.70	25.00	ND～10.40	25.00	ND～3.34	8.33
	环丙沙星	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.00
	氧氟沙星	ND	0.00	ND～1.02	12.50	ND～1.78	12.50
	诺氟沙星	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.00
	萘啶酸	ND	0.00	ND～5.86	25.00	ND～5.06	16.67
四环素类	四环素	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.00
	土霉素	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.00
大环内酯类	替米考星	ND	0.00	ND	0.00	ND～29.50	29.17
	克拉霉素	ND ～ 3.73	25.00	ND	0.00	ND～3.42	4.17

注：ND表示低于检出限。

2.2　马鞍山市饮用水抗生素去除效果（表 4）　自来水厂通过混凝—沉淀—过滤—消毒工艺对水源水进行处理后，对水中抗生素的去除效果见表 4。总体来看，水处理工艺对抗生素的去除效果较好，去除率达 89.97%，其中磺胺甲恶唑、磺胺氯哒嗪和克拉霉素的去除率均达到 100.00%。

表 4 马鞍山市饮用水抗生素去除效果
Table 4 Antibiotic removal rates from drinking water in Ma′anshan city

抗生素名称	平均浓度/（ng/L）		去除率/%
	水源水	出厂水	
磺胺甲恶唑	4.85	0.00	100.00
磺胺氯哒嗪	1.45	0.00	100.00
恩诺沙星	10.93	1.85	83.07
克拉霉素	0.93	0.00	100.00
总计	18.45	1.85	89.97

2.3　马鞍山市饮用水抗生素生态风险评估（表 5）　生态风险显示，磺胺氯哒嗪和克拉霉素对 3 种水生生物均未表现出生态风险，磺胺甲恶唑和恩诺沙星对无脊椎动物和鱼类未表现出生态风险，而对水藻表现出低水平的生态风险。在以最敏感物种为指示生物的前提下，抗生素的复合毒性存在中等生态风险。

表 5 马鞍山市水源水 4 种检出抗生素的生态风险
Table 5 Ecological risks of four detected antibiotics in source water of Ma′anshan city

抗生素名称	水藻		无脊椎动物		鱼类	
	PENC (ng/L)	RQ_E	PENC (ng/L)	RQ_E	PENC (ng/L)	RQ_E
磺胺甲恶唑	150	4.73×10^{-2} [a]	25 200	2.81×10^{-4}	562 500	1.26×10^{-5}
磺胺氯哒嗪	1 000	3.79×10^{-3}	28 000	1.35×10^{-4}	789 000	4.80×10^{-6}
恩诺沙星	490	8.92×10^{-2} [a]	357 900	1.22×10^{-4}	454 000	9.63×10^{-5}
克拉霉素	500	7.46×10^{-3}	56 000	6.66×10^{-5}		
合计		0.15 [b]	—	6.05×10^{-4}		11.37×10^{-5}

注：a 表示低风险，b 表示中风险。

2.4　马鞍山市饮用水抗生素健康风险评估（图 1，2）　由于萘啶酸和替米考星缺乏可供参考的 ADI 值，暂不对其进行健康风险评估。马鞍山市饮用水单体抗生素的 RQ_H 均<1×10^{-2}，对不同年龄段人群的健康风险均可忽略不计。克拉霉素的 RQ_H 最高，应密切关注其对人群的健康风险。饮用水中抗生素的联合风险 RQ_{sum} 均<1×10^{-2}，对 2 岁前的人群风险逐渐增加，2～<18 岁人群风险逐渐下降，>18 岁的人群风险再次上升。

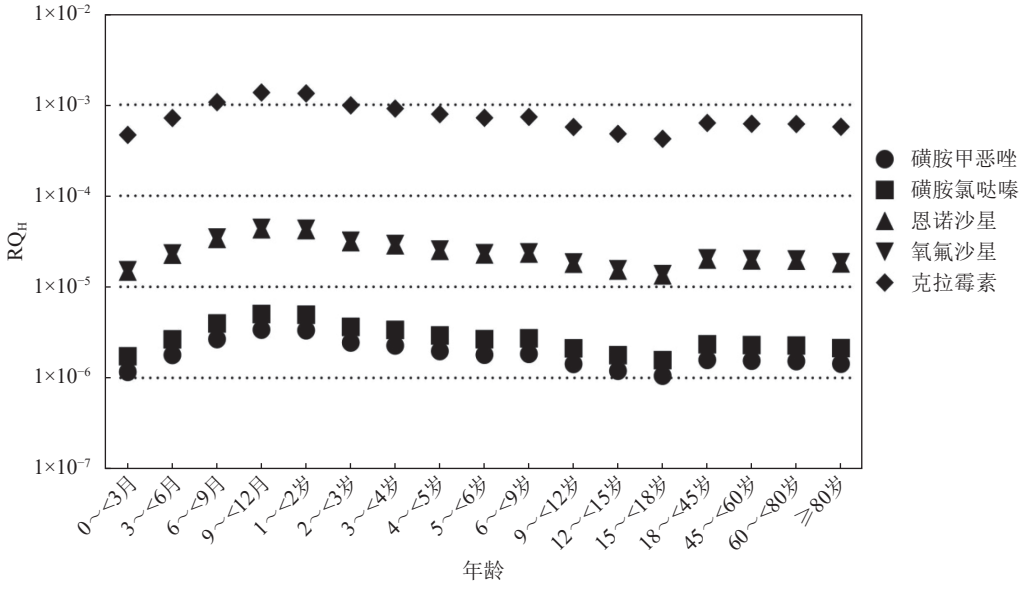


图 1　马鞍山市饮用水检出抗生素对不同年龄段人群的健康风险

Fig. 1　Health risks of antibiotics detected in drinking water to different age groups in Ma′anshan city

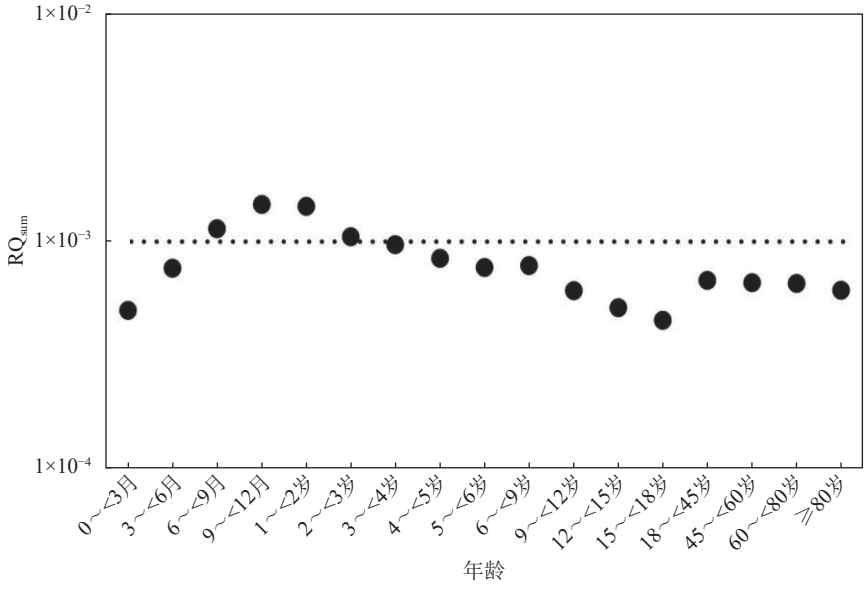


图 2　马鞍山市饮用水抗生素对不同年龄段人群的联合健康风险

Fig. 2　Health risks of combined antibiotics in drinking water to different age groups in Ma′anshan city

3 讨　论

马鞍山市饮用水中共检出磺胺类、喹诺酮类和大环内酯类 3 类抗生素，与近年来国内的研究一致。如杭州市富春江水体[16] 和南京市长江区域[17] 曾报道在水体中检出磺胺类、喹诺酮类和大环内酯类抗生素。然而马鞍山市饮用水抗生素总体检出浓度为 ND～43.70 ng/L，明显低于天津市[18]（ND～349.00 ng/L）、南京市[19]（ND～160.00 ng/L）等地。总体而言，国内各地区饮用水中抗生素的浓度处于痕量水平[20]。国内外研究表明，氯化消毒、反渗透、臭氧消毒、活性炭吸附等水处理工艺对抗生素有一定的去除作用[21]。本研究发现自来水厂通过混凝—沉淀—过滤—消毒工艺对水源水进行处理后，对水中抗生素的去除率达 89.97%，磺胺甲恶唑、磺胺氯哒嗪和克拉霉素的去除率甚至可达 100.00%，这与曲亚斌[22] 对于南方 5 省自来水厂抗生素去除效果的研究一致。

本研究对马鞍山市水源水中抗生素进行生态风险评估发现，磺胺甲恶唑和恩诺沙星对水藻表现出低水平的生态风险，多种抗生素的复合毒性表现出中等生态风险，这与姚丽君[23] 对于海南省饮用水源地的生态风险评估结果一致。此外，Guo X Y[24] 和 Zhang Y X[25] 分别对长江口和北京市地表水抗生素的研究也显示，被检出部分磺胺类和四环素类抗生素具有中等生态风险。研究结果提示，即使抗生素浓度处于痕量水平，其联合作用仍然可能使微生物产生耐药性，对生态环境

和人体健康产生威胁。在对人体健康风险进行评估时发现，无论是单体抗生素的作用还是多种抗生素的联合作用，对各年龄段人群的健康风险均可忽略不计。但本研究仍然提示，喹诺酮类抗生素是主要的健康风险因素，儿童的健康风险高于成人，9 个月～2 岁的儿童是主要的易感人群。与同饮长江水的南京市[19]研究结果相比，本研究得到的人群健康风险偏低，可能是抗生素使用量不同且马鞍山市相对南京市处于长江上游的原因导致。

综上所述，马鞍山市饮用水抗生素污染以喹诺酮类、磺胺类和大环内酯类为主，经过评估，水源水中抗生素联合作用会造成一定程度的生态风险，但对各年龄段的人群的健康风险可忽略不计。然而，随着抗生素使用量的增加以及生物蓄积和放大作用的累积，对于生态和人群健康的风险可能会加重，需要持续关注抗生素的生态风险和人群健康风险，特别是对于儿童的健康风险。

数据可用性声明　本论文已完整呈现所有统计数据和相关分析结果，基于学术规范要求，经处理的分析数据可通过伦理审查后，向通信作者提出合理申请获取。

参考文献

[1] Qiao M, Ying G G, Singer A C, et al. Review of antibiotic resistance in China and its environment[J]. Environment International, 2018, 110: 160-172.

[2] 杨其帆, 臧金鑫, 付朝伟, 等. 中国典型区域水环境中抗生素的污染情况 [J]. 职业与健康, 2022, 38(9): 1291-1296.

[3] Luo Y, Mao D Q, Rysz M, et al. Trends in antibiotic resistance genes occurrence in the Haihe River, China[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(19): 7220-7225.

[4] Wang H X, Wang N, Wang B, et al. Antibiotics detected in urines and adipogenesis in school children[J]. Environment International, 2016, 89-90: 204-211.

[5] 宫国栋, 方菁. 我国关于抗生素生产与应用的政策法规研究分析 [J]. 公共卫生与预防医学, 2014, 25(5): 80-81.

[6] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国工业和信息化部, 中华人民共和国农业农村部, 等. 重点管控新污染物清单 (2023 年版)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(5): 19-24.

[7] 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(6): 854-859.

[8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法 第 2 部分: 水样的采集与保存 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[9] Vryzas Z, Alexoudis C, Vassiliou G, et al. Determination and aquatic risk assessment of pesticide residues in riparian drainage canals in northeastern Greece[J]. Ecotoxicity Environmental Safety, 2011, 74(2): 174-181.

[10] 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]. 广州: 华南理工大学, 2023.

[11] 李昕悦, 邵智, 杨艳, 等. 昆明市重点饮用水源地水体抗生素的赋存及其风险评估 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(11): 2503-2513.

[12] de Jesus Gaffney V, Almeida C M M, Rodrigues A, et al. Occurrence of pharmaceuticals in a water supply system and related human health risk assessment[J]. Water Research, 2015, 72: 199-208.

[13] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册, 成人卷, Adults[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.

[14] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要–儿童卷, Children[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.

[15] Hernando M D, Mezcua M, Fernández-Alba A R, et al. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments[J]. Talanta, 2006, 69(2): 334-342.

[16] 洪宇伟, 李江波, 姜丽丹, 等. 2023 年杭州市某区地表水和城市管网水中抗生素分布特征及风险评估 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(1): 75-81.

[17] 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.

[18] 张新波, 宋姿, 张丹, 等. 天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 [J]. 环境科学, 2018, 39(1): 99-108.

[19] 李辉, 陈瑀, 封梦娟, 等. 南京市饮用水源地抗生素污染特征及风险评估 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1269-1277.

[20] Wang L F, Wang Y F, Li H, et al. Occurrence, source apportionment and source-specific risk assessment of antibiotics in a typical tributary of the Yellow River basin[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114382.

[21] Liu J G, Sun Q Y, Zhang C Y, et al. Removal of typical antibiotics in the advanced treatment process of productive drinking water[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(24): 11386-11391.

[22] 曲亚斌, 朱炳辉, 余胜兵, 等. 南方某省 5 城市水厂供水中抗生素分布特征与健康风险评估 [J]. 职业卫生与应急救援, 2018, 36(3): 194-197.

[23] 姚丽君, 莫凌, 庄僖, 等. 海南省典型饮用水源地水体与沉积物中抗生素的残留及风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2022, 17(5): 349-361.

[24] Guo X Y, Feng C H, Gu E X, et al. Spatial distribution, source apportionment and risk assessment of antibiotics in the surface water and sediments of the Yangtze Estuary[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 548-557.

[25] Zhang Y X, Chen H Y, Jing L J, et al. Ecotoxicological risk assessment and source apportionment of antibiotics in the waters and sediments of a peri-urban river[J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 139128.