

厦门近岸海域抗生素分布特征及生态风险评价

刘丽华¹, 贺琦¹, 张江龙¹, 倪凯文², 许冬雪¹, 许文锋¹

(1.福建省厦门环境监测中心站, 福建 厦门 361022; 2.中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了了解近岸海域抗生素赋存特征和生态风险, 本研究采用高效液相色谱串联三重四级杆质谱法对厦门近岸海域水体和表层沉积物中 6 大类 29 种抗生素浓度及其空间分布特征进行分析, 并采用风险商值法评价水体抗生素的生态风险。结果表明: 厦门近岸海域水体中共检出 6 大类 24 种抗生素, 检出率为 6.25% ~ 100%, 单体浓度为 0.9 ~ 2450 ng/L; 沉积物中共检出 6 大类 13 种抗生素, 检出率为 6.25% ~ 100%, 单体检出浓度为 0.44 ~ 53.7 ng/g。四环素类和磺胺类均为水体和沉积物中检测到的主要抗生素类别。从整体上看, 同安湾和西海域的抗生素浓度较高。抗生素生态风险评估结果显示, 水体中有 4 种抗生素处于高风险水平, 9 种处于中风险水平, 5 种处于低风险水平, 应引起相关部门的足够重视。

关键词: 厦门近岸海域; 水体; 沉积物; 抗生素; 生态风险评估

中图分类号: X131; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)06-0909-10

The occurrence characteristics and ecological risks of antibiotics in the Xiamen coastal area

LIU Lihua¹, HE Qi¹, ZHANG Jianglong¹, NI Kaiwen²,
XU Dongxue¹, XU Wenfeng¹

(1.Fujian Xiamen Environmental Monitoring Central Station, Xiamen 361022, China; 2.Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: To understand the occurrence characteristics and ecological risks of antibiotics in water and sediments in the Xiamen coastal area, the 29 typical antibiotics of 6 types were analyzed by ultra-high performance liquid chromatography-tandem triple quadrupole mass spectrometry in this study. Meanwhile, the potential ecological risks of antibiotics in the water from the Xiamen coastal area were evaluated based on the ecological risk model. Results showed that the 24 typical antibiotics of 6 types in water were detected at the Xiamen coastal area, the detection frequency was 6.25% to 100%, and the monomer concentration ranged from 0.9 to 2450 ng/L. The 13 typical antibiotics of 6 types in sediment were detected, the detection frequency was 6.25% to 100%, and the monomer concentration ranged from 0.44 to 53.7 ng/g. Tetracyclines and sulfonamides were the main antibiotics types detected in both water and sediments, and the antibiotics concentration was higher in Tongan Bay and Western Sea. The result of ecological risk assessment showed that the CTC, LIM, NFC, and OFC in waters posed high ecological risk, the OTC, ETM, ATM, TLS, SMX, EFC, CPC, and FFC posed medium ecological risks, and other antibiotics posed low ecological risk. The relevant departments should pay enough attention to it.

收稿日期: 2024-07-02, 修订日期: 2024-09-30

基金项目: 福建省环保科技项目 (2023R002)

作者简介: 刘丽华 (1982—), 福建莆田人, 博士, 高级工程师, 主要从事近岸海域水环境研究, E-mail: hellolihua88@163.com

通信作者: 许文锋 (1972—), 教授级高工, 主要从事海洋水文与工程、地下水和土壤研究, E-mail: 591287517@qq.com

Key words: Xiamen coastal area; water; sediment; antibiotic; ecological risk assessment

抗生素是一类由微生物产生或化学合成的小分子有机化合物,被广泛应用于现代医学、农业生产、水产以及畜牧养殖^[1]。据报道,全球每年抗生素使用量为10万吨~20万吨,并逐年上升^[2]。我国是世界上滥用抗生素问题比较严重的国家之一,其中医疗业和畜牧养殖业抗生素滥用问题相对严重。与持久性有机污染物相比,尽管抗生素的衰减期较短,但是因其不能完全被生物体吸收,大部分直接或以代谢物的形式随粪便或尿液排出体外^[3],从而在水环境中呈现一种“假持久性”^[4-5]。许多学者已经在地表水^[6]、地下水^[7]、土壤^[8]、沉积物甚至是空气都检出了抗生素^[9]。抗生素能够在各种环境介质(地表水、地下水、土壤和沉积物)中进行转移和生物富集,对水生生态系统造成潜在风险^[10],甚至还可通过接触与饮食等途径导致抗性基因产生、胃肠道疾病等,进而影响人体健康。因此,抗生素作为一类新污染物,已引起越来越多研究者的重视。抗生素是我国新污染物治理的重要对象之一。2022年5月,国务院办公厅印发了《新污染物治理行动方案》,要求规范管理抗生素等新污染物。农业农村部印发了《全国兽用抗菌药使用减量化行动方案(2021—2025年)》,推动养殖业减少兽用抗菌药的使用,并通过遴选推广替代产品、加强技术指导服务和构建激励机制等措施,促进养殖业的绿色发展和兽药残留控制。

近岸海域是地球生态系统中生态系统服务价值、生产力和生物多样性均较高的区域之一,也是人类活动排放污染物的一个重要的“汇”^[11]。沿海城市生活和生产活动所产生的废水通过入海排污口^[12]或者入海径流^[13-14]等途径,直接或间接地排入近海区域,其携带的典型新污染物(如抗生素),将威胁近海生态物种的生存。目前对环境抗生素的研究主要集中在淡水中,而对近岸海域环境中抗生素的污染来源、形态转换、分布特征以及潜在生态危害和风险评价等相关方面的研究还十分薄弱。因此,关注近岸海域中的抗生素污染问题至关重要。九龙江河口长期存在大范围水产养殖活动,龙海紫泥镇与南溪流域

入海口均存在大量淡水、海水养殖池塘,南港、中港、北港的主航道两侧也存在海上养殖网箱^[15],水产养殖导致人为投放的营养物质和抗生素类药物进入周边水体中^[16]。九龙江北溪和西溪两个主要支流和河口区域检出磺胺类抗生素及其抗性细菌^[16],通过直接排入或间接作用影响了厦门近岸海域的抗生素赋存水平。本研究对厦门近岸海域水体和沉积物中的抗生素分布情况展开调查,明确其在近岸海域水体和沉积物中的种类、浓度以及空间分布特征,同时开展了水体中抗生素的生态风险评价,以期为厦门近岸海域新污染物的赋存现状与污染防控提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

高效液相色谱串联三重四级杆质谱仪(ABI 6500,美国 Applied Biosystems 公司);色谱柱 C18 column(100 mm × 2.1 mm internal diameter, 2.6 μm particle size, 美国菲罗门);固相萃取小柱(Oasis HLB, 500 mg, 6 mL, 美国 Waters 公司)。

水体和沉积物检测的六大类抗生素包括:氯霉素类(DHLs)、磺胺类(SAs)、四环素类(TCs)、β-内酰胺类(β-Ls)、氟喹诺酮类(QNs)和大环内酯类(MLs),分别为盐酸四环素(TC)、盐酸土霉素(OTC)、磺胺嘧啶(SDZ)、盐酸金霉素(CTC)、多西环素(DOC)、美他环素(MTC)、磺胺二甲氧嘧啶(SMZ)、罗红霉素(RTM)、红霉素(ETM)、磺胺二甲氧基嘧啶(SDM)、头孢氨苄一水合物(CEP)、头孢拉定(CRD)、磺胺甲恶唑(SMX)、阿奇霉素(ATM)、克拉霉素(CTM)、磺胺对甲氧嘧啶(SM)、白霉素(LCM)、林古霉素(LIM)、泰乐菌素(TLS)、磺胺甲基嘧啶(SM1)、诺氟沙星(NFC)、盐酸沙氟沙星(SARA)、氧氟沙星(OFC)、甲磺酸达氟沙星(DFC)、恩诺沙星(EFC)、甲氧苄氨嘧啶(TMP)、氯霉素(CPC)、氟苯尼考(FFC)、甲砷氯霉素(TPC),29种抗生素标准物质均购自麦克林公司,纯度均大于99%。乙腈(HPLC,德国 Merck 公司)、柠檬酸钠

缓冲溶液(0.1 mol/L, pH 3)、甲醇、磷酸二氢钠(NaH_2PO_4)和乙二胺四乙酸二钠盐(Na_2EDTA)为分析纯,其余试剂若无特殊说明,均为分析纯。

1.2 样品采集

于2022年11月对厦门近岸海域水体和沉积物进行现场调查,共设16个点位(图1)。用不锈钢采样器采集0~1 m的表层水样,装入采样瓶(4 L棕色玻璃)中,4℃冷藏保存。在采集水样的点位周围,利用抓斗式采泥器等距离采集沉积物样品,沥水并去除杂质后,取1 kg左右沉积物样品置于棕色广口玻璃瓶中,4℃冷藏保存运至实验室进行样品前处理。

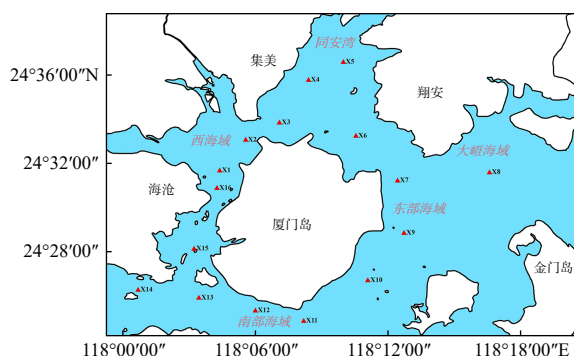


图1 研究区域及点位分布

Fig. 1 Sites and areas investigated in this study

1.3 样品前处理

1.3.1 水体样品

先用孔径为0.45 μm的水系膜过滤水样,去除悬浮杂质。取1 L过滤后的水样,用HCl将pH调到3.0后,加入磷酸盐缓冲溶液和0.20 g Na_2EDTA 以减少重金属的干扰,同时加标样品加入外标。用10 mL甲醇和10 mL超纯水活化固相萃取柱,将水样以4~8 mL/min的流速通过小柱。用10 mL超纯水淋洗固相萃取柱后,用高纯氮气吹干小柱,用5 mL甲醇洗脱2次,收集洗脱液。在35℃左右条件下,用浓缩装置吹至近干,用20%的甲醇水溶液定容至1 mL,待测。

1.3.2 沉积物样品

将采集后的沉积物样品进行冷冻干燥,称取冻干后的沉积物样品4 g,加入10 mL柠檬酸盐缓冲液和10 mL乙腈,超声15 min,以3500 r/min

转速离心5 min,收集上清液,重复3次,收集3次上清液。将上清液加入至1 L超纯水中,用0.45 μm孔径滤膜过滤。后续前处理方法同水体样品一致。

1.4 仪器分析条件

色谱条件:进样体积10 μL;柱温为30℃;LC流动相A为0.3%甲酸水,流动相B为甲醇,以0.2 mL/min的速度梯度洗脱。质谱条件:电喷雾离子源,采用正离子模式;监测方式为多反应监测(MRM)。

1.5 质控条件

采用外标法进行定量分析。使用甲醇作为稀释液进行逐级梯度稀释,并制备质量浓度分别为10 μg/L、20 μg/L、50 μg/L、100 μg/L、200 μg/L的5个系列抗生素混合标准溶液,标准曲线相关系数(R^2)均大于0.99。水样和沉积物加标回收实验分别使用超纯水和石英砂作为基体,并分别加入质量浓度为50 μg/L的混合标准溶液,水体和沉积物中29种抗生素空白加标回收率分别为80%~107%和74%~111%,检出限为0.01~2.34 ng/L。

1.6 生态风险评估

本研究依据风险评估技术指南^[17],采用风险商值法(risk quotients, RQ)进行水体中抗生素生态风险评估^[18]。计算公式如下:

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

$$PNEC = \frac{LC_{50}/EC_{50}/NOEC}{AF} \quad (2)$$

式中:RQ为生态风险水平;MEC(measured environmental concentration)为实测抗生素浓度的最大值(ng/L);PNEC(predicted no effect concentration)为预测无效应浓度(ng/L); LC_{50} 为半数致死浓度; EC_{50} 为半数效应浓度,依据风险商最大原则选用已有研究中最低的急性毒性数据,或者查阅自美国环境保护局(US EPA)建立的毒性数据库ECOTOX获取^[19];NOEC(no observed effect concentration)为最大无影响浓度;AF为评估因子,采用欧盟推荐值1000。式(2)计算中,优先使用NOEC进行计算,其次依次选择该物质藻类 LC_{50} 和 EC_{50} 进行计算。由于MTC、

LCM、SDM、SARA、DFC、CEP 和 CRD 缺乏毒性数据,无法获得 *PNEC* 值,未进行生态风险评估。低风险水平: $0.01 \leq RQ < 0.1$; 中风险水平: $0.1 \leq RQ < 1$; 高风险水平: $RQ \geq 1$ [4]。

2 结果与讨论

2.1 近岸海域水体和沉积物中抗生素的检出情况

厦门近岸海域水体共检测出 24 种抗生素(图 2a),单体浓度范围为 0.9 ~ 2450 ng/L,平均浓度为 51.89 ng/L,中位值为 23.3 ng/L。检出率为 6.5% ~ 100%,平均检出率为 75.8%,其中检出率大于等于 50% 的有 17 种,占检出抗生素总数的 70.8%。检出浓度较高的抗生素包括 MTC、LIM、OTC 和 CPC,检出率分别为 100%、43.8%、100% 和 100%。与我国其他海域相比,本研究

海域抗生素污染处于较低水平,远低于南海海陵岛 (0.08 ~ 15163 ng/L) [20] 和渤海湾 (n.d. ~ 6800 ng/L) [21],与大连海域 (22.6 ~ 2402.4 ng/L) [22] 和东海 (30.8 ~ 2106.1 ng/L) [23] 较为接近,但高于闽江口 (26.3 ~ 155.4 ng/L) [24]、北部湾 (n.d. ~ 50.9 ng/L) [25]、烟台湾和胶州湾 (n.d. ~ 50.49 ng/L) [26]。由于流行疾病、使用模式或经济等各种原因,检出浓度和种类存在较大差异性。

沉积物样品中共检测到 13 种抗生素(图 2b),单体检出含量范围为 0.44 ~ 53.7 ng/g,平均含量为 11.12 ng/g,中位值为 8.7 ng/g;平均检出率为 63.5%,其中检出率大于 50% 的有 8 种,占沉积物检出抗生素种类的 61.5%,剩余的 5 种抗生素检出率为 6.3% ~ 43.8%。本研究海域沉积物中抗生素的含量水平与东海(单体抗生素含量范围为 n.d. ~ 45.23 ng/g) [27]、黄海(单体抗生素含量范

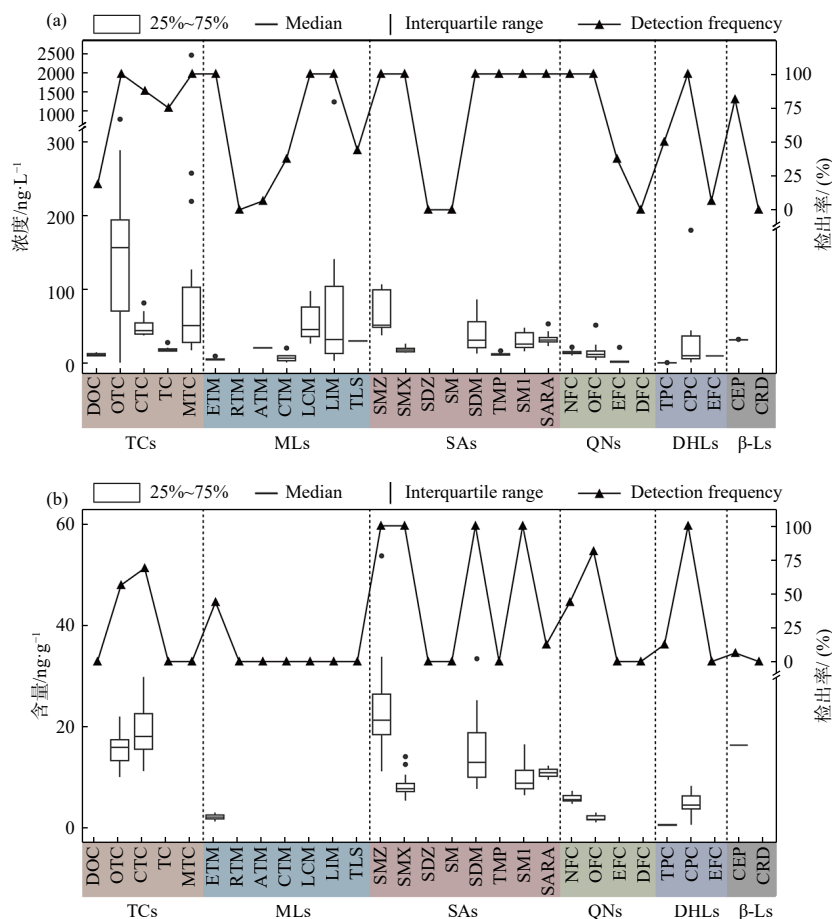


图 2 厦门近岸海域水体(a)和沉积物(b)中抗生素浓度和检出率

Fig. 2 The concentrations and detection frequencies of antibiotics in the water (a) and sediment (b) samples from Xiamen coastal area

围为 $\text{n.d.} \sim 56.7 \text{ ng/g}$)^[27] 相似,而低于渤海(单体抗生素含量范围为 $\text{n.d.} \sim 6800 \text{ ng/g}$)^[27]、南海(单体抗生素含量范围为 $\text{n.d.} \sim 444 \text{ ng/g}$)^[27]。沉积物中抗生素检出率和检出含量均低于水体,造成这种差异的主要原因可能与抗生素在水中溶解度较高有关。另外,在沉积物样品中检测到的13种抗生素在海水中也均被检测到,说明抗生素从水体向沉积物迁移、沉积,进一步说明沉积物是水中抗生素重要的“汇”^[27]。

2.2 近岸海域水体和沉积物中抗生素浓度和组成的空间分布

厦门近岸海域水体中的抗生素浓度总体上呈现从近岸向远岸逐渐下降的趋势(图3),与Zhang等^[11]在渤海海域的研究结果一致。研究表明,从陆地到外部海洋运输过程中,由于海水稀释、光解、水解以及生物降解、沉积物或颗粒物吸附等作用,抗生素浓度随着离岸距离增大而逐渐降低^[28]。抗生素在水体中的运动和变化在

时空尺度上一般受水动力中平流、弥散和对流/湍流混合现象的支配^[29]。在大多数情况下,平流是重要的主导机制,通过平流运输的抗生素从源头沿纵向向下游传播^[30]。厦门湾及其邻近的海域属于规则半日潮,湾外海区为蜕化了的旋转潮波系统,湾内海域为前进潮波系统,涨潮时潮流为北向或者西北向流,落潮时潮流为南向或者东南向流^[31],这种水动力条件对抗生素的迁移、沉积和降解有重要影响。

SAs和TCs是厦门近海海域水体中检测到的主要抗生素类别,浓度占比分别为8%~41%和15%~81%,其次是MLs,浓度占比为9.68%(图4a)。TCs抗生素不仅浓度占比高达81%,而且其浓度水平也是最高的(2705.7 ng/L),主要是由于TCs成本低并具有广谱抗菌活性,应用范围广,是农业饲料添加剂、动物疫病控制和人类疾病治疗的主要抗生素之一^[32]。TCs抗生素浓度排序为西海域>同安湾>大嶝海域>东部海域>南

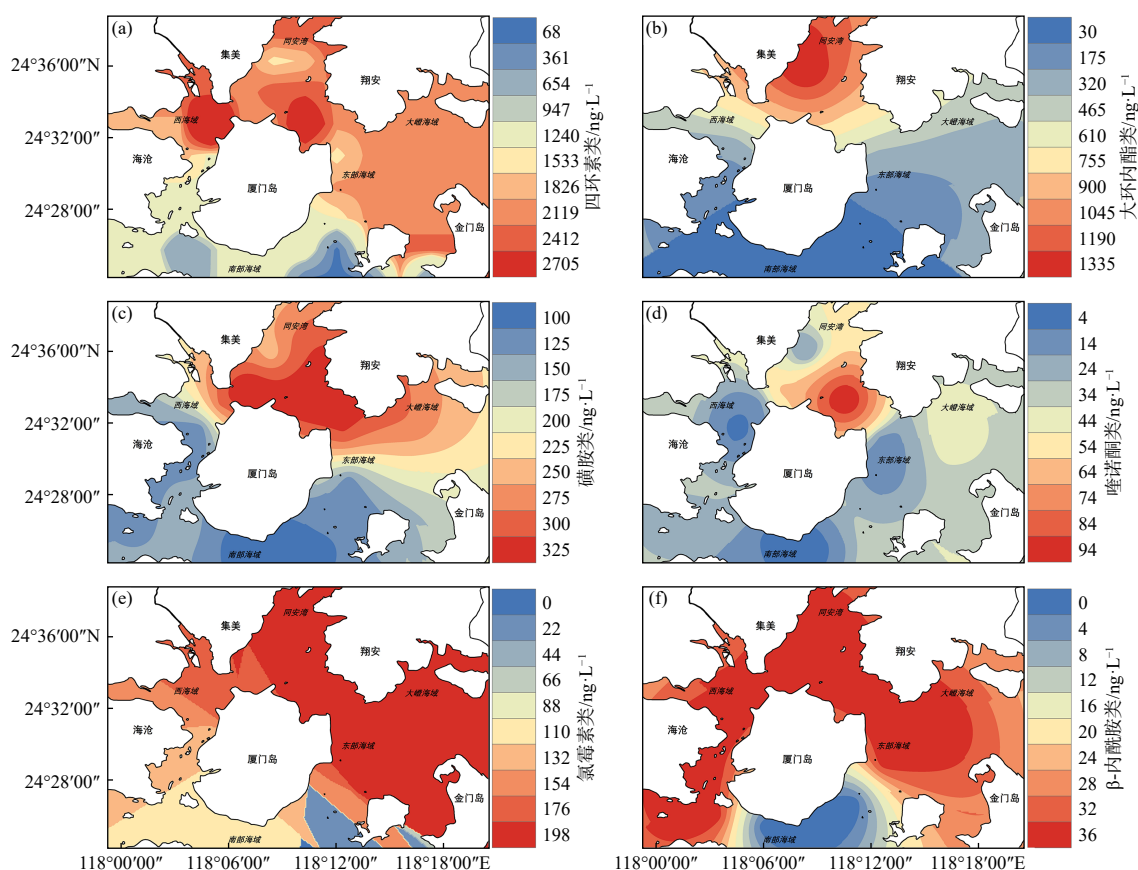


图3 厦门近岸海域水体中六大类抗生素浓度的空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of concentrations of 6 kinds antibiotics in the water of Xiamen coastal area

部海域,其中最高浓度的点位 X2 出现在西海域,该点位 MTC 浓度高达 2450 ng/L,占该点位抗生素总浓度的 73.1%。MTC 为广谱抗菌药,广泛应用于医疗,西海域附近有居民生活区,人口相对密集,可能导致该类抗生素浓度较高。QNs 和 MLs 浓度高值区均位于同安湾, DHLs 抗生素浓度高值区主要位于同安湾、西海域和东部海域。MLs 也是在人类医疗和畜牧水产养殖业广泛应用的抗生素,表明生活污水和养殖废水是厦门近岸海域抗生素污染的一个重要来源。SAs

抗生素主要以点源扩散形式分布,高浓度点位大多位于同安湾和西海域。 β -Ls 虽然几乎遍布整个厦门近岸海域,但检出浓度均小于 33 ng/L。SAs 和 β -Ls 抗生素大多用于人体和养殖动物的疾病治疗中,表明这两类抗生素的污染来源与动物养殖和生活废水等人类活动相关。SAs 抗生素的化学性质稳定,在环境中较难降解^[33],且在水中溶解度高于其他抗生素,故在厦门近岸海域水体中浓度较高。而 β -Ls 抗生素因易水解,浓度较低^[34]。

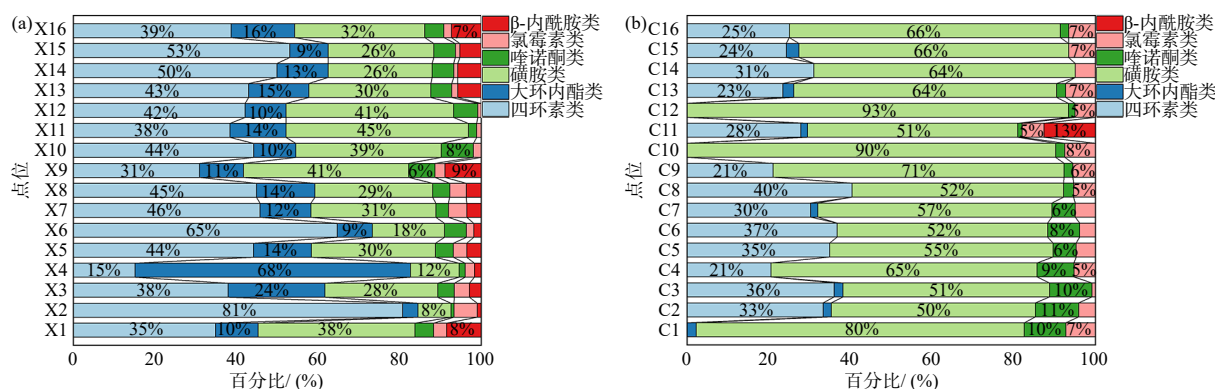


图 4 厦门近岸海域水体(a)和沉积物(b)中不同采样点位的抗生素组成

Fig. 4 Composition of antibiotics at different sampling sites in water (a) and sediments (b) from Xiamen coastal area

水中抗生素可以通过沉积物表面吸附等作用积累到沉积物中,当外界环境发生变化时又会重新被释放到水体中,从而造成沉积物和水体中抗生素浓度发生变化,对海洋环境质量产生深远的影响。除了个别点位外,沉积物中抗生素含量的空间分布整体比水体均匀(图 5)。沉积物中 SAs 和 TCs 仍是主要检出的抗生素种类(图 4b),但与水体不同的是,沉积物中 SAs 抗生素含量占比远高于 TCs。其中,大嶗海域的 TCs 抗生素含量明显高于其他区域,但在 C1、C10 和 C12 3 个点位并未检出 TCs。SAs 抗生素含量在 C9 点位为 53.69 ng/g,而其他采样点位均小于 35.00 ng/g。这可能与沉积物中 SAs 抗生素稳定性好、与底泥吸附力强,而 TCs 抗生素易光解有关。

从空间分布上看, DHLs、MLs 和 QNs 分布特征与上述两类抗生素相似,但从含量水平上看, DHLs、MLs 和 QNs 的检出含量整体低于上述两类抗生素,可能是由于这些抗生素相对不稳定并容易发生降解^[28],并且在区域内较少使用。

值得注意的是,水体中均有 MLs 抗生素被检出,浓度占比较高,其中点位 X4 的浓度占比高达 68%,而沉积物中仅有一半的点位被检出,且含量占比不超过 3%。这种现象同样发生在 β -Ls 化合物中,沉积物中 β -Ls 抗生素除在南部海域 C11 点位被检出外(含量为 16.33 ng/g),其他点位均未被检出,这可能是由于 β -Ls 抗生素在沉积物中不稳定,容易降解,因此在沉积物中很少被检出^[24]。抗生素在水体与沉积物中的分配除了受本身的性质影响外,还受沉积物 pH、盐度、有机物含量^[35]及重金属含量^[36]等环境条件影响。

2.3 近岸海域水体和沉积物中不同抗生素之间的相关性分析

不同环境介质中抗生素数据符合正态分布, Pearson 相关分析结果如图 6 所示。厦门近岸海域水体中两组抗生素之间存在显著的相关关系(图 6a)。第一组包括 SM1、ETM、SMZ、CPC、SMX、SDM 和 MTC 等抗生素,第二组主要为

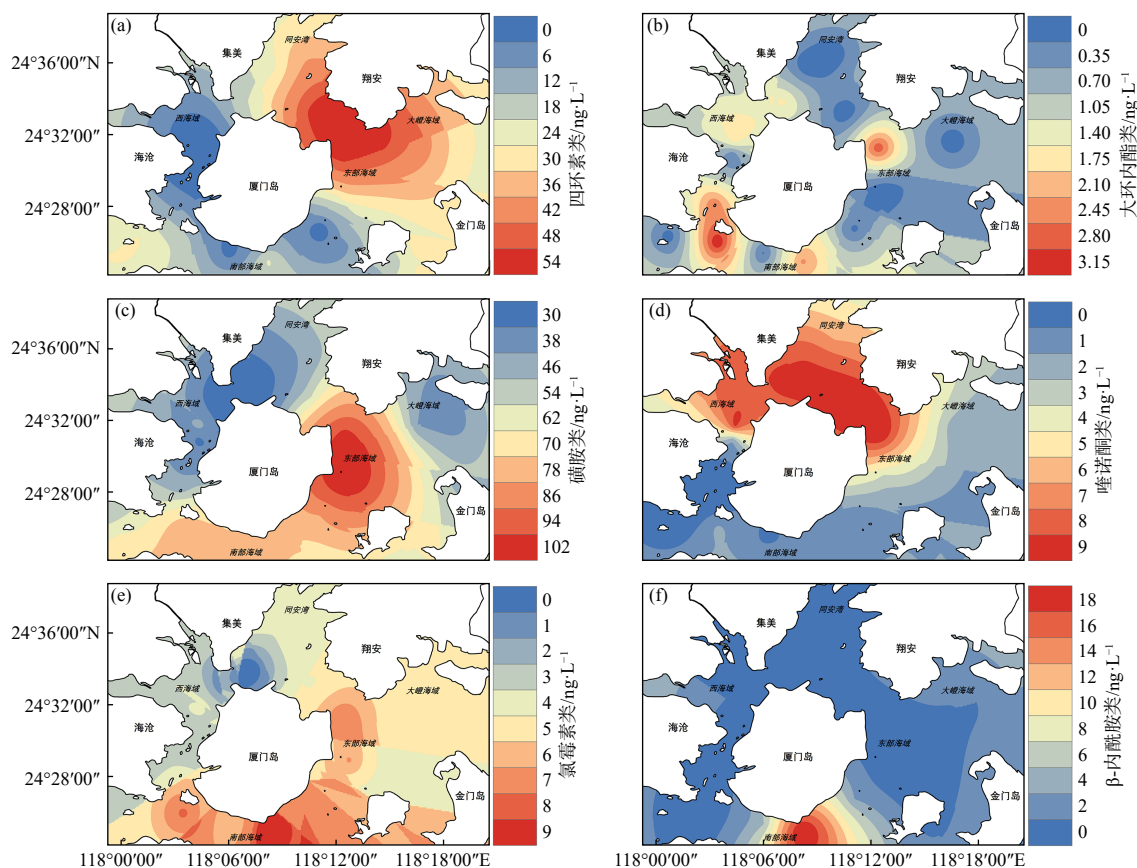


图5 厦门近岸海域沉积物中六大类抗生素含量的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of concentrations of 6 kinds antibiotics in the sediment of Xiamen coastal area

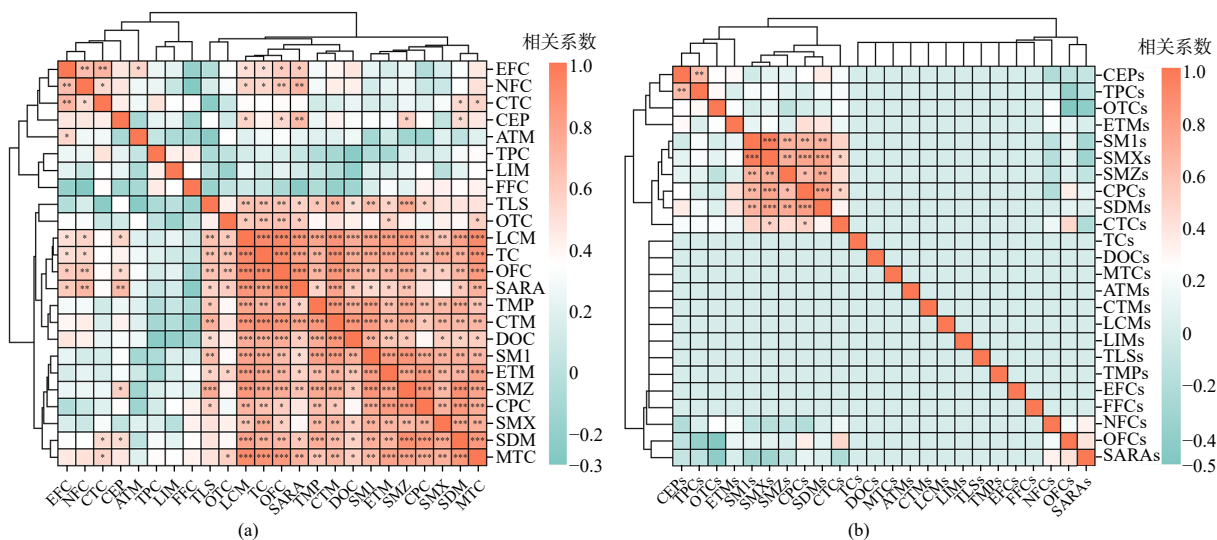


图6 厦门近岸海域水体(a)和沉积物(b)抗生素浓度之间的相关关系

Fig. 6 Correlation of antibiotics concentration in water (a) and sediments (b) from Xiamen coastal area

LCM、TC、OFC、SARA、TMP、CTM 和 DOC 等抗生素。水体中这两组抗生素之间呈显著的正相关性,表明它们可能具有相似的来源和环境行

为^[32]。厦门近岸海域沉积物中不同抗生素之间的相关性则与水体不完全相同,只有少数的抗生素相互之间存在一定的相关性(图 6b)。沉积物

中 SM1s、SMXs、SMZs、CPCs 和 SDMs 等之间存在一定的相关性,与水体中第一组抗生素表现出的相关性一致,说明厦门近岸海域水体和沉积物中抗生素存在一定的同源性,也进一步有力地说明了沉积物是抗生素的“汇”。

2.4 近海环境中抗生素的生态风险评价

抗生素进入海洋环境后,存在生物积累效应,其中部分抗生素可能还存在生态风险。因此,为研究近岸海域水生态环境安全现状,对厦门市近岸海域水体中抗生素类化合物进行生态风险评估,本文仅对被检出且能查到相关 *PNEC* 数据的 18 种抗生素进行生态风险评估(图 7)。

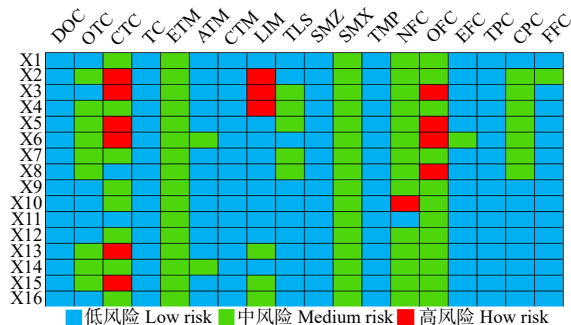


图 7 厦门近岸海域水体中抗生素的生态风险

Fig. 7 The ecological risk of antibiotics in water of Xiamen coastal area

对于 TCs 抗生素, CTC 有 8 个中风险点位和 6 个高风险点位, OTC 有 9 个中风险点位, 其他均为低风险点位。对于 MLs 抗生素, ETM 均为中风险点位, ATM 有 2 个中风险点位; LIM 有 3 个中风险点位和 3 个高风险点位; TLS 有 5 个中风险点位; 其他均为低风险点位。对于 SAs 抗生素, 除了 SMX 为中风险点位外, 其他均为低风险点位。对于 QNs 抗生素, NFC 有 14 个中风险点位和 1 个高风险点位; OFC 有 12 个中风险点位和 4 个高风险点位; EFC 有 1 个中风险点位; 其他均为低风险点位。对于 DHLs 抗生素, CPC 有 7 个中风险点位; FFC 有 1 个中风险点位; 其他均为低风险点位。在 TCs 抗生素中, CTC 浓度明显低于 OTC, 但其生态风险水平略高于 OTC。CTC 主要以药物的形式通过动物/人服用后, 75% 以活性形式通过尿液和粪便释放到环境

中^[37], 是高风险点位检出最多的抗生素。从空间上看, 点位 X2—X6、X8、X10、X13 和 X15 的 RQ_{sum} 大于 1, 表明水体中抗生素的生态风险处于高水平, 如果这 9 个点位抗生素浓度长期处于该水平, 环境中的微生物可能会逐渐产生耐药性, 对人体健康和生态系统稳定造成潜在危害。抗生素种类不同, 对环境的生态风险也不同。CTC、LIM、NFC 和 OFC 4 种抗生素的生态风险处于高水平状态(图 7), 说明这 4 种抗生素为厦门市近岸海域中主要的抗生素污染因子, 应加强对其使用的监管, 有效控制其向近岸海域排放。虽然水环境中的部分抗生素风险水平处于中等以下, 但抗生素长期残留可诱导抗性基因的产生, 而抗性基因污染已成为新的环境问题^[38], 势必会对原有的水生生态系统产生影响。

3 结论

(1) 厦门近岸海域水体中共检出 24 种抗生素, 检出率范围为 6.25% ~ 100%, 平均检出率为 75.8%, 单体检出浓度范围为 0.9 ~ 2450 ng/L, 平均浓度为 51.89 ng/L, 中位值为 23.3 ng/L。沉积物中共检出 13 种抗生素, 平均检出率为 63.5%, 单体检出含量范围为 0.44 ~ 53.7 ng/g, 平均含量为 11.12 ng/g, 中位值为 8.7 ng/g。水体中抗生素的检出率和检出浓度均高于沉积物。

(2) 在空间分布上, 同安湾和西海域的抗生素浓度相对较高, 而沉积物整体上浓度变化较为均匀, 且水体与沉积物中的主要抗生素均为 SAs 和 TCs, 但与水体不同的是, 沉积物中 SAs 抗生素浓度占比远高于 TCs。

(3) 生态风险评估结果表明, 在检出的 24 种抗生素中, CTC、LIM、NFC 和 OFC 的生态风险为高水平, 对厦门近岸海域的生态系统健康存在威胁, 应重点关注; OTC、ETM、ATM、TLS、SMX、EFC、CPC 和 FFC 的生态风险水平为中等水平, 同样需要后续长期监测、关注。

参考文献:

- [1] ZHANG R, YANG S, AN Y W, et al. Antibiotics and antibiotic resistance genes in landfills: a review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150647.
- [2] CHEN L, LANG H, LIU F, et al. Presence of antibiotics in

- shallow groundwater in the northern and southwestern regions of China[J]. *Groundwater*, 2018, 56(3): 451-457.
- [3] SABRI N A, VAN HOLST S V, SCHMITT H, et al. Fate of antibiotics and antibiotic resistance genes during conventional and additional treatment technologies in wastewater treatment plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140199.
- [4] 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.
- [5] SANDERSON H, JOHNSON D J, REITSMA T, et al. Ranking and prioritization of environmental risks of pharmaceuticals in surface waters[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2004, 39(2): 158-183.
- [6] WANG H X, WANG N, WANG B, et al. Antibiotics in drinking water in shanghai and their contribution to antibiotic exposure of school children[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5): 2692-2699.
- [7] CARVALHO I T, SANTOS L. Antibiotics in the aquatic environments: a review of the European scenario[J]. *Environment International*, 2016, 94: 736-757.
- [8] YI X Z, LIN C H, ONG E J L, et al. Occurrence and distribution of trace levels of antibiotics in surface waters and soils driven by non-point source pollution and anthropogenic pressure[J]. *Chemosphere*, 2019, 216: 213-223.
- [9] OBEROI A S, JIA Y Y, ZHANG H Q, et al. Insights into the fate and removal of antibiotics in engineered biological treatment systems: a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(13): 7234-7264.
- [10] 汪涛, 杨再福, 陈勇航, 等. 地表水中磺胺类抗生素的生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(9): 1508-1514.
- [11] ZHANG R J, TANG J H, LI J, et al. Antibiotics in the off-shore waters of the Bohai Sea and the Yellow Sea in China: occurrence, distribution and ecological risks[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 174: 71-77.
- [12] MINH T B, LEUNG H W, LOI I H, et al. Antibiotics in the Hong Kong metropolitan area: ubiquitous distribution and fate in Victoria Harbour[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(7): 1052-1062.
- [13] JIA A, HU J Y, WU X Q, et al. Occurrence and source apportionment of sulfonamides and their metabolites in Liaodong Bay and the adjacent Liao River Basin, North China[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, 30(6): 1252-1260.
- [14] ZHANG R J, ZHANG G, ZHENG Q, et al. Occurrence and risks of antibiotics in the Laizhou Bay, China: impacts of river discharge[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 80: 208-215.
- [15] 郑旭霞. 基于遥感技术的九龙江口水产养殖水体时空演变分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(11): 43-45.
- [16] OU D Y, CHEN B, BAI R N, et al. Contamination of sulfonamide antibiotics and sulfamethazine-resistant bacteria in the downstream and estuarine areas of Jiulong River in Southeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(16): 12104-12113.
- [17] European Chemicals Bureau, Technical guidance document on risk assessment in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances[R]. Ispra, Italy: European Chemicals Bureau, 2003.
- [18] PAPAGEORGIOU M, ZIORIS I, DANIS T, et al. Comprehensive investigation of a wide range of pharmaceuticals and personal care products in urban and hospital wastewaters in Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133565.
- [19] U. S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response. Guidance for developing ecological soil screening levels[R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2005.
- [20] CHEN H, LIU S, XU X R, et al. Antibiotics in the coastal environment of the Hailing Bay region, South China Sea: spatial distribution, source analysis and ecological risks[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1): 365-373.
- [21] ZOU S C, XU W H, ZHANG R J, et al. Occurrence and distribution of antibiotics in coastal water of the Bohai Bay, China: impacts of river discharge and aquaculture activities[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2913-2920.
- [22] CHENG D M, XIE Y J, YU Y J, et al. Occurrence and partitioning of antibiotics in the water column and bottom sediments from the intertidal zone in the Bohai Bay, China[J]. *Wetlands*, 2016, 36(Suppl 1): 167-179.
- [23] LI F F, CHEN L, CHEN W D, et al. Antibiotics in coastal water and sediments of the East China Sea: distribution, ecological risk assessment and indicators screening[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 151: 110810.
- [24] 刘四光, 张乐蒙, 李赫男, 等. 闽江河口区沉积物中的抗生素分布特征及生态风险评价[J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(2): 162-171.
- [25] ZHENG Q, ZHANG R J, WANG Y H, et al. Occurrence and distribution of antibiotics in the Beibu Gulf, China: impacts of river discharge and aquaculture activities[J]. *Marine Environmental Research*, 2012, 78: 26-33.
- [26] ZHANG R J, TANG J H, LI J, et al. Occurrence and risks of antibiotics in the coastal aquatic environment of the Yellow Sea, North China[J]. *Science of The Total Environment*, 2013, 450/451: 197-204.
- [27] 李菲菲. 受污染近海中抗生素的分布, 生态风险及优先控制

- 策略[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [28] ZHANG R J, ZHANG R L, YU K F, et al. Occurrence, sources and transport of antibiotics in the surface water of coral reef regions in the South China Sea: potential risk to coral growth[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 232: 450-457.
- [29] JI Z G. Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2017. doi: 10.1002/9781119371946.
- [30] KASHYAP A, NISHIL B, THATIKONDA S. Experimental and numerical elucidation of the fate and transport of antibiotics in aquatic environment: a review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(8): 942.
- [31] 宁德志, 袁泽林, 潘 钟, 等. 厦门湾海洋塑料垃圾的运动特性及输移机理 [J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(4): 838-851.
- [32] FRANKLIN A M, WLLIAMSI C, ANDREWS D M, et al. Sorption and desorption behavior of four antibiotics at concentrations simulating wastewater reuse in agricultural and forested soils[J]. *Chemosphere*, 2022, 289: 133038-133047.
- [33] XU W H, ZHANG G, WAI O W H, et al. Transport and adsorption of antibiotics by marine sediments in a dynamic environment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(4): 364-373.
- [34] ZHANG Q Q, YING G G, PAN C G, et al. Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6772-6782.
- [35] XU X R, LI X Y. Sorption and desorption of antibiotic tetracycline on marine sediments[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(4): 430-436.
- [36] CHEN K, ZHOU J L. Occurrence and behavior of antibiotics in water and sediments from the Huangpu River, Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2014, 95: 604-612.
- [37] LI S, SHI W Z, YOU M T, et al. Antibiotics in water and sediments of Danjiangkou Reservoir, China: spatiotemporal distribution and indicator screening[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 435-442.
- [38] 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 等. 福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2600-2606.

(本文编辑: 胡莹莹)