

净水技术前沿与热点综述

林靖钧, 李瑞雪, 林华, 等. 我国水产养殖水体中抗生素的污染特征[J]. 净水技术, 2022, 41(3):12-19.

LIN J J, LI R X, LIN H, et al. Pollution characteristics of antibiotics in aquaculture water at home[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3):12-19.



扫我试试?

我国水产养殖水体中抗生素的污染特征

林靖钧, 李瑞雪, 林华, 郭晓雯, 黎广壕, 梁敏行, 黄爱如, 公 晗*

(华南农业大学海洋学院, 海洋生物资源保护与利用粤港联合实验室, 广东广州 510000)

摘 要 近年来, 抗生素对水生生态系统的有害效应、抗性基因的传播及其对人类健康的威胁等问题受到广泛关注。由于抗生素在水产养殖业中的广泛应用以及养殖废水中抗生素的低处理效率, 养殖废水是地表水中抗生素的主要来源之一。文中综述了近十几年我国水产养殖水体中的抗生素污染特征, 以期水产养殖水体抗生素污染的修复提供理论依据。水产养殖水中主要检测出大环内酯类、四环素类、磺胺类、喹诺酮类等抗生素, 抗生素因养殖地区、养殖种类的差异而有所差异, 可能与当地的抗生素使用模式有关。抗生素的浓度在季节上的总体规律为春冬季高于夏秋季, 可能与温度、水文环境等因素有关。

关键词 水产养殖 养殖水体 抗生素 污染特征 抗性菌 抗性基因

中图分类号: X714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)03-0012-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.002

Pollution Characteristics of Antibiotics in Aquaculture Water at Home

LIN Jingjun, LI Ruixue, LIN Hua, GUO Xiaowen, LI Guanghao, LIANG Minxing, HUANG Airu, GONG Han*

(Joint Laboratory of Guangdong Province and Hong Kong Region on Marine Bioresource Conservation and Exploitation, College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510000, China)

Abstract In recent years, the harmful effects of antibiotics on aquatic ecosystems, the spread of resistance genes and their threats to human health have attracted widespread attention. Due to the wide application of antibiotics in aquaculture and the low treatment efficiency of antibiotics in aquaculture wastewater, aquaculture wastewater is one of the main sources of antibiotics in surface water. In this paper, the characteristics of antibiotic pollution in aquaculture water of last decade are reviewed, aiming to provide theoretical basis for the remediation of antibiotic pollution in aquaculture water. Macrolides, tetracyclines, sulfonamides, quinolones are commonly detected in aquaculture water. The concentration of antibiotics varies according to aquaculture areas and types, which may be attributed to the dosage pattern of antibiotics. The concentration of antibiotics are higher in spring and winter than that in summer and autumn, which may be related to the temperature and hydrological environment of different seasons.

Keywords aquaculture aquaculture water antibiotics pollution characteristics antibiotic resistance bacteria antibiotic resistance genes

[收稿日期] 2021-01-10

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金(41807476);广州市科技计划:基础与应用基础研究项目(202102020892)

[作者简介] 林靖钧(1998—),男,研究方向为养殖生态学,E-mail:1109638699@qq.com。

[通信作者] 公晗(1990—),女,副教授,研究方向为养殖生态学,E-mail:han.gong@connect.polyu.hk。

我国是水产养殖大国,2019年全国渔业平稳增长,产业结构不断优化,全国水产品总产量为6 480.36万t^[1]。我国的水产水平持续发展,其成就在世界上有目共睹。近几年来,为了增加产量和收益,国内多地养殖规模和养殖密度不断加大,投饵量

也持续上升,导致水中残饵和排泄物堆积,养殖环境不断恶化,继而诱发各类鱼病^[2]。为了预防和控制鱼病,抗生素在水产养殖业中得到了广泛应用^[3]。

抗生素是指由微生物、高等植物或动物在生命活动过程中产生的具有活性抗原病体的次级代谢产物,这些产物可以干扰、破坏细胞的生长、发育^[4]。抗生素产品因其在疾病防治、促进生长及降低养殖体对某些营养成分需求上的独特作用,在水产养殖业中得到了广泛的应用^[5]。但抗生素在水产养殖的广泛使用及其难降解性不可避免地造成了水环境中抗生素的大量残留,导致对非目标生物的生物累积作用和高毒性。此外,抗生素甚至可能威胁到邻近水生生态系统的生物多样性及功能,并可能引发细菌产生抗生素抗性基因、威胁人类健康等问题。

由于水产养殖业中抗生素的大量使用甚至滥用以及处理不当等,养殖废水成为地表水中抗生素的重要来源之一。本文综述了全国多地水产养殖水体中抗生素在地域、养殖种类以及季节变化上的浓度差异,旨在为我国水产养殖水体抗生素污染防治提供理论依据。

1 国内外抗生素使用情况

在 2000 年,世界上抗生素使用量最高的国家和地区包括新西兰、法国、美国、西班牙和中国香港^[6]。2012 年美国抗生素年使用量达 17 900 t,其中兽用抗生素使用量高达 14 600 t,占 81.5%;2013 年英国抗生素的使用量为 1 061 t,其中兽用抗生素为 420 t,约占 40.0%^[7]。然而 2015 年,世界上抗生素使用量最高的国家主要是中低收入国家如突尼斯、土耳其、罗马尼亚和阿尔及利亚等^[6]。欧盟地区则在 2006 年 1 月全面停止使用添加抗生素的饲料^[8]。

我国现已成为全球范围内最大的抗生素生产国和使用国。据报道,2013 年我国生产抗生素 21 万 t,

使用量为 16.2 万 t,其中兽用抗生素占 52.0%^[7]。2015 年兽用抗生素的使用量已超过 10 万 t,占全球兽用类抗生素使用量的 1/2 以上^[9]。

据估计,相较于 2010 年,2030 年兽用抗生素消费总量将增长近 2/3,其中俄罗斯、巴西、中国、印度和南非的抗生素使用量将增长近一倍^[10]。

2 水产养殖中常用的抗生素

水产养殖中广泛应用和投入的抗生素类药物主要包括磺胺类、喹诺酮类、四环素类、 β -内酰胺类以及大环内酯类 5 大类(表 1)^[11]。兽医临床上最常用的兽用喹诺酮类药物有诺氟沙星、环丙沙星、恩诺沙星、氧氟沙星等,具有生物利用度好、体内代谢稳定、抗菌谱广和抑菌高效等优点,广泛应用于气单胞菌及弧菌等细菌性疾病的预防与治疗^[12-13],研究表明可治疗美洲鳗鲡气单胞菌属等细菌性疾病^[14]。磺胺类药物具有对氨基苯磺酰胺结构,具有疗效强且抗菌谱广等优点,主要包括磺胺嘧啶、磺胺甲基嘧啶、磺胺甲恶唑、磺胺二甲氧嘧啶、磺胺二甲基嘧啶等^[15]。该类抗生素通过抑制核酸前体物的合成来抑制细菌的生长与繁殖^[16-17],可用于治疗由气单胞菌、荧光假单胞菌等引发的细菌性疾病^[18]。四环素类抗生素因分子结构中具有共同的氢化萘四苯环而得名,其中最常用的包括四环素、金霉素、土霉素,以及化学半合成衍生物(包括甲烯土霉素、强力霉素、美他环素、地美环素等)^[19]。大环内酯类抗生素具有内酯键,是由链霉菌产生的一类的大环状生物活性物质,包括红霉素、克拉霉素和阿奇霉素等,对革兰氏阳性菌及支原体抑菌活性较高^[20-21]。 β -内酰胺类抗生素化学结构的特点是具有 β -内酰胺环,主要包括青霉素及其衍生物单酰胺环类、碳青霉烯类、头孢菌素和青霉烯类酶抑制剂等。该类抗生素具有杀菌活性强、抗菌谱广、毒性低等优点^[22-23]。

表 1 水产养殖常用抗生素种类
Tab. 1 Types of Commonly Used Antibiotics in Aquaculture

类别	典型抗生素	特点	参考文献
喹诺酮类	诺氟沙星、环丙沙星等	抑制细菌广泛、抑制效果好、细胞内渗透性强和毒性小等	[12-14]
磺胺类	磺胺嘧啶、磺胺甲恶唑、磺胺甲基嘧啶及磺胺二甲基嘧啶等	抗菌谱广、疗效强	[15-18]
四环素	四环素、金霉素和土霉素等	对大部分革兰氏阳性和阴性菌都具有活性	[19]
大环内酯类	红霉素、克拉霉素和阿奇霉素等	对革兰氏阳性菌及支原体抑菌活性较高	[20-21]
β -内酰胺类	青霉素类等	对于感染性疾病具有很好的疗效,且毒性较小	[22-23]

3 养殖水体中抗生素的污染特征

3.1 不同地区养殖水体中抗生素的含量

抗生素在国内不同水体中的含量分布具有较大的地域差异,且某些地区不同抗生素残留差异也较

大。从地区上看,由于水产养殖在国内东部及东南部较发达,养殖水样采集地点多位于沿海省份。表2总结了各地水产养殖区水体中抗生素残留浓度情况。

表2 各地区养殖水样抗生素含量
Tab. 2 Contents of Antibiotics in Aquaculture Water in Different Areas

地区	水样采取点	采样时间	养殖种类	含量/(ng·L ⁻¹)					参考文献
				大环内酯类	四环素类	喹诺酮类	磺胺类	氯霉素类	
华东地区	山东桑沟湾	2016年8月	牙鲆	—	—	ND~32.48	—	—	[24]
			黑鱼	—	—	5.23~16.06	—	—	
			河豚	—	—	7.40~18.79	—	—	
	山东东营海水养殖区	2014年6月	虾	ND	—	ND	ND~30.1	1.8~65.3	[25]
			海参	0.6~1.0	—	ND~18.7	ND~98.2	53.2~261.0	
	江苏南京浦口、淮安盱眙	2018年11月和2019年5月	克氏原螯虾	ND~16.528	ND~57.140	ND~18.928	ND~0.658	—	[26]
	江苏常州某规模化水产养殖场	2013年12月(冬)和2014年3月(春)	以黄颡鱼、草鱼、鳊鱼为主	—	—	—	—	1 957.8~3 429.8	[27]
		2014年8月(夏)和2014年10月(秋)	以黄颡鱼、草鱼、鳊鱼为主	—	—	—	—	145.1~226.1	
	上海某养殖区	2018年9月—2018年12月	青鱼、白鲢、草鱼、蟹、虾	最高约为20 000	最高约为280 000	最高约为630 000	最高约为105 000	最高约为30 000	[28]
	浙江嘉兴汾湖养殖区等8个养殖区域	2011年—2015年	淡水养殖类	ND	—	94.2~113.2	18.8~76.3	—	[29]
华中地区	浙江舟山	/	/	—	—	100	—	—	[30]
	浙江温州	/	/	—	—	ND	—	—	[30]
	河南某养殖区	/	/	87.00	ND	<0.25	1.11	ND	[31]
	湖北宜昌宜东平原某池塘养殖区域	2012年11月	鱼类	—	—	—	23~828	—	[32]
华南地区	环鄱阳湖水产养殖区	2014年—2015年	水产类	95.14	最高为162.68	最高为96.55	最高为298.51	—	[33]
	湖北某蟹类养殖基地	/	蟹	—	—	45.2	—	—	[34]
	南方某市	2017年9月	水产类	5.36	716.00	2.80~40.20	1.85~20.00	—	[35]
	广西桂中、桂南、桂北	2017年5月	罗非鱼	—	32.7~3 242.0	ND~22.7	ND~44.3	ND	[36]
华南地区	广西钦州湾	2010年	/	—	—	—	ND~12	—	[37]
	广州南沙水产养殖区	2015年5月	罗非鱼、武昌鱼、鲢鱼、草鱼等	ND~60.76	ND	ND	ND~0.62	—	[38]
	广州养殖场鱼塘		鱼类	ND	5 160(平均)	920(平均)	2 820(平均)	ND	[39]
	珠江口	2012年3月	青鱼、草鱼、鲢鱼、鳊鱼、南美白对虾	ND	ND~40.92	ND~78.29	ND	—	[40]
	中山三角镇水产养殖地区	2008年	水产类	ND~11.7	ND	ND~192.0	ND~382.0	—	[41]

注:“ND”为未检测出;“—”为未进行检测;“/”为文献中未提及

在华东地区,余军楠等^[26]在江苏某虾池水体中检测出 14 种抗生素,两个养殖水体中抗生素总质量浓度分别为 104.890 ng/L 和 77.579 ng/L,四环素类、喹诺酮类、大环内酯类和磺胺类最高质量浓度分别达到 57.140、18.928、16.528 ng/L 和 0.658 ng/L。四环素类药物在南京两个养殖塘水体残留的抗生素中占主导地位。Chen 等^[42]研究表明,我国南部海陵岛养殖区水样中广泛检测到抗生素(ND~16 000 ng/L),主要类别同样是四环素类药物,但浓度水平较高于余军楠等的研究。在南京浦口养殖区,喹诺酮类和大环内酯类抗生素使浮游植物等暴露在一定生态风险中。闫如玉^[28]对上海 13 家大型养殖场水样进行检测,所有样点中抗生素总质量浓度为 22.25 ~ 850.80 ng/mL,平均质量浓度为 324.31 ng/mL。水样中各类抗生素占比为喹诺酮类(41.96%)>四环素类(29.91%)>磺胺类(16.91%)>氯霉素类(7.33%)>大环内酯类(3.89%)。喹诺酮类和四环素类抗生素是水体中主要的抗生素,两者占比之和达到了 70%。2011 年—2015 年,浙江水质监测项目中检测到 8 个典型养殖区水样中磺胺类和喹诺酮类抗生素是最主要的残留药物,质量浓度分别为 18.8 ~ 76.3 ng/L 和 94.2 ~ 113.2 ng/L^[29],检出磺胺甲恶唑、磺胺间甲氧基嘧啶、磺胺吡啶、磺胺氯哒嗪、恩诺沙星 5 种药物。其中,20 个水样检出磺胺甲恶唑;14 个水样检出磺胺间甲氧基嘧啶,含量为 32.3 ~ 76.3 ng/L;10 个水样检出磺胺吡啶,含量为 18.9 ~ 41.9 ng/L;6 个水样检出磺胺氯哒嗪,含量为 18.8 ~ 30.6 ng/L;4 个水样检出恩诺沙星,含量为 94.2 ~ 113.2 ng/L;喹诺酮类和磺胺类药物残留较为普遍。李佩佩等^[30]先后采集了浙江温州和舟山的某些养殖场水体进行喹诺酮类抗生素检测,在温州养殖场未检测出喹诺酮类抗生素,在舟山某养殖场则测出环丙沙星含量为 100 ng/L。

在华中地区,史朝斌^[31]在河南某养殖区域取一定样品,在 35 种抗生素中总共检测出其中的 7 种,且在水产养殖中较常用的脱水红霉素在水体的残留量远高于其他抗生素,为 87.00 ng/L,其余抗生素的水体残留量则不超过 3.00 ng/L。李瑞萍等^[32]在湖北宜昌宜东平原某池塘养殖区域的 34 个养殖鱼塘水体检测出磺胺异恶唑、磺胺甲恶唑、磺胺二甲嘧啶 3 种磺胺类药物,质量浓度为 23 ~ 828 ng/L。鱼塘水体中磺胺类药物的残留浓度与环境因子有着紧密联

系,水环境中的叶绿素 a、总磷、总氮及 pH 等因子会对磺胺类抗生素药物的环境行为如吸附、降解等产生影响,从而影响其在水体中的残留水平。磺胺二甲嘧啶与 pH、总氮、总磷及叶绿素 a 之间无相关性,但与总氮/总磷之间存在显著正相关。丁惠君^[33]在鄱阳湖附近水产养殖区检测出磺胺类、四环素类、喹诺酮类和大环内酯类抗生素,最高质量浓度分别为磺胺甲恶唑 298.51 ng/L、金霉素 162.68 ng/L、恩诺沙星 96.55 ng/L、罗红霉素 95.14 ng/L,其中磺胺类药物的检出率整体偏低,但在个别点位的含量却异常高,而大环内酯类、林可霉素类和喹诺酮类的浓度和检出率整体均偏高。成婧等^[34]取湘北某蟹类养殖基地的养殖水样进行喹诺酮类的检测,检测出环丙沙星含量为 45.2 ng/L。舟山和湘北养殖场在喹诺酮类抗生素的投放方面则有类似之处。

在华南地区,卓丽等^[35]在南方某市某养殖池塘水体中检测到大环内酯类、四环素类、喹诺酮类和磺胺类等 14 种抗生素,其中四环素类的氯四环素质量浓度最高,达 716.00 ng/L,而养殖水体中喹诺酮类和磺胺类抗生素的种类较丰富,氟喹诺酮类和磺胺类的高检出与其在水产养殖的广泛使用有关^[43]。该市水产养殖区中磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶、磺胺甲恶唑和甲氧苄啶的浓度均低于渤海水产养殖区附近水体中的浓度。王志芳^[36]在广西罗非鱼主产区养殖池塘水体中,仅检出土霉素、磺胺二甲嘧啶和恩诺沙星,最高质量浓度分别达到 3 242.0、44.3 ng/L 和 22.7 ng/L,其中土霉素已达到 $\mu\text{g/L}$ 水平,这可能是由于土霉素刚被投入水体中,磺胺二甲嘧啶和恩诺沙星含量较接近。薛保铭等^[37]在广西钦州湾渔场检测到磺胺类,其中磺胺甲基异恶唑平均质量浓度最高,为 4.1 ng/L,在河流样品中抗生素质量浓度为 ND~12 ng/L,海水样品中的抗生素质量浓度为 ND~9.9 ng/L。甲氧苄氨嘧啶质量浓度也相对较高,最高可达 3.8 ng/L。磺胺甲基异恶唑的高检出和高浓度与北部湾^[44]情况一致,这可能由于磺胺甲基异恶唑化学性质较稳定,不易水解及降解。甲氧苄氨嘧啶则是作为增效剂,通常是与多种磺胺类药物以 1:5 配合使用,甲氧苄氨嘧啶的检出浓度较大可能与投入量较多有关^[45]。郝勤伟等^[38]在广州南沙水产养殖区检测到 35 种抗生素,其中养殖水体中共检出 4 种抗生素,分别为甲氧苄啶、磺胺嘧啶、莫能菌素和脱水红霉素,甲氧苄啶质量浓度最低(0.11

ng/L),而脱水红霉素质量浓度最高(60.76 ng/L)。这与渤海湾养殖场水体所检测出的抗生素种类和浓度差异较大,可能是因为渤海湾海水带入了人用和兽用的抗生素以及渤海湾水体自净能力较弱^[45]。国彬等^[39]在广州采集14个鱼塘水样检测到的抗生素平均含量为四环素类(5.16 $\mu\text{g/L}$)>磺胺类(2.82 $\mu\text{g/L}$)>喹诺酮类(0.92 $\mu\text{g/L}$),其中四环素和磺胺对甲氧嘧啶含量最高,分别为5.16 $\mu\text{g/L}$ 和4.78 $\mu\text{g/L}$,土霉素在所有样点中均未被检出,诺氟沙星、环丙沙星、恩诺沙星含量相近,均在0.2~0.5 $\mu\text{g/L}$ 。郝红珊等^[46]在珠海和大亚湾水产养殖区海水水样中检出的6种抗生素及其含量均值为奇霉素(4.68 ng/L)>氧氟沙星(3.19 ng/L)>诺氟沙星(2.09 ng/L)>头孢噻肟钠(1.58 ng/L)>甲氧苄氨嘧啶(0.54 ng/L)>磺胺甲恶唑(0.13 ng/L)。梁惜梅等^[40]在珠江口养殖区水体中检测出2类(喹诺酮类、四环素类)抗生素,包括诺氟沙星、氧氟沙星和四环素3种抗生素,质量浓度分别为29.79~78.29、ND~9.16 ng/L和ND~40.92 ng/L,这与珠海和大亚湾海水水样检测情况类似。杨基峰等^[41]以中山三角镇典型配套养殖体系为对象,调查4种磺胺类(磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶、甲氧苄啶和磺胺甲恶唑)、2种四环素类(四环素和氧四环素)、2种喹诺酮类(诺氟沙星和氧氟沙星)和2种大环内酯类(脱水红霉素和罗红霉素)在鱼塘水体的暴露水平。磺胺类抗生素中质量浓度最高的为甲氧苄啶(382 ng/L),平均质量浓度为123 ng/L,大环内酯类中质量浓度最高的为脱水红霉素(11.7 ng/L),喹诺酮类中质量浓度最高为诺氟沙星(192 ng/L),四环素类抗生素则没有被检测出,四环素在沉积物中检出率在78%以上。这可能与四环素类抗生素本身水溶性差、易吸附于沉积物有关,造成其在水体中浓度极低,而磺胺嘧啶、磺胺甲恶唑和罗红霉素在沉积物中未检出,在相应的水体中检出,主要是由于上述3种抗生素本身的水溶性高特点所致。

综上,水产养殖场水体的抗生素使用量和残留量在沿海地区尤其是华南地区最高,其次是华东地区沿海地区,而华中地区最少。抗生素地域差异与很多因素有关,各地域根据养殖环境、养殖品种的不同所投入的抗生素的种类和质量会有所差别,养殖环境中一些理化因子如温度、pH等也会影响抗生素的残留程度。抗生素呈现出的地区性差异与当地抗

生素投放习惯和环境行为有关,且地区发展有所差异,人类生产活动和排放与地区经济紧密联系^[47],这些人类行为会使得环境中的抗生素降解速率发生变化。

3.2 不同养殖种类养殖水体中抗生素的含量

由于养殖方式的不同,不同养殖生物的养殖水体中抗生素的污染特征也不相同。2018年,李贞金等^[48]对多个水产养殖塘进行采样和检测,其中检测出抗生素种类最多的是白鱼水和青鱼塘,分别各10种;其次是虾塘,有9种抗生素被检出;而在扣蟹塘检出的抗生素种类最少,仅5种。除了磺胺甲恶唑仅在扣蟹塘被检出,其他磺胺类抗生素在各类养殖塘水中的检出质量浓度比较接近,在几~十几ng/L。与蟹塘和虾塘相比,鱼类养殖塘水体中甲氧苄啶检出质量浓度较高(16.40~30.42 ng/L)。在虾塘水体中,喹乙醇检测质量浓度高达3 612.85 ng/L,远高于其他养殖水体(检出质量浓度仅几ng/L),这可能与当时喹乙醇刚被投入虾塘水体中有关。喹乙醇的促生长作用较显著,因此,仍在水产养殖中广泛应用。研究显示,以30~150 mg/kg的添加量喂虾,成虾的平均增重率将提高15%~20%^[49]。

董晓^[24]在桑沟湾3个不同水产品种养殖区中共检测出9种喹诺酮类抗生素。在牙鲆养殖区,检出的抗生素种类多且含量较其他采样点浓度高。其中较高的抗生素为恩诺沙星、沙拉沙星、双氟沙星,含量为23.30~32.48 ng/L。在黑鱼养殖区,9种被检出的喹诺酮类抗生素含量为5.23~16.06 ng/L;在河豚养殖区,含量最高的抗生素是恩诺沙星,为18.79 ng/L。

杜鹃等^[25]对东营海水养殖区的5个养殖池水样进行了检测,海参池水中检测出罗红霉素、磺胺甲恶唑、甲氧苄氨嘧啶、氟甲砜霉素和恩诺沙星,而虾池中未检测到罗红霉素。海参池水中抗生素总浓度明显高于虾池,虾池中甲氧苄氨嘧啶最高质量浓度达30.1 ng/L,氟甲砜霉素最高质量浓度达65.3 ng/L,海参池中甲氧苄氨嘧啶最高质量浓度达98.2 ng/L,氟甲砜霉素最高质量浓度达261.0 ng/L,分别为虾池对应抗生素种类的3.26倍和4倍,海参池中抗生素总浓度平均值约为虾池中总浓度平均值的

4 倍。

王敏等^[50]在福建九江养殖区检测出 3 类(喹诺酮类、氯霉素类和磺胺类)共 7 种抗生素(诺氟沙星、氧氟沙星、氟甲砜霉素、磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶、磺胺甲恶唑和甲氧苄氨嘧啶)。养殖类型包括鸭、虾、鱼、蟹、贝类 5 类。磺胺嘧啶和甲氧苄氨嘧啶在鸭池中质量浓度最高,分别为 5.36 ng/L 和 40.20 ng/L;诺氟沙星、磺胺二甲嘧啶、磺胺甲恶唑和氟甲砜霉素在虾池中质量浓度最高,分别为 3.54、7.35、18.50 ng/L 和 5.00 ng/L;而氧氟沙星则在蛭池中质量浓度最高,为 14.80 ng/L。在鸭池中,甲氧苄氨嘧啶的使用量远高于其他 6 种抗生素,磺胺甲恶唑则在虾池中也较高于其他抗生素,而在鱼池、蟹池和蛭池 7 种抗生素使用量较少且差异不大。

3.3 水产养殖水体中抗生素季节分布特征

有关水产养殖水中抗生素浓度与季节变化关系的研究较少,呈现出的总体变化规律为春冬季的水体抗生素浓度高于夏秋季。陈国鑫^[27]检测到氟甲砜霉素在养殖鱼塘中春冬季的含量(1 957.2 ~ 3 429.8 ng/L)是夏秋季含量(145.1 ~ 226.1 ng/L)的 8.7 ~ 23.7 倍,生产河道春冬季的含量(389.5 ~ 683.0 ng/L)也高于夏秋季含量(13.5 ~ 247.3 ng/L)。对于生产河道和湖泊中的恩诺沙星、磺胺甲恶唑和土霉素而言,亦表现出相同的规律特点,其原因可能与温度以及当地的水文环境等因素有关。杨基峰等^[41]研究发现,水体中雨季和旱季中检出的抗生素种类存在较大差别。在 4 月雨季,最多有 3 种抗生素被检测出,分别为诺氟沙星、磺胺甲恶唑和脱水红霉素,其中诺氟沙星最高质量浓度可达到 192 ng/L。在 12 月旱季则有 8 种抗生素被检测出,种类明显多于雨季。这可能是因为广东地区雨季雨水较多,降雨对鱼塘水体中抗生素进行稀释,在旱季雨水较少,抗生素出现了一定程度的“富集”,从而导致更多的抗生素被检测出。此外,也有可能是夏季抗生素使用量增加导致的。在郝红珊等^[46]的研究中,2015 年春季水样抗生素浓度低于 2014 年秋季,珠海污染情况高于大亚湾,2015 年 3 月(春季)的降水量高于 2014 年 10 月(秋季),这说明海水水体中抗生素的污染受降水影响较显著。

4 结论与建议

本文总结了近十几年我国水产养殖水体中抗生

素的污染特征。养殖水中主要检测出大环内酯类、四环素类、磺胺类、喹诺酮类等抗生素,抗生素因养殖地区、养殖种类的差异而有所差异,可能与当地的抗生素使用模式有关。抗生素浓度在季节上总体规律为春冬季高于夏秋季,可能与温度、水文环境等因素有关。

从整个行业的层面上而言,我国从事水产养殖生产人员的专业素质有待提高,对于抗生素的使用仍有随意添加、管理不当等问题。如若不能及时采取对应的措施加以控制和处理,我国养殖行业的发展将会面临更为严峻的困境,甚至会威胁到国民的健康及安全^[51]。作为养殖业的抗菌性药物,抗生素在环境中的残留量不可忽视,为防止抗生素耐药性的产生,应科学合理用药或研发新型替代品。有关部门应重视抗生素的监控和限制,降低抗生素的残留危害,严格检测和限制超标水产品进入市场,确保食品安全。

参考文献

- [1] 罗茵.《2020 中国渔业统计年鉴》出版 广东水产品总产量首次全国第一[J]. 海洋与渔业, 2020(6): 12-13.
- [2] 黄钰玉, 方龙香, 宋超, 等. 抗生素恩诺沙星在渔业中的研究进展[J]. 农学学报, 2019, 9(11): 57-62.
- [3] 张寿月, 赵婉婉, 吴伟. 水产养殖环境中抗生素抗性基因污染及其研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(6): 125-134.
- [4] 童帮会. 淀山湖典型抗生素污染特征、来源及风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [5] BOXALL A B A, KOLPIN D W, HALLING-SØRENSEN B, et al. Peer reviewed: Are veterinary medicines causing environmental risks? [J]. Environmental Science & Technology, 2003. DOI: 10.1021/es032519b.
- [6] 卞星晨, 刘笑芬. 全球抗生素使用主要在中、低收入国家持续增加[J]. 中国感染与化疗杂志, 2019, 19(3): 278-278.
- [7] 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.
- [8] 张瑞玲. 北部湾典型养殖区抗生素污染特征及海产品食用风险[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [9] COLLIGNON P, VOSS A. China, what antibiotics and what volumes are used in food production animals[J]. Antimicrobial Resistance and Infection Control, 2015, 4(1): 16. DOI: 10.1186/s13756-015-0056-5.
- [10] KUPPUSAMY S, KAKARLA D, VENKATESWARLU K, et al. Veterinary antibiotics (VAs) contamination as a global agro-ecological issue: A critical view[J]. Agriculture Ecosystems &

- Environment, 2018, 257: 47–59. DOI: 10.1016/j. agee. 2018. 01. 026.
- [11] 李兆新, 董晓, 孙晓杰, 等. 渔业养殖环境中抗生素残留检测与控制技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(7): 2678–2686.
- [12] 卞佳豪, 奉竹, 林颖峥, 等. 喹诺酮类药物的抗菌和抗性机制[J]. 中国兽药杂志, 2020, 54(1): 80–85.
- [13] 吴甘林, 邓玉婷, 姜兰, 等. 水产动物源细菌质粒介导的喹诺酮类耐药研究概况[J]. 水产科学, 2020, 39(4): 631–638.
- [14] 吴小梅, 林茂, 鄢庆枇, 等. 美洲鳗鲡及其养殖水体分离耐药菌的多样性和耐药性分析[J]. 水产学报, 2015, 39(7): 1043–1053.
- [15] 陈姗, 许凡, 张玮, 等. 磺胺类抗生素污染现状及其环境行为的研究进展[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1557–1569.
- [16] 何世超, JEYAKKUMAR P, RAO A S, 等. 磺胺类药物化学研究新进展[J]. 中国科学: 化学, 2016, 46(9): 823–847.
- [17] 闫琦, 刘培培, 张娇娇, 等. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素的研究概况[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(5): 80–86.
- [18] 柳富荣. 渔用抗生素类药物(5)[J]. 湖南农业, 2016(5): 25–25.
- [19] RODRÍGUEZ M P, PEZZA H R, PEZZA L. Simple and clean determination of tetracyclines by flow injection analysis [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2016, 153: 386–392. DOI: 10.1016/j. saa. 2015. 08. 048.
- [20] 马俊美, 孙磊, 曹梅荣, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法测定猪肉中9种大环内酯类抗生素[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 273–279.
- [21] 尹晖, 王亦琳, 叶妮, 等. UPLC-MS/MS法检测禽蛋中10种大环内酯类药物多残留的研究[J]. 中国兽医杂志, 2020, 56(8): 77–83.
- [22] 李家成, 王佳豪, 许锴, 等. β -内酰胺类抗生素的检测及去除技术的研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(6): 1541–1546.
- [23] 吴强, 何生虎, 陈娟, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定牛羊肉中7种 β -内酰胺类抗生素的残留量[J]. 动物医学进展, 2015, 36(6): 64–68.
- [24] 董晓. 渔业养殖环境中抗生素残留检测及消除技术[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [25] 杜鹃, 赵洪霞, 陈景文. 固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法同时测定养殖海水中23种抗生素[J]. 色谱, 2015, 33(4): 348–353.
- [26] 余军楠, 方昊, 胡建林, 等. 江苏四个典型克氏原螯虾养殖区抗生素污染特征与生态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 386–393.
- [27] 陈国鑫. 水产养殖水中抗生素的残留特性及其去除技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [28] 闫如玉. 上海市养殖场抗生素及其他药物的赋存特征与风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [29] 郑重莺, 吴洪喜, 黎飞, 等. 浙江省典型淡水养殖区水体质量评价[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(12): 2268–2274.
- [30] 李佩佩, 张小军, 梅光明, 等. 超高效液相色谱-串联质谱检测养殖水体中喹诺酮类抗生素[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(3): 334–338.
- [31] 史朝斌. 水产养殖区抗生素的残留特性研究[J]. 河南水产, 2019, 128(4): 28–29, 36.
- [32] 李瑞萍, 张欣欣, 刘卓, 等. 池塘养殖水体 pH、营养盐、叶绿素 a 及 3 种磺胺类抗生素分布特征及其相关性分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2582–2588.
- [33] 丁惠君. 鄱阳湖水环境抗生素污染特征及典型抗生素的吸附和降解研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [34] 成婧, 付善良, 丁利, 等. 磁性固相萃取-液质联用测定环境水体中喹诺酮类抗生素[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016(3): 328–333.
- [35] 卓丽, 王美欢, 石运刚, 等. 南方典型水源地及水产养殖区抗生素的复合污染特征及生态风险[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 164–175.
- [36] 王志芳. 广西罗非鱼主产区养殖池塘的重金属和抗生素检测及风险评估[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [37] 薛保铭, 杨惟薇, 王英辉, 等. 钦州湾水体中磺胺类抗生素污染特征与生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1664–1669.
- [38] 郝勤伟, 徐向荣, 陈辉, 等. 广州市南沙水产养殖区抗生素的残留特性[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(1): 106–113.
- [39] 国彬, 姚丽贤, 刘忠珍, 等. 广州市兽用抗生素的环境残留研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 938–945.
- [40] 梁惜梅, 施震, 黄小平. 珠江口典型水产养殖区抗生素的污染特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 304–310.
- [41] 杨基峰, 应光国, 赵建亮, 等. 配套养殖体系中部分抗生素的污染特征[J]. 环境化学, 2015, 34(1): 54–59.
- [42] CHEN H, LIU S, XU X, et al. Antibiotics in typical marine aquaculture farms surrounding Hailing Island, South China: Occurrence, bioaccumulation and human dietary exposure[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 90(1): 181–187.
- [43] LIU X, STEELE J C, MENG X. Usage, residue, and human health risk of antibiotics in Chinese aquaculture: A review[J]. Environmental Pollution, 2017, 223: 161–169. DOI: 10.1016/j. envpol. 2017. 01. 003.
- [44] ZHENG Q, ZHANG R, WANG Y, 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. DOI: 10.1016/j. marenvres. 2012. 03. 007.
- [45] ZOU S, XU W, ZHANG R, 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.
- [46] 郝红珊, 徐亚茹, 高月, 等. 珠江口水域养殖区水体、沉积物及水产品中抗生素的分布[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 1077–1084.
- [47] 赵永宏, 邓祥征, 吴锋, 等. 乌梁素海流域氮磷减排与区域经济发展的均衡分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(1): 110–117.
- [48] 李贞金, 张洪昌, 沈根祥, 等. 水产养殖水、沉积物中抗生素检测方法优化及残留特征研究[J]. 生态毒理学报, 2020,

- 15(1): 209–219.
- [49] 马敬中, 武冬梅, 汪有生. 唑乙醇在我国的应用研究进展[J]. 化学世界, 2008(10): 630–633.
- [50] 王敏, 俞慎, 洪有为, 等. 5 种典型滨海养殖水体中多种类抗生素的残留特性[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 934–939.
- [51] 韩昊男. 养殖业中抗生素使用状况研究及解决对策[J]. 绿色环保建材, 2020(2): 246–247.
- (上接第 11 页)
- [55] HAGESKAL G, KNUTSEN A K, GAUSTAD P, et al. Diversity and significance of mold species in norwegian drinking water[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2006, 72(12): 7586–7593.
- [56] AFONSO T B, SIMÕES L C, LIMA N. Occurrence of filamentous fungi in drinking water: Their role on fungal-bacterial biofilm formation[J]. Research in Microbiology, 2021, 172(1): 103791. DOI: 10.1016/j.resmic.2020.11.002.
- [57] DEL O G, HUSBAND S, SÁNCHEZ B C, et al. The microbial ecology of a Mediterranean chlorinated drinking water distribution systems in the city of Valencia (Spain)[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142016.
- [58] CAO R, WAN Q, TAN L, et al. Evaluation of the vital viability and their application in fungal spores' disinfection with flow cytometry[J]. Chemosphere, 2020, 269: 128700. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128700.
- [59] GEISEN R. Multiplex polymerase chain reaction for the detection of potential aflatoxin and sterigmatocystin producing fungi[J]. Systematic and Applied Microbiology, 1996, 19(3): 388–392.
- [60] PASSONE M A, ROSSO L C, CIANCIO A, et al. Detection and quantification of *Aspergillus* section Flavi spp. in stored peanuts by real-time PCR of *nor-1* gene, and effects of storage conditions on aflatoxin production[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 138(3): 276–281.
- [61] KELLEY J, PATERSON R, KINSEY G, et al. Identification, significance and control of fungi in water distribution systems[C]. Denver: Proceedings of the Water Technology Conference, 1997.
- [62] PATERSON R R M, LIMA N. Fungal contamination of drinking water[J]. Water Encyclopedia, 2005. DOI: 10.1002/047147844X.wq1516.
- [63] PEREIRA V J, BASÍLIO M C, FERNANDES D, et al. Occurrence of filamentous fungi and yeasts in three different drinking water sources[J]. Water Research, 2009, 43(15): 3813–3819.
- [64] HIEKEY P C, SWIFT S R, ROCA M G, et al. Live-cell imaging of filamentous fungi using vital fluorescent dyes and confocal microscopy[J]. Methods in Microbiology, 2004, 34: 63–87. DOI:10.1016/S0580-9517(04)34003-1.
- [65] ZHANG L, LIU X, ZHU S, et al. Detection of the nematophagous fungus *Hirsutiella rhossiliensis* in soil by real-time PCR and parasitism bioassay[J]. Biological Control, 2006, 36(3): 316–323.
- [66] PATHAK E, EL-BORAI F E, CAMPOS-HERRERA R, et al. Use of real-time PCR to discriminate parasitic and saprophagous behaviour by nematophagous fungi[J]. Fungal Biology, 2012, 116(5): 563–573.
- [67] PRIGIONE V, LINGUA G, MARCHISIO V F. Development and use of flow cytometry for detection of airborne fungi[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(3): 1360–1365.
- [68] BRADNER J R, NEVALAINEN K M H. Metabolic activity in filamentous fungi can be analysed by flow cytometry[J]. Journal of Microbiological Methods, 2003, 54(2): 193–201.
- [69] 文刚, 王静怡, 黄廷林, 等. 流式细胞仪在水处理中的应用现状与展望[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 58–62.
- [70] WANG Y, HAMMES F, DE ROY K, et al. Past, present and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology[J]. Trends in Biotechnology, 2010, 28(8): 416–424.
- [71] LUO X Y, XU X Q, CAO R H, et al. The formation kinetics and control of biofilms by three dominant fungi species isolated from groundwater[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 109: 148–160. DOI: 10.1016/j.jes.2021.04.002.
- [72] RUSSELL R, PATERSON M. Zearalenone production and growth in drinking water inoculated with *Fusarium graminearum*[J]. Mycological Progress, 2007, 6(2): 109–113.
- [73] STAKHEEV A A, RYAZANTSEV D Y, GAGKAEVA T Y, et al. PCR detection of *Fusarium* fungi with similar profiles of the produced mycotoxins[J]. Food Control, 2011, 22(3–4): 462–468. DOI: 10.1016/j.foodcont.2010.09.028.
- [74] ZHANG H, JIA J, CHEN S, et al. Dynamics of bacterial and fungal communities during the outbreak and decline of an algal bloom in a drinking water reservoir[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(2): 361. DOI: 10.3390/ijerph15020361.
- [75] LIANG Z T, XU X Q, CAO R H, et al. Synergistic effect of ozone and chlorine on inactivating fungal spores: Influencing factors and mechanisms[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 420: 126610. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126610.
- [76] LI W, TAN Q, ZHOU W, et al. Impact of substrate material and chlorine/chloramine on the composition and function of a young biofilm microbial community as revealed by high-throughput 16S rRNA sequencing[J]. Chemosphere, 2020, 242: 125310. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125310.