

钦州湾水体中磺胺类抗生素污染特征与生态风险

薛保铭,杨惟薇*,王英辉,黄闻宇,李平阳,张瑞杰,黄 魁 (广西大学环境学院,广西 南宁 530004)

摘要: 利用高效液相色谱-串联质谱(HPLC-MS/MS),研究了钦州湾近海及汇海河流磺胺类抗生素浓度和分布特征.结果表明:4种磺胺类抗生素(SAs)和甲氧苄氨嘧啶(TMP)在钦州湾近海及汇海河流均有不同程度的检出,其浓度范围为 n.d.~12ng/L.其中,磺胺甲基异恶唑(SMX)在近海的检出率和平均浓度最高,分别为 100%和 4.1ng/L;其次为 TMP(检出率 87%,平均浓度 1.0ng/L).与国内其他水域相比,钦州湾磺胺类抗生素浓度处于较低水平.钦州湾近海抗生素浓度分布呈现以下趋势:茅尾海(8.4ng/L)>钦州外湾(1.9ng/L)>三娘湾(1.4ng/L).磺胺类抗生素在钦州湾的海水养殖区均呈现出较高的浓度水平,说明高密度水产养殖是钦州湾水体中抗生素的重要污染源.生态风险评估结果表明,钦州湾水体中残留的磺胺甲基异恶唑(SMX)对相应的敏感物种存在中等生态毒性风险,需引起相关部门的重视.

关键词: 抗生素; 磺胺; 钦州湾; 风险评估

中图分类号: X52,X171

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2013)09-1664-06

Occurrence, distribution and ecological risks of sulfonamides in the Qinzhou Bay, South China. XUE Bao-ming, YANG Wei-wei*, WANG Ying-hui, HUANG Wen-yu, LI Ping-yang, ZHANG Rui-jie, HUANG Kui (School of Environment Studies, Guangxi University, Nanning 530004, China). *China Environmental Science*, 2013,33(9): 1664~1669

Abstract: Five antibiotics (including four sulfonamides and trimethoprim) in the Qinzhou Bay, South China, were analyzed using highperformance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry. Focus was on the levels and distribution of antibiotics pollution in the waters. Sulfamethoxazole, with concentrations up to 12ng/L, was the most frequently detected compound, following by TMP. In general, the contamination level was relatively low when compared with other areas. The average antibiotic concentrations from different sections of the bay decreased in the following order: Maowei Sea (8.4ng/L) > outer Qinzhou Bay (1.9ng/L) > Sanning Bay (1.4ng/L). The concentrations of antibiotics in the aquaculture area were higher those in other areas, indicating that aquaculture activities could contribute to the antibiotic residues in the environment. An ecological risk assessment revealed that sulfamethoxazole may present possible risk to the environment. Therefore, the long-term ecological effects caused by the continuous discharge of antibiotics in the Qinzhou Bay can not be ignored.

Key words: antibiotics; sulfonamides; Qinzhou Bay; risk assessment

磺胺类抗生素是较为重要的一类抗生素药物,目前已广泛应用于养殖业,如牲畜养殖和水产养殖业等^[1].近年来,我国学者针对一些重点渔业海域,如环渤海^[1-3]、长江三角洲^[4]和珠江三角洲^[5-7]等地区,开展了抗生素污染研究,结果表明,抗生素的环境污染问题严重.

钦州湾是广西北部湾发展的重点港湾,也是我国的重要渔场.钦州湾由内湾(茅尾海)、湾颈和外湾三部分组成,中间狭窄、两端开阔,呈哑铃状,是个典型的溺谷型半封闭式海湾.内湾既是河口湾,又具备相当的封闭条件,水交换能力较弱,污染物不易扩散^[8].钦州湾北部有钦江、茅岭江等淡

水汇入,饵料充足,鱼类资源丰富,水产养殖业发达.近年来,随着海水养殖规模的不断扩大,大量抗生素输入到水体环境中,然而至今未见钦州湾抗生素污染方面的研究报道.本文以磺胺类抗生素为研究对象,揭示钦州湾近海和入海河流磺胺类抗生素浓度水平和分布特征,并对磺胺类抗生素污染进行生态风险评估,以期对钦州湾海域环

收稿日期: 2013-01-18

基金项目: 广西北部湾经济区基础研究重大专项(2010GXNSFE013006); 国家自然科学基金(41273139); 北部湾环境演变与资源利用省部共建教育部重点实验室(BBG1104)

* 责任作者, 工程师, wyh@gxu.edu.cn

境污染防治工作提供科学依据.

小柱.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

Agilent1200 型高效液相色谱仪,串联 Agilent 6410Triple Quad(三重四级杆)质谱仪;涡旋振荡器;超声波清洗器;低速离心机;Supelco SPE Manifolds 12 孔固相萃取装置;CNWBOND HLB 固相萃取小柱(500mg,6mL).

回收率指示剂: $^{13}\text{C}_3$ -咖啡因溶液,浓度为 1mg/mL,购自美国剑桥同位素实验室.甲醇为色谱纯,购自 Merck 公司(达姆施塔特,德国).5 种抗生素包括磺胺嘧啶(SDZ)、磺胺甲基异恶唑(SMX)、磺胺二甲嘧啶(SMZ)、磺胺噻唑(STZ)和甲氧苄胺嘧啶(TMP).抗生素均为固体粉末标样,并购自 Sigma-Aldrich 公司(圣路易斯,密苏里州,美国).TMP 抗菌谱和磺胺类抗生素相近,并且通常作为 SAs 的增效剂,以 1:5 的比例施用,因此,本研究将 TMP 与 SAs 共同讨论.

1.2 样品采集及预处理

2010 年 10 月,课题组采用全球卫星定位系统(GPS)定位,在钦州湾近海及入海河流(包括钦江、茅岭江、金鼓江和大风江)共采集水样 34 件,其中表层海水样品为 31 件;入海河流水样为 13 件,采样点地理坐标见图 1.所有海水样品均在渔船上采集,而入海河流样品则在桥上采集.海水和河水样品都采用不锈钢桶采集,采样深度为表层下 0~50cm,河流的采样位置设置在水流中心.样品采集完毕后,迅速转移至已洗净并润洗 3 次的 5L 棕色玻璃瓶中,并尽快运至实验室,保存在 4℃ 冰箱里待测.

样品预处理采用徐维海^[9]、张瑞杰等^[1]提出的方法进行.量取海水样品 2L(河水样品为 1L),静置后通过 0.45 μm 的混合纤维酯微孔滤膜,再加入 0.2g Na_2EDTA 和 100ng (100 $\mu\text{L}\times 1\text{mg/L}$)回收率指示剂 $^{13}\text{C}_3$ -咖啡因(CAF),并以 3mol/L 的硫酸溶液调节水样 pH 值至 3.

HLB 萃取小柱在使用前进行预淋洗活化:用甲醇、纯净水分别淋洗 3 次,每次 2mL,最后加入酸化后 pH 值为 3 的超纯水,加至接近充满 HLB

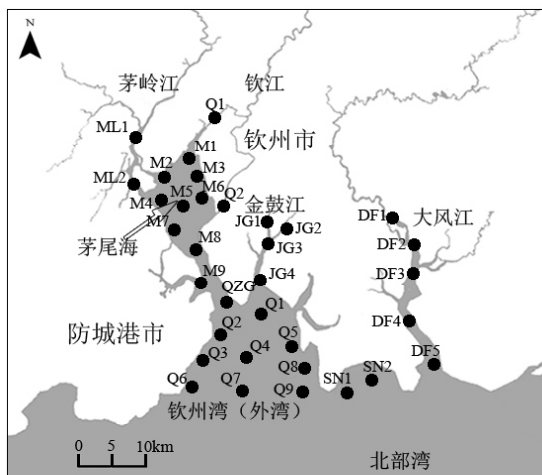


图 1 钦州湾采样点示意

Fig.1 The sampling sites in the Qinzhou Bay

连接管路,将样品和 HLB 小柱及 SPE 装置连接,开启真空泵,调节减压阀,控制样品以约 10mL/min 的流速经过 HLB 小柱.柱富集完成后,用 10mL 纯净水冲洗 HLB 柱,真空干燥后,用 2mL 甲醇洗脱 3 次,洗脱液接至 10mL 的玻璃具塞离心管中,在室温下用柔和氮气吹扫至近干,再用甲醇定容至 1mL.用 0.2 μm 针头式滤膜过滤定容后样品至 1.5mL 棕色进样瓶中,4℃ 冰箱中保存,尽快进行 HPLC-MS/MS 分析测样.如果不能及时上机测样,在氮吹浓缩时可以先浓缩至 1mL 左右,储存于 -20℃ 冰箱中,待上机测样前再进一步浓缩、定容、过滤,以防止部分抗生素在水相溶液中水解.

1.3 HPLC-MS/MS 分析

色谱条件:Agilent ZORBAX Eclipse XRD- C_{18} Rapid Resolution HT 50mm $\times$ 2.1mm,1.8 μm 液相色谱柱,柱前接 Security GuardTM C_{18} (4.0mm $\times$ 3.0mm)保护柱.质谱条件:选择电喷雾离子源(ESI),正离子模式;干燥气温度 350℃;干燥气流速 10L/min;毛细管电压 4500V;MS1 与 MS2 温度均为 100℃,喷雾针压力 40Psi;碰撞气:氮气;多离子反应监测(MRM)扫描模式.流动相:流动相 A 为 5mmol/L 醋酸铵和 0.1%甲酸混合溶液,流动相

B 为甲醇,流速 0.3mL/min,进样量 2μL,柱温 25℃.梯度洗脱进行分离,每个梯度完成后平衡时间为 8min.

1.4 质量控制

采用外标法对样品浓度进行定量分析,线性方程浓度范围由 0.5,1.0,2.0,5.0,10.0,20.0,50.0,100.0,200.0μg/L 9 个浓度值组成,其 R^2 值大于 0.99 (样品所测得的浓度均未超过标准曲线的线性范围).实验前测定抗生素回收率:在样品中加入 200ng 目标化合物(设置 5 个平行样),4℃保存 24h 后用相同的方法对其进行预处理和提取.测定其浓度后(扣除空白值),计算各种抗生素的回收率.结果表明,抗生素的回收率为 71%~81%,如表 1 所示.为了控制实验过程中人为误差和实验室背景影响,分别设置一个空白样和样品平行样,并在进样过程中同时测定固定浓度标样进行质量控制.取 3 倍信噪比为仪器检出限(0.07~0.18ng/L).

表 1 实验中抗生素的回收率和检测限

Table 1 Recoveries and the limits of detection of selected antibiotics

抗生素	相关系数 (R^2)	回收率 (%)	检出限 (ng/L)
磺胺嘧啶(SDZ)	0.9996	82±7	0.12
磺胺甲基异恶唑(SMX)	0.9982	79±9	0.13
磺胺噻唑(STZ)	0.9985	81±9	0.070
磺胺二甲嘧啶(SMZ)	0.9998	70±5	0.073
甲氧苄胺嘧啶(TMP)	0.9996	75±8	0.068
¹³ C ₃ -咖啡因(回收率指示物)	0.9990	80±9	0.31

2 结果与讨论

2.1 钦州湾近海抗生素的浓度水平

在钦州湾海水样品中,SMX 的检出率和浓度最高,检出率达 100%,浓度范围为 0.25~9.9ng/L,如表 2 所示.SMX 在钦州湾近海的高检出率和高浓度与前人在其他水域的研究是一致的^[10],这可能是由于 SMX 物理化学性质较为稳定,不易降解和水解所致.TMP 在钦州湾海水样品中的检出率和含量水平也相对较高,其检出率为 87%,浓度范围为 n.d.~3.8ng/L.TMP 是一种

抗生素的增效剂,通常与 SMX,SDZ 等磺胺类抗生素以 1:5 的比例配合使用.因此,较大的使用量可能是钦州湾区域 TMP 检出率和检出浓度较高的原因.然而,STZ 在钦州湾的检出率和检出浓度大大低于其他的磺胺类抗生素,其检出浓度大多在检测限附近,这很可能是因为 STZ 已被农业部明令禁止用于水产养殖^[11].与国内外其他海湾相比,钦州湾磺胺类抗生素污染处于较低水平,其浓度水平远低于香港维多利亚港^[7]、渤海湾^[2]、比利时海岸带^[12]和莱州湾^[13],但稍高于烟台海湾和黄海^[1].

表 2 钦州湾水体抗生素浓度

Table 2 The concentration of antibiotics in the Qinzhou Bay

项目	SAs+TMP (ng/L)					总和
	SDZ	STZ	SMZ	SMX	TMP	
河流样品 (n=13)						
最大值	1.9	0.76	1.4	12	4.1	14
最小值	n.d.	n.d.	0.49	0.45	0.76	0.94
中位值	0.24	n.d.	0.30	2.6	1.2	5.0
平均值	0.41	0.13	0.41	4.1	1.5	5.1
检出率(%)	62	38	77	100	92	
海湾样品 (n=21)						
最大值	3.4	0.41	3.4	9.9	3.8	16
最小值	n.d.	n.d.	n.d.	0.25	n.d.	0.25
中位值	0.28	n.d.	0.20	2.0	0.51	2.5
平均值	0.85	0.05	0.66	3.1	1.0	4.7
检出率(%)	57	14	52	100	87	

注: n.d. 为未检出

2.2 钦州湾汇海河流的抗生素浓度水平与分布特征

与钦州湾近岸海水相似,在钦州湾汇海河流中,SMX 和 TMP 同样呈现出较高的检出率和浓度水平.SMX 的检出率和浓度范围分别为 100% 和 n.d.~12ng/L;而 TMP 的检出率和浓度范围分别为 92%和 n.d.~4.1ng/L.这种相似性,在一定程度上反映了河流输入是近海抗生素污染的“源”.

钦江是钦州市最大的河流,流经钦州市区的人口密集区,大量的城镇污水被排放到其中,因此除了 STZ 未检出,其余抗生素在钦江均有不同程度的检出.茅岭江检出的抗生素浓度都比较低,最

高浓度仅为 6.8ng/L,这可能与茅岭江水流量大,自净能力较强有关.金鼓江和大风江的水流都汇入钦州外湾,对于金鼓江来说,检出的磺胺类抗生素浓度相对较高,最高达 9.2ng/L,这很可能与金鼓江的养殖业发达相关.金鼓江主航道上有大量水产养殖业分布,主要有大蚝养殖和网箱养鱼.水产养殖业需要大量的饲料,为防止病害,需使用大量兽用抗生素.一般来说,抗生素由点源到受纳水体,其浓度的稀释系数通常是数十到数百不等^[11],然而,金鼓江和大风江抗生素的平均浓度仅为钦州湾(受纳水体)的 2 倍,茅岭江中抗生素浓度甚至比茅尾海还低,说明钦州湾近海的抗生素污染除了河流输入之外,还有别的“源”,如水产养殖,近海排污管等.与其他地区河流相比,研究区域内河流的磺胺类抗生素残留水平处于中低水平,其浓度水平低于珠江^[6],黄浦江^[14],但与韩国的灵山河(Youngsan River)^[15]和英国的泰恩河(Tyne River)^[16]浓度相当(表 3).

表 3 钦州湾磺胺类抗生素浓度水平(ng/L)与其他地区比较

Table 3 Global comparisons of SAs concentrations (ng/L) in the water

研究区域	SDZ	SMX	SMZ	TMP	文献
钦州湾	n.d.~3.41	n.d.~10.4	n.d.~3.39	n.d.~3.77	本研究
渤海湾	n.d.~41	n.d.~140	n.d.~130	n.d.~120	[2]
烟台和黄海	0.01	1.4	0.02	1.4	[1]
莱州湾	n.d.~0.4	1.5~82	n.d.~1.5	1.3~329.5	[13]
珠江	3~141	2~165	4~179	n.a.	[6]
	135~336	111~193	107~323	n.a.	
维多利亚港	n.a.	n.d.~47.5	n.d.~8.6	2.6~216	[7]
黄浦江	1.4~40.6	4.9~55.2	2.1~623.3	2.2~62.4	[14]
灵山河,韩国	10~20	0~110	10~20	10~20	[15]
泰恩河,英国	n.a.	<20	n.a.	4~19	[16]
塞纳河,法国	n.a.	40~140	<10,4.4%	n.d.~36	[17]
易北河,德国	n.a.	30~70	<30	<30~40	[18]
湄公河	n.d.	20~33	<50	5~20	[19]
多摩川河,日本	<150	4~23	n.d.	<100	
139 河流,美国	n.d.	520	120	300	[20]
5 个河口,英国	n.a.	<20	n.a.	<4~569	[21]
比利时海岸带	n.a.	43	n.a.	29	[12]

注: n.d.为未检出; n.a.为缺数据

2.3 抗生素污染在钦州湾的空间分布

总体上说,钦州湾汇海河流中抗生素浓度比海湾高,除茅岭江外,其他河流的抗生素浓度均高于对应的汇入海湾(图 2).在 4 条汇海河流中,钦江的磺胺类抗生素浓度最高(平均 10ng/L,最高 14ng/L).如前所述,钦江流经钦州市区,经济较为发达,该区也是研究区域中人口最密集的地区,说明抗生素污染与经济发展程度人口密集程度也是相关的.钦州湾近岸海域中,东海岸抗生素的污染程度相对比西海岸严重,而钦州湾居民区和经济开发区是集中分布在东海岸的,这进一步说明了经济发展和人为活动是影响钦州湾水体抗生素污染程度的重要因素.对比钦州湾不同海域的污染情况,发现内湾的污染程度要比外湾严重.例如茅尾海、钦州外湾和三娘湾,这 3 个港湾依次由内湾向外湾延伸,其抗生素总浓度分布特征为:茅尾海(平均 8.4ng/L,最高 16ng/L)>钦州外湾(平均 1.9ng/L,最高 6.8ng/L)>三娘湾(平均 1.4ng/L,最高 2.0ng/L).这种分布规律主要是由于内湾与污染源距离较近,受纳的污染物浓度较高,而且内湾的水体交换能力相对较弱,自净能力相对较差.

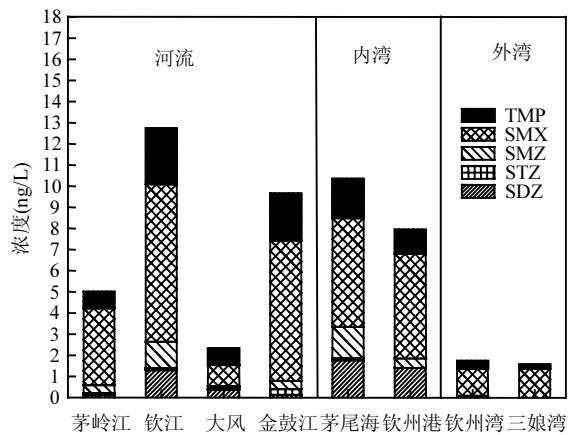


图 2 钦州湾抗生素污染含量分布

Fig.2 Distribution of antibiotics in the Qinzhou Bay

2.4 磺胺类抗生素在钦州湾的生态风险评价

根据欧盟的技术指导文件(TGD)中关于环境风险评价的方法^[22],药品残留在环境中的生态风险可以根据风险商值(RQs)的大小来评价.RQs的计算可以通过污染物的环境预测浓度(PEC)或者实际监测浓度(MEC)与预测无效应浓度

(PNEC)的比值获得.本研究中,PNEC 值是通过从文献中收集磺胺类抗生素对一些物种的急性慢性毒理数据求得.毒理数据主要来自 Isidori^[23], Kummerer^[24]和 Lee^[25]等的研究,涉及藻类、浮萍和鱼类等多个物种.基于最坏情况考虑,本研究中风险商值(RQs)的计算是通过磺胺类抗生素的最大实际监测浓度与最敏感物种的 PNEC 值进行计算求得.按照 Hernand 等^[26]提出的 RQs 的分类方法表征生态风险的不同程度: RQs<0.1

为最低风险, $0.1 \leq RQs < 1$ 为中等风险, $RQs \geq 1$ 为高风险.

生态风险评价结果表明(图 3),大部分磺胺类抗生素在钦州湾近海水体环境中构成的生态风险处于较低水平($RQs < 0.01$).但在钦州湾 4 条汇海河流中(茅尾海、茅岭江、金鼓江和钦江),SMX 对水藻(*Synechococcus leopoliensis*)的风险商(RQs)值都大于 0.1,即存在中等生态毒性风险.因此磺胺类抗生素在钦州湾环境中的污染不容忽视.

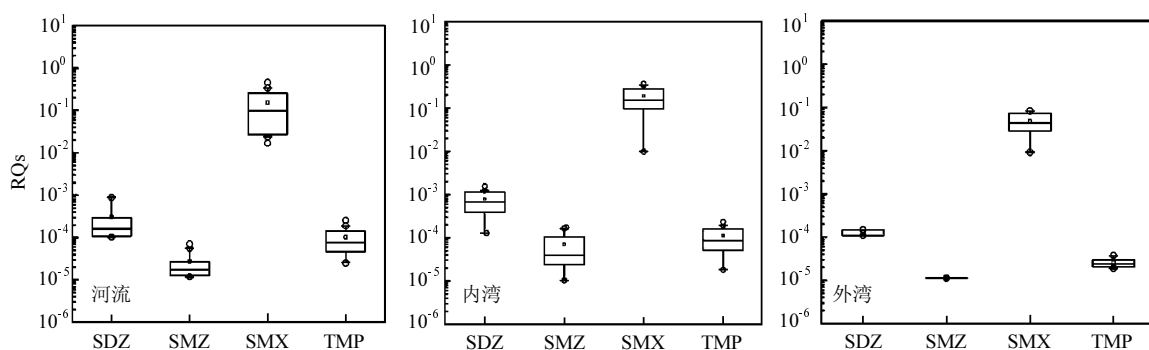
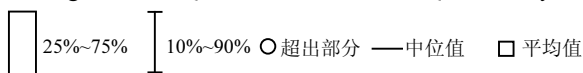


图 3 钦州湾 4 种抗生素的风险商值

Fig.3 The RQs of 4 antibiotics in the Qinzhou Bay



3 结语

4 种磺胺类抗生素和 TMP 在钦州湾近海及 4 条汇海河流中均有不同程度的检出,其浓度范围为 n.d.~12ng/L,均值 5.84ng/L.其中,SMX 在近海和河流的检出率最高,均达 100%;TMP 次之,在河流和海湾的检出率分别为 92%和 87%;而 STZ 最低(在海水中的检出率仅为 14%).钦州湾汇海河流的抗生素含量普遍高于海湾;海湾中抗生素污染程度随离岸距离的增加而减少.近海网箱养殖是钦州湾区域磺胺类抗生素污染的重要来源.总体上说,与国内外其他水域相比,钦州湾海水中磺胺类抗生素浓度处于较低水平.但 SMX 的残留对相应的敏感生物存在中等生态毒性风险,应引起有关部门的重视并采取相应防范措施.

参考文献:

- [1] 张瑞杰.黄渤海区域及东江流域环境中典型抗生素污染研究 [D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2011.
- [2] 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]. Environ. Pollut., 2011,159:2913-2920.
- [3] Zhang R J, Tang J H, Li J, et al. Antibiotics in the offshore waters of the Bohai Sea and the Yellow Sea in China: Occurrence, distribution and ecological risks [J]. Environ. Pollut., 2013, 174:71-77.
- [4] Yan C X, Yang Y, Zhou J L, et al. Antibiotics in the surface water of the Yangtze Estuary: Occurrence, distribution and risk assessment [J]. Environ. Pollut., 2013,175:22-29.
- [5] Yang J F, Ying G G, Zhao J L, et al. Spatial and seasonal distribution of selected antibiotics in surface waters of the Pearl Rivers, China [J]. J. Environ. Sci. Health B., 2011,46:272-280.
- [6] Xu W H, Zhang G, Zou S C, et al. Determination of selected antibiotics in the Victoria Harbour and the Pearl River, South China using high-performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. Environ. Pollut., 2007,145:672-679.
- [7] 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]. *Mar. Pollut. Bull.*, 2009,58:1052-1062.
- [8] 刘敬合,叶维强.广西钦州湾地貌及其沉积特征的初步研究 [J]. *海洋通报*, 1989,8(2):49-57.
- [9] 徐维海.典型抗生素药物在珠江三角洲水环境中的分布、行为与归宿 [D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [10] 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]. *Mar. Environ. Res.*, 2012,78:26-33.
- [11] 中华人民共和国农业部.中华人民共和国农业部公告第 627 号 [Z]. 2006-03-14.
- [12] Wille K, Noppe H, Verheyden K, et al. Validation and application of an LC-MS/MS method for the simultaneous quantification of 13 pharmaceuticals in seawater [J]. *Analy. Bioanal. Chem.*, 2010,397:1797-1808.
- [13] Zhang R J, Zhang G, Zheng Q, et al. Occurrence and risks of antibiotics in the Laizhou Bay, China: impacts of river discharge [J]. *Ecotox. Environ. Safe.*, 2012,80:208-215.
- [14] Jiang L, Hu X L, Yin D Q, et al. Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai China [J]. *Chemosphere*, 2011,82:822-828.
- [15] Kim S D, Choa J, Kima I S, et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters [J]. *Water Res.*, 2007,41: 1013-1021.
- [16] Roberts P H, Thomas K V. The occurrence of selected pharmaceuticals in wastewater effluent and surface waters of the lower Tyne catchment [J]. *Sci. Total Environ.*, 2006,356:143-153.
- [17] Tamtam F, Mercier F, Le-Bot B, et al. Occurrence and fate of antibiotics in the Seine River in various hydrological conditions [J]. *Sci. Total Environ.*, 2008,393:84-95.
- [18] Wiegel S, Aulinger A, Brockmeyer R, et al. Pharmaceuticals in the river Elbe and its tributaries [J]. *Chemosphere*, 2004,57:107-126.
- [19] Managaki S, Murata A, Takada H, et al. Distribution of macrolides, sulfonamides, and trimethoprim in tropical waters: Ubiquitous occurrence of veterinary antibiotics in the Mekong Delta [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2007,41:8004-8010.
- [20] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, et al. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999-2000: A national reconnaissance [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2002,36:1202-1211.
- [21] Thomas K V, Hilton M J. The occurrence of selected human pharmaceutical compounds in UK estuaries [J]. *Mar. Pollut. Bull.*, 2004,49:436-444.
- [22] EC (European Commission), 2003. European Commission Technical Guidance Document in Support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for New Notified Substances and Commission Regulation (EC) no. 1488/94 on Risk Assessment for Existing Substance, Part II. In: Commission, E. (Ed.), pp. 100-103.
- [23] Isidori M, Lavorgna M, Nardelli A, et al. Toxic and genotoxic evaluation of six antibiotics on non-target organisms [J]. *Sci. Total Environ.*, 2005,346:87-98.
- [24] Kummerer K, Henninger A. Promoting resistance by the emission of antibiotics from hospitals and households into effluent [J]. *Clin. Micro. Infect.*, 2003,9:1203-1214.
- [25] Lee Y J, Lee S E, Lee D S, et al. Risk assessment of human antibiotics in Korean aquatic environment [J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2008,26:216-221.
- [26] Hernando M D, Mezcuca M, Fernandez-Alba A R, et al. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments [J]. *Talanta*, 2006,69:334-342.

致谢: 本研究在采样及测试过程中得到唐建辉、张瑞杰、薛瑞、伍婷婷等人的帮助和支持,在此表示感谢。

作者简介: 薛保铭(1987-),男,广东佛山人,广西大学环境学院硕士研究生,研究方向为环境有机地球化学.发表论文 5 篇。