



上海市水利学会
编

SHANGHAI
SHUIHENGTAI
SHUIHUANJING
XUESHU WENXUAN

上海 水生态·水环境 学术文选

上海市水利优秀科技论文集



上海科学技术出版社

上海水生态·水环境学术文选—— 上海市水利优秀科技论文集

上海市水利学会 编



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

上海水生态·水环境学术文选:上海市水利优秀科技论文集/上海市水利学会编. —上海:上海科学技术出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-5478-2954-7

I. ①上… II. ①上… III. ①水环境—生态环境建设—上海市—文集 IV. ①X143-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 009201 号

上海水生态·水环境学术文选——上海市水利优秀科技论文集
上海市水利学会 编

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co
苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15

字数 410 千字

2016 年 2 月第 1 版 2016 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2954-7/TV·4

定价: 65.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书主要包括 2015 年上海市水利行业优秀科技论文评选活动的优秀论文,2015 年上海市水利学会举办的相关学术论坛的主旨论文和上海近年来河道水环境整治实践中形成的专题论文。这些论文分别涉水环境监测、水生态修复、水处理实践、城乡河道治理、水生态文明建设、水功能区划环境达标、河口海岸整治等领域,在理论上有独到见解,在应用上有新体会,在技术上有新观点,对促进上海水生态文明建设、推动水利科技进步起有指导或作用。

本书在编辑上力求尊重原文,个别体例、格式方面或有修改,以求全书有统一的风格。

本书可供从事水利事业的科技工作者和管理者,以及水利专业相关大专院校的高年级本科生及研究生阅读与参考。

上海水生态·水环境学术文选
——上海市水利优秀科技论文集

编 委 会

主 编 刘晓涛

副主编 胡传廉 马远东 顾圣华

编 委 (按姓氏笔画排列)

卢永金	邬显晨	阮仁良	吴景社	沈 洪	陈国光
胡 欣	俞相成	徐贵全	郭 颖(女)	黄 剑	
曹根祥	虞重亮(女)				

主办单位：上海市水利学会

上海市水利工程协会

上海市水文协会

上海市水务局科学技术委员会

协办单位：上海市勘测设计研究院(集团)公司

序 言

《上海水生态·水环境学术文选》是继2013年《上海水科技·水工程学术文选》之后,以水生态文明建设、水环境治理为主题,再度出版的水利行业科技论文集。本文选以上海市水务局科学技术委员会、上海市水利学会、上海市水利工程协会和上海市水文协会联合举办的“上海市水利优秀科技论文评选活动”优秀成果为基础,收集了《黄浦江上游水体中抗生素的分布特征与生态风险》等获奖论文,征集了“上海水源地安全保障”、“河道生态治理研讨”、“绿色港航学术沙龙”、“长江口近期河势演变趋势学术研究”等学术论坛中具有创新和实用观点的主旨论文,遴选了《农业面源污染防治技术及推广应用研究》等上海市近年来河道水环境整治实践中形成技术结晶的专题论文。这些论文聚焦都市水利安全、资源、环境所支撑经济社会发展的难点、热点问题,充分体现本市水利科技工作者遵循党的十八大提出的“良好的生态环境是人类社会持续发展的根本基础”的理念,展现了近年来市水利学会科技交流活动所取得的丰硕成果。

《上海水生态·水环境学术文选》又是一部提炼上海“十二五”水利事业发展中水生态文明建设、水环境治理的科技成果集。入选论文凸显上海水利行业广大科技工作者以倡导自然、顺应自然、保护自然、合理利用自然为主导,通过学习—实践—总结—再学习—再实践—再总结,不断积淀破解难题过程中的点点滴滴,锲而不舍、勤奋钻研,不仅使自身素质不断提升,更令同事、同行得到学习、借鉴和启发,对本市加强水生态文明建设提供了智力支持。

《上海水生态·水环境学术文选》顺利出版,得到了上海市勘测设计研究院(集团)公司的大力支持,特此表示衷心感谢。

“问渠哪得清如许,为有源头活水来。”

衷心希望广大水利科技工作者,能在本书中获得丰盛收益。

当前,中央确立了“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念,作出了强化生态文明建设的战略部署,明确了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路。上海围绕本市全面建成小康社会的目标,落实水生态建设要求,提出了“补好短板、提标升质、注重生态、智慧管理”的水利“十三五”发展思路。上海市水利学会广大科技工作者将会继续传承发扬前辈优良传统,开拓创新、勇于探索、潜心研究、勤于思考,严谨学术、善于总结,撰写出更多的优秀论文,为上海水利“安全、优质、高效、生态、智慧”协调发展,为实现“建成与上海‘四个中心’和现代化国际大都市相匹配的现代化水利服务保障体系”的目标,做出更大的贡献!

上海市水利学会理事长 刘晓涛

2015年12月

目 录

水环境监测

A

黄浦江上游水体中抗生素的分布特征与生态风险 姜 蕾 蔡海芸 卢 宁	3
上海地区区域生态环境需水量研究 顾圣华	8
长江河口盐度监测布局研究 袁 诚 顾圣华 李 琪	14
基于层次分析法的长江口水文站网评价研究 易文林 顾圣华 李 琪	21
水质数据管理和评价的信息化探讨——基于 WISKI - WQM 模块及 LIMS 的综合应用 王 晖 赵 诣 杨笛音	25
太阳能式无人值守水资源监测分析系统应用研究 袁 帅 马贵林 周国华 安保庆 刘贤君	31

水生态修复

B

探究沉水植物对城镇污染河道内源污染的控制作用 高 洋 刘玉超	39
城市水源湖水生态修复技术与适用性分析 朱博华 何 斌	42
生态护岸工程设计中若干关键问题的复核 严 飞	48

浅谈生态清淤技术在城市中小河道的应用

方芳芳 53

浅析生态护岸建设研究与实践

黄 成 56

水处理实践

基于三维 VOF 模型的变径水平管道气体运动模拟研究

袁文麒 江 伟 施佩娟 63

大口径大高差多起伏给水管道气水冲洗工程实践与分析

袁文麒 郑小明 董 宪 69

基于不确定性分析的供水管网模型精度评估

舒诗湖 74

混凝-吸附联用工艺去除水中磷的中试研究

左 军 黄志金 王 莉 赵明珠 78

塑料填料曝气生物滤池处理河水的研究

黄志金 左 军 王 莉 赵明珠 82

农村生活污水处理系统应用与管理

杨之文 刘林华 王乃安 殷 健 86

青浦区农业面源污染防治技术及推广应用研究

邓继军 卓志钢 袁永坤 刘雪峰 89

练塘镇农村生活污水长效管理现状分析及建议

向赞旭 94

城乡河道治理

苏州河水生态环境治理典型案例解析

阮仁良 韩昌来 99

苏州河底泥疏浚关键技术研究

石正宝 103

河网水流模拟的矩阵标识法研究

钱 真 贾卫红 李世阳 107

城镇河道综合整治的几种措施

龚 碧 沈美娟 111

城镇地区河道长效管理的实践与思考

刘林华 杨之文 115

水生态文明建设

海绵城市与绿色雨水基础设施

赵敏华 121

浅论黄浦江堤防在滨水空间建设中的作用和未来发展

梁鹏飞 130

南桥新城水系及水景观建设研究

吴莉莉 134

关于实施“海绵城市”建设的思考

金超 黄成 137

关于申城黄浦江水浮莲整治工作的思考

程安 140

水功能区划环境达标

深化水环境治理, 推动水功能区水质达标

阮仁良 145

太浦闸调度对黄浦江水源地水质影响分析

刘水芹 田华 易文林 148

海滨水库引清调水的数值模拟研究

陆扬 153

东风西沙水库突发性溢油事故风险等级判定研究

常进 158

河口海岸整治

泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性

崔冬 刘新成 俞相成 165

对长江口北槽深水航道回淤原因争议性问题的分析

刘猛 173

构建内河航运生态航道关键技术解析

陈虹 183

长江口深水航道治理工程中的环境保护实践与展望

郑文燕 189

潮汐作用下弯道环流的数值模拟

宋永港 卢永金 李路 196

长江口工程促淤区的淤积特征及强度分析

刘新成 崔冬 俞相成 205

长江口 12.5 m 深水航道回淤特征

刘杰 程海峰 赵德招 212

长江口河势近 15 年变化特征及其对河口治理的启示

赵德招 张俊勇 高敏 218

水环境监测

A

黄浦江上游水体中抗生素的分布特征与生态风险

姜 蕾 蔡海芸 卢 宁

(上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司,上海 200082)

摘 要:采用高效液相色谱-质谱法对黄浦江上游水体中抗生素的分布特征进行检测分析,对其生态风险进行初步评价。结果显示,所有样点均检测到抗生素存在,种类包括6种磺胺类、3种大环内酯类和2种氯霉素类。磺胺甲恶唑、磺胺氯哒嗪、甲氧苄氨嘧啶、氟甲砜霉素、罗红霉素、泰乐霉素和红霉素分布最广泛,检出率为100%。抗生素的浓度在ng/L水平,氟甲砜霉素的平均浓度最高(36.85 ng/L),其次是磺胺二甲嘧啶(20.09 ng/L)。与国内外其他河流水体报道数据相比,黄浦江上游水体的抗生素总体水平相对较低。初步生态风险分析显示,目前的抗生素水平不存在生态风险。

关键词:黄浦江上游;抗生素;分布特征;生态风险

抗生素被大量用于人类医疗保健、动物养殖和农业生产中,使用量高,应用范围广。30%~90%人类和动物使用的抗生素会以原药、代谢产物等形式排出体外,最终通过生活污水排放、养殖废水排放、农业粪肥灌溉径流等不同途径进入水环境^[1,2]。这些残留的抗生素会造成生态健康影响,对微生物、动植物产生危害,破坏环境中以食物链为联系的生态系统的平衡^[3,4],更严重的是诱导大量耐药菌的产生,使其在环境中繁殖和传播,最终威胁人类健康^[5,6]。近年来,关于抗生素在水环境中存在或暴露的报道越来越多,世界不同地区的养殖废水、污水处理厂、地表水、地下水甚至饮用水源中均检测到抗生素污染的存在,包括我国珠江流域、黄河流域等水体。水环境抗生素污染引起越来越多的关注。

上海是我国经济高度发达的地区,抗生素使用量和生产量很大。黄浦江是上海市的重要河流,前期对黄浦江干流和下游的调查显示,水体中存在磺胺类、氯霉素类等抗生素残留,浓度在几十纳克每升^[7]。黄浦江上游为上海市饮用水源,该区域周边以郊区为主,农业生产相对密集,抗生素的大量使用给水环境安全带来一定威胁,但是该区域水环境的抗生素污染现状尚不明确。因此,本研究针对黄浦江上游水体中磺胺类、大环内酯类、氯霉素类和喹诺

酮类4类15种代表性抗生素的分布特征展开调查,对该区域水体抗生素的生态风险进行初步分析,以期控制污染和水源地保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 主要试剂与仪器

本研究选择15种典型抗生素为目标物质,包括6种磺胺类(磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶、磺胺甲恶唑、磺胺氯哒嗪、磺胺吡啶、甲氧苄氨嘧啶)、2种氯霉素类(氯霉素、氟甲砜霉素)、3种大环内酯类(罗红霉素、泰乐霉素、红霉素)、4种氟喹诺酮类(氧氟沙星、诺氟沙星、恩诺沙星、环丙沙星),抗生素标准品(>95%)购自 Dr. Ehrenstorfer GmbH (Augsburg, Germany)。内标物质¹³C₃-咖啡因呢(¹³C₃-caffeine, 0.1 mg/mL,溶于甲醇)购自 Cambridge Isotope Labs (Andover, MA, USA)。甲酸(HPLC级)购自 TEDIA (Fairfield, OH, USA)。甲醇和乙腈(HPLC级)购于 Merck (Darmstadt, Germany)。Na₂EDTA (≥99%)购自 Amresco (Solon, OH, USA)。试验所用超纯水由 Milli-Q 纯水系统制备 (Millipore, Bedford, MA, USA)。其他药品试剂为分析纯。分别称取一定量的抗生素标准品,用甲醇溶解,配制成100 μg/mL 储备溶液, -20℃保存。

* 本文发表于《净水技术》2014年9月。

基金项目:上海市科委青年科技启明星计划项目“青草沙水源水中抗生素的分布特征与生态风险研究”(14QB1400800);上海市技术标准专项(14DZ0503400);上海市自然科学基金项目(12ZR1410000)。

本文获得“2015年上海市水利行业优秀科技论文评选活动”一等奖。

标准工作溶液现用现配。

水样过滤使用 $0.7\ \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜 (GF/F, Whatman, England); 抗生素富集采用 Auto trace 280 自动固相萃取装置 (Caliper, USA), 使用 Oasis[®] HLB 固相萃取小柱 ($500\ \text{mg}/6\ \text{mL}$, Waters, USA); 富集后样品浓缩采用 Turbo Vap II 氮气自动浓缩仪 (Caliper, USA), 浓缩后样品过滤使用 $0.22\ \mu\text{m}$ PVDF 针式滤膜 (Millipore, USA)。抗生素分析采用 Agilent 1260 HPLC 液相色谱仪系统, Agilent 6430 Triple Quad 三重四极杆串联质谱仪 (Agilent, USA), 配有电喷雾电离源 (Electrospray Ionization Source, ESI)。

1.2 样品采集

在黄浦江上游流域设置 10 个样点: 拦路港泖站 (A1)、斜塘夏字圩站 (A2)、园泄泾三角渡站 (A3)、大泖港泖港站 (A4), 重要支流太浦河设置 6 个样点, 包括太浦闸 (A5)、平望 (A6)、黎里 (A7)、北室 (A8)、金泽 (A9)、八百亩 (A10)。采样点分布如图所示。

2014 年 3 月采集水样, 水样采于水面下 $1.0\ \text{m}$ 处。采集的水样置于棕色玻璃容器中, 避光低温运输, 尽量减少抗生素降解。

1.3 样品处理

水样经玻璃纤维滤膜过滤去除悬浮颗粒物。水样中抗生素的富集浓缩参照 Lei Jiang 等方法进行^[7]。取 $1\ \text{L}$ 已过滤水样, 用 $40\%(\text{v/v})\ \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液调节 pH 值为 3.0, 加入 $0.5\ \text{g}$ 螯合剂 Na_2EDTA

保护抗生素, 充分混匀, 用 HLB 小柱进行固相萃取富集。上样前, HLB 小柱依次以 $6\ \text{mL}$ 甲醇和 $6\ \text{mL}$ 纯水进行活化; 水样以 $2\ \text{mL}/\text{min}$ 流速通过 HLB 小柱, 使抗生素保留在小柱上; 上样后, 以 $10\ \text{mL}$ 纯水清洗小柱, 并在氮气保护下干燥 $30\ \text{min}$ 去除小柱上的残留水分; 以 $3\ \text{mL} \times 3$ 甲醇对抗生素进行洗脱; 洗脱液合并, 室温下氮吹, 以 50% 甲醇水溶液定容至 $1.0\ \text{mL}$, 加入内标物 $^{13}\text{C}_3$ -caffein, 使之最终浓度为 $30\ \mu\text{g}/\text{L}$; 样品经 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 置于一 20°C 保存待测。

1.4 检测分析

X Bridge C18 ($150 \times 2.1\ \text{mm}, 3.5\ \mu\text{m}$) 液相色谱柱, 柱温 30°C 。流动相为分别含 $0.1\%(\text{v/v})$ 甲酸的乙腈溶液 (A) 和水溶液 (B), 梯度洗脱程序为: $0\ \text{min}$, $15\% \text{ A}$; $15\ \text{min}$, $15\% \text{ A}$; $25\ \text{min}$, $50\% \text{ A}$; $30\ \text{min}$, $15\% \text{ A}$; $35\ \text{min}$, $15\% \text{ A}$ 。流速 $0.25\ \text{mL}/\text{min}$, 进样量 $20\ \mu\text{L}$ 。

氯霉素类采用电喷雾离子源负离子扫描模式 (ESI⁻), 其他物质采用 ESI⁺ 模式。干燥气温度为 350°C , 干燥气流速 $10\ \text{L}/\text{min}$, 雾化器压力 $35\ \text{psig}$, 毛细管电压 $3500\ \text{V}$ 。以多反应监测 (MRM) 方式采集数据对各物质进行定性与定量分析, 抗生素的质谱监测离子及主要参数见表 1。

地表水中进行加标回收实验, 抗生素加标回收率在 $56\% \sim 96\%$ 。以 3 倍信噪比为检出限, 水中抗生素的检出限为 $0.01 \sim 3.40\ \text{ng}/\text{L}$ 。采用内标法定量, 配置浓度为 $0.05 \sim 500\ \mu\text{g}/\text{L}$ 系列的抗生素混合标准溶液, 内标物浓度为 $30\ \mu\text{g}/\text{L}$, 在上述色谱质谱

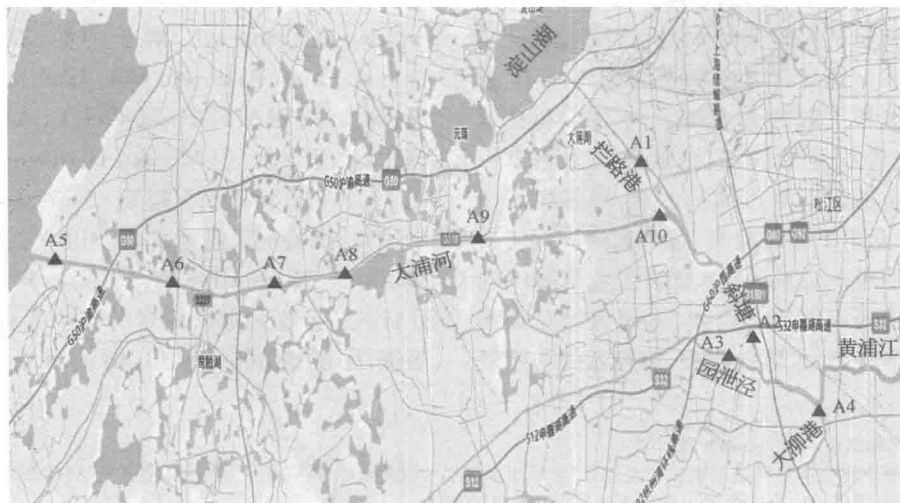


图 1 黄浦江上游采样点

条件下进样,以各分析物和内标物定量离子对的峰面积之比进行定量,标准曲线在该线性范围的相关系数均大于 0.99。

表 1 抗生素的质谱监测离子与主要参数

物 质	母离子 (m/z)	子离子 (m/z)	去簇电压 (V)	碰撞能量 (eV)
磺胺嘧啶(SD)	251.2	156.0 [*] /92.1	100	15/27
磺胺二甲嘧啶(SM2)	279.1	186.0 [*] /149.1	105	15/17
磺胺甲噁唑(SMZ)	254.2	156.0 [*] /108.1	100	15/23
磺胺氯哒嗪(SCP)	285.1	156.1 [*] /92.1	95	15/28
磺胺吡啶(SPD)	250.2	156.1 [*] /184.2	113	16/14
甲氧苄啶(TMP)	291.2	156.1 [*] /184.2	113	16/14
罗红霉素(ROX)	837.5	679.5/158.2 [*]	155	21/35
泰乐霉素(TYL)	916.5	772.5/174.1 [*]	240	20/28
红霉素(ERY)	734.5	576.4/158.2 [*]	155	20/30
氧氟沙星(OFL)	362.2	318.3 [*] /261.1	125	18/25
诺氟沙星(ENR)	320.2	302.2 [*] /267.1	125	20/25
恩诺沙星(NOR)	360.2	342.2 [*] /299.1	125	20/26
环丙沙星(CIP)	332.2	314.2 [*] /288.1	125	18/19
氯霉素(CAP)	321.1	257.1 [*] /152.1	110	5/14
氟甲砜霉素(FF)	356.0	336.9 [*] /185.1	110	3/14
¹³ C ₃ -咖啡因(L.S.)	198.1	140.1 [*] /112.1	105	20/22

注: * 表示定量离子。

2 结果与讨论

2.1 黄浦江上游水体抗生素的检出种类与含量水平

10 个采样点均检测到抗生素存在。在 4 类 15 种目标抗生素中,共检测到 11 种,分别为 6 种磺胺类、3 种大环内酯类和 2 种氯霉素类,喹诺酮类未检出。这些检出的抗生素中,除了磺胺甲噁唑、甲氧苄啶和罗红霉素是人畜共用药物之外,其他都是典型的兽用抗生素,说明养殖生产对黄浦江上游水体抗生素污染的作用很大。检出抗生素浓度在 ng/L 水平,氟甲砜霉素的平均浓度最高(36.85 ng/L),其次是磺胺二甲嘧啶(20.09 ng/L),各样点抗生素的含量水平见表 2。

磺胺类 6 种目标物质均有检出,其中,磺胺甲恶唑、磺胺氯哒嗪和甲氧苄啶分布最广泛,样点检出频率为 100%;其次是磺胺二甲嘧啶,检出频率为 90%,磺胺嘧啶和磺胺吡啶检出频率分别为 70%和 60%。磺胺二甲嘧啶、磺胺嘧啶和磺胺甲噁唑浓度相对较高,平均浓度分别为 20.09 ng/L、15.48 ng/L 和 14.94 ng/L,最高浓度为拦路港泖甸站(A1)的磺胺二甲嘧啶,浓度为 73.82 ng/L;甲氧苄啶、磺胺氯

表 2 黄浦江上游水体抗生素检出浓度 (ng/L)

	泖甸(A1)	夏守圩(A2)	三角渡(A3)	泖港(A4)	太浦闸(A5)	平望(A6)	黎里(A7)	北宅(A8)	金泽(A9)	八百亩(A10)
磺胺嘧啶	8.55	9.36	2.04	nd	nd	nd	18.46	24.02	22.02	23.90
磺胺二甲嘧啶	73.82	29.87	2.40	nd	0.18	0.15	1.61	3.42	6.91	22.59
磺胺甲噁唑	20.68	14.72	7.88	1.26	13.71	13.56	14.15	25.07	18.60	17.18
磺胺氯哒嗪	3.73	2.71	4.40	0.35	0.25	0.42	1.96	3.47	2.40	2.77
磺胺吡啶	6.77	6.41	nd	nd	nd	nd	0.36	1.07	1.20	1.10
甲氧苄啶	3.83	3.72	9.80	27.39	0.45	4.25	3.30	4.72	6.23	5.13
罗红霉素	3.80	4.94	11.06	3.85	0.71	0.68	4.23	6.54	6.12	5.01
泰乐霉素	0.15	0.18	1.33	0.55	0.16	0.13	0.17	0.20	0.24	0.19
红霉素	0.45	0.40	0.77	0.50	0.07	0.33	0.23	0.33	0.44	0.42
氧氟沙星	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
诺氟沙星	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
恩诺沙星	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
环丙沙星	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
氯霉素	4.03	nd	4.70	5.13	2.41	nd	nd	nd	2.00	nd
氟甲砜霉素	31.86	25.81	59.91	90.28	2.74	9.89	15.59	16.25	27.19	27.89
抗生素浓度总和	149.12	88.76	102.25	129.31	20.68	29.41	41.6	61.07	71.33	82.28

哒嗪和磺胺嘧啶相对较低,平均浓度分别为 8.02 ng/L、2.72 ng/L 和 2.82 ng/L。磺胺类抗生素是环境水体中报道频率非常高的抗生素种类,本研究结果显示该类药物在上海地区的使用也很广泛。与已有报道相比,黄浦江上游水体的磺胺类含量水平高于格兰德河流域农业区(0.66~3.6 ng/L)^[8]、Koyama 河流域(0.03~8.9 ng/L)^[9]和维多利亚湾地表水(未检出)^[10];与汉河(<40 ng/L)^[11]和黄河(3~68 ng/L)^[12]水体的磺胺类含量相当。

氯霉素类中,氟甲砜霉素是典型的动物养殖和水产养殖用抗生素,该物质在黄浦江上游所有样点均有检出,平均浓度为 36.85 ng/L,在大泖港泖港站(A4)和园泄泾三角渡站(A3)浓度分别为 90.28 ng/L 和 59.91 ng/L,是本研究检出抗生素中浓度最高的种类。氯霉素具有强烈的诱变和致癌作用,自 20 世纪 90 年代起欧、美等国家已经禁止在养殖业中使用氯霉素,我国也于 2002 年对氯霉素颁布禁用令,本研究显示氯霉素在黄浦江上游水体仍有分布,检出频率为 50%,平均浓度为 3.97 ng/L,虽然浓度不高,但说明该药物可能在该地区仍有部分使用,需要引起注意。与我国珠江流域水体报道的氯霉素检出水平(11~266 ng/L)相比,黄浦江上游浓度较低^[25]。

大环内酯类也是黄浦江上游水体中分布较为广泛的抗生素种类。三种大环内酯类检出频率均 100%,但是浓度较低,罗红霉素平均浓度为 5.09 ng/L,泰乐霉素和红霉素低于 1.0 ng/L。该水平远低于英国(50~560 ng/L)^[13]、我国珠江(16~66 ng/L)^[10]和黄河(53.9 ng/L)^[12]等水体的残留浓度。大环内酯类浓度较低可能是因为该类抗生素在上海地区使用量较小,并且它们具有较强的生物降解性和光降解性,不易在环境中持久存在。

2.2 黄浦江上游水体抗生素的空间分布特征

由表 2 可见,越靠近下游样点,抗生素的检出浓

度越高、种类越多。太浦河 6 个样点的抗生素浓度总和从上游的 20.68 ng/L 增加到河口的 82.28 ng/L,各种抗生素个体的浓度也呈现递增趋势;从抗生素种类来看,上游样点 A5 和 A6 检出 8~9 种,中下游样点 A7~A10 则检出 10~11 种。分析原因,可能是周边农业生产污染排放,抗生素等污染物不断进入河道,因此越靠下游污染物积累越多,浓度越高,种类越复杂。

不同支流比较可见,拦路港(泖甸,A1)检出 11 种抗生素,抗生素总浓度 149.12 ng/L,为各样点中最高,尤其是磺胺二甲嘧啶(78.32 ng/L)远高于其他样点。其次是大泖港(泖港,A4)和圆泄泾(三角渡,A3),抗生素总浓度分别为 129.31 ng/L 和 102.25 ng/L,检出种类为 10~11 种。重要支流太浦河抗生素水平相对较低,最高浓度的河口样点 A10 总浓度为 82.28 ng/L。

2.3 黄浦江上游水体抗生素的生态风险

根据欧盟环境风险分析指导,以风险商(risk quotient,RQ)对黄浦江上游水体中的检出抗生素进行了初步生态风险分析。RQ 为物质的环境检出浓度(measured environmental concentration,MEC)与预测无效应浓度(predicted no-effect concentration,PNEC)的比值,其中,PNEC 等于物质的半数效应浓度(EC₅₀/LC₅₀)与风险因子(assessment factor,AF)之商,当采用慢性毒性 EC₅₀/LC₅₀ 数据时,AF 取值 100,当采用急性毒性数据时,AF 取值 1 000。当 RQ≥1,视为不可接受风险,即污染物暴露会给生态环境带来危害;当 RQ<1,视为污染物暴露无害。对黄浦江上游水体抗生素的风险评价显示,各检出浓度的风险商均小于 1,目前不存在生态风险。其中,以太浦河的北室样点的磺胺甲恶唑风险商最高,为 0.836,须引起注意。检出各种抗生素最大浓度的生态风险见表 3。

表 3 黄浦江上游水体检出抗生素的最大风险

物 质	最小 EC ₅₀ /LC ₅₀ (μg/L)	AF	PNEC ^a (ng/L)	最大检出浓度 MEC ^b (ng/L)	样 点	RQ ^c
磺胺嘧啶	7 800(盐藻,72 h) ^[14]	1 000	7 800	24.02	北 室	0.003
磺胺二甲嘧啶	1 277(鲤藻,7 d) ^[15]	1 000	1 277	29.87	夏守玗	0.023
磺胺甲恶唑	30(聚球藻,96 h) ^[16]	1 000	30	25.07	北 室	0.836
磺胺氯哒嗪	—	—	—	4.40	三角渡	—

(续表)

物 质	最小 EC ₅₀ /LC ₅₀ ($\mu\text{g/L}$)	AF	PNEC ^a (ng/L)	最大检出浓度 MEC ^b (ng/L)	样 点	RQ ^c
磺胺吡啶	—	—	—	6.77	柳 甸	—
甲氧苄啶	80 300(羊角月牙, 72 h) ^[17]	1 000	80 300	27.39	柳 港	0.000 3
罗红霉素	—	—	—	11.06	三角渡	—
泰乐霉素	411(羊角月牙, 72 h) ^[17]	1 000	411	1.33	三角渡	0.003
红霉素	—	—	—	0.77	三角渡	—
氯霉素	64.3(费氏弧菌, 24 h) ^[18]	100	643	5.13	柳 港	0.008
氟甲砜霉素	8 886(羊角月牙藻, 72 h) ^[17]	1 000	8 886	90.28	柳 港	0.010

注: ^aPNEC 为预测无效应浓度; ^bMEC 为环境检出浓度; ^cRQ 为风险商; ^d—为无相应数据。

3 结论与建议

抗生素是一类新型环境污染物, 本文对黄浦江上游水体中典型抗生素的调查显示, 水体中存在抗生素残留, 以磺胺类、大环内酯类和氯霉素类为主, 浓度在 ng/L 水平, 初步分析表明尚不存在生态风险。黄浦江上游为上海市饮用水源, 该区域周边以郊区为主, 农业生产相对密集, 调查显示检出抗生素中以典型兽用抗生素居多, 说明养殖生产对黄浦江上游水体抗生素污染的作用较大, 因此, 建议上海市应重视并加强养殖业和农业面源污染排放的管理, 降低抗生素等污染物对水环境的污染风险。

参考文献

- [1] Alcock RE, Sweetman A, Jones KC. Assessment of organic contaminant fate in waste water treatment plants I: Selected compounds and physicochemical properties. *Chemosphere*, 1999, 38(10): 2247–2262.
- [2] Halling-Sørensen B. Inhibition of aerobic growth and nitrification of bacteria in sewage sludge by antibacterial agents. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 40(4): 451–460.
- [3] Park S, Choi K. Hazard assessment of commonly used agricultural antibiotics on aquatic ecosystems. *Ecotoxicology*, 2008, 17(6): 526–538.
- [4] Kümmerer K. Significance of antibiotics in the environment. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2003, 52(1): 5–7.
- [5] Baquero F, Martínez JL, Cantón R. Antibiotics and antibiotic resistance in water environments. *Current Opinion in Biotechnology*, 2008, 19(3): 260–265.
- [6] Kümmerer K. Resistance in the environment. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2004, 54(2): 311–320.
- [7] Lei Jiang, Xialin Hu, Daqiang Yin, Hongchang Zhang, Zhenyang Yu. Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China. *Chemosphere*, 2011, 82(6): 822–828.
- [8] Lissemore L, Hao C, Yang P, et al. An exposure assessment for selected pharmaceuticals within a watershed in Southern Ontario. *Chemosphere*, 2006, 64(5): 717–729.
- [9] Chang H, Hu J, Asami M, et al. Simultaneous analysis of 16 sulfonamide and trimethoprim antibiotics in environmental waters by liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1190(1–2): 390–393.
- [10] Xu W, Zhang G, Zou S, 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. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 672–679.
- [11] Choi K, Kim Y, Park J, et al. Seasonal variations of several pharmaceutical residues in surface water and sewage treatment plants of Han River, Korea. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1–3): 120–128.
- [12] Xu W, Zhang G, Zou S, et al. A preliminary investigation on the occurrence and distribution of antibiotics in the Yellow River and its tributaries, China. *Water Environment Research*, 2009, 81(3): 248–254.
- [13] Ashton D, Hilton M, Thomas KV. Investigating the environmental transport of human pharmaceuticals to streams in the United Kingdom. *Science of the Total Environment*, 2004, 333(1–3): 167–184.
- [14] Lützhøft HCH, Halling-Sørensen B, Jørgensen SE. Algal toxicity of antibacterial agents applied in Danish fish farming. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, 36(1): 1–6.
- [15] Brain RA, Johnson DJ, Richards SM, et al. Effects of 25 pharmaceutical compounds to *Lemna gibba* using a seven-day static—renewal test. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, 23(2): 371–382.
- [16] Nunes B, Carvalho F, Guilhermino L. Acute toxicity of widely used pharmaceuticals in aquatic species: *Gambusia holbrooki*, *Artemia parthenogenetica* and *Tetraselmis chuii*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 61(3): 413–419.
- [17] Eguchi K, Nagase H, Ozawa M, et al. Evaluation of antimicrobial agents for veterinary use in the ecotoxicity test using microalgae. *Chemosphere*, 2004, 57(11): 1733–1738.
- [18] Backhaus T, Grimme LH. The toxicity of antibiotic agents to the luminescent bacterium *Vibrio fischeri*. *Chemosphere*, 1999, 38(14): 3291–3301.