

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价

谢文平, 朱新平*, 郑光明, 马丽莎

(中国水产科学研究院珠江水产研究所, 农业部热带亚热带水产种质资源利用与养殖重点实验室, 农业部水产品质量安全风险评估实验室, 广州 510380)

摘要: 利用气相色谱(GC-ECD)、原子吸收和原子荧光法, 对广东罗非鱼主要养殖区鱼塘水体及罗非鱼肌肉中 Cu、Pd、Cd、As、HCHs 和 DDTs 进行检测, 同时应用了不同评价模型对罗非鱼食用安全进行健康风险评价。结果表明, Cu、Pd、Cd、As、BHCs 和 DDTs 在 4 个不同养殖区水体中含量范围分别为: $\text{nd} \sim 0.101 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{nd} \sim 0.097 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{nd} \sim 0.00327 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.0121 \sim 0.08127 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.63 \sim 37.18 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.05 \sim 12.21 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。主要罗非鱼养殖区水体中 BHCs、DDTs 含量大小依次为: 茂名 > 广州 > 惠州 > 肇庆, 仍有新的 γ -HCH 输入。罗非鱼肌肉中残留 Cu、Pd、Cd、As 含量均值分别为 0.8056 、 0.4096 、 0.0706 、 $0.257 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, BHCs 和 DDTs 含量均值分别为 $12.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 采用美国国家环境保护署(EPA)推荐的评价模型对食用罗非鱼健康风险进行评价, 结果表明除 As 可能存在致癌风险外, Cu、Pd、Cd、HCHs 和 DDTs 的致癌和非致癌风险均低于国际放射性辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平, 表明罗非鱼肌肉中 HCHs、DDTs 和重金属对人体健康风险处于较低水平。

关键词: HCHs; DDTs; 重金属; 浓度分布; 罗非鱼; 健康风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4663-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.033

Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and *Tilapias* from Fish Ponds of Guangdong

XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, MA Li-sha

(Laboratory of Seafood Quality and Security Evaluation of Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fishery Resource Application and Cultivation of Ministry of Agriculture, Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China)

Abstract: Concentrations of copper, lead, cadmium, arsenic, hexachlorocyclohexane (HCHs) and dichlorodiphenyltrichloroethane (DDTs) in the water and the fish samples collected separately from fish pond, markets and supermarkets in four cities of Guangdong Province were measured by using GC-ECD, flame atomic absorption spectrometry and atomic fluorescence spectrometry. Health risk assessments associated with Cu, Pd, Cd, As, HCHs and DDTs were conducted based on the model of health risk assessment recommended by the US EPA. The results showed that the concentration ranges of Cu, Pd, Cd, As, HCHs and DDTs in water samples were $\text{nd} \sim 0.101 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{nd} \sim 0.097 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{nd} \sim 0.00327 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.0121 \sim 0.08127 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.63 \sim 37.18 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $2.05 \sim 12.21 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The health risk assessment indicates that the carcinogenic and non-carcinogenic risks of Cu, Pd, Cd, HCHs and DDTs in *Tilapias* both lower than the highest acceptable level of risk set by ICRP, but As cancer risk value slightly exceeded the upper limit of the acceptable risk levels in city population.

Key words: HCHs; DDTs; heavy metals; concentrations; *Tilapias*; health risk

有机氯农药和重金属元素为水环境中典型的污染物,其性质稳定能在水环境中持久存在,具生物累积性,可通过食物链向养殖水产品中蓄积,同时进入肌体后能损害人体肝、肾等内脏器官,产生潜在的致癌、致畸、致突变等作用^[1~3],已引起人们高度关注。目前,铅、镉、铜、砷、汞、HCHs 和 DDTs 已列入我国 68 种环境优先控制污染物黑名单^[4], HCHs 和 DDTs 做为典型持久性有机污染物也同时被列入了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》首批控制的 12 种化合物^[4]。近年来随着广东工

业和城市化加速,工业和生活污水大量排放直接或间接导致养殖环境日趋恶化。研究显示重金属、HCHs 和 DDTs 在广东主要河流及部分水产品中仍存在一定污染,为广东主要水域主要污染物^[5~12]。广东省地处亚热带,雨量充沛,水资源丰富,是我国

收稿日期: 2014-04-22; 修订日期: 2014-07-11

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务费专项(2012A0303); 广东省省级财政专项

作者简介: 谢文平(1971~),男,硕士,副研究员,主要研究方向为环境毒理, E-mail: xwp7118@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhuxinping_1964@163.com

水产品主要产区, 由于人们在前期对典型化学污染物的研究工作更多集中在河流等自然水域污染, 在养殖环境及水产品食用安全方面研究相对欠缺, 随着人们对水产品质量安全及养殖环境关注度的提高, 开展相关研究具有现实意义. 罗非鱼 (*Tilapia*) 是我国南方主要养殖水产品, 其主要特点为肉质鲜美, 少刺, 蛋白质含量高, 深受消费者喜爱, 广东省是我国罗非鱼最大的养殖和出口大省, 年产量约为 60 万 t, 占全国产量的 45%, 选用罗非鱼主要养殖区具有较强的地域代表性.

本研究针对广东省罗非鱼主要养殖区域水体及罗非鱼体中六六六、滴滴涕和重金属污染现状调查, 采用美国环境保护 (USEPA) 评价模式对罗非鱼食用安全进行健康风险评价^[13~15], 了解广东罗非鱼主要养殖区域环境和水产品有机氯和重金属污染状况, 以为居民水产品食用安全提供可靠的依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样时间为 2013 年 5 月和 2013 年 12 月, 罗非

鱼样品采集于广州、肇庆、惠州和茂名 4 市, 具体位置见图 1. 水样共设 12 个采样点具体位置如表 1, 采集鱼塘表层水样 (水面下 0.5 m), 六六六和滴滴涕检测样品, 每个采样点采集 2 L 水样, 样品运回实验室后于 4℃ 保存, 重金属检测样品每个采样点采集水样 1 L 加硝酸固定后带回实验室分析; 罗非鱼样品采集成鱼, 体重 1 ~ 2 kg, 每个采样点采集 3 尾, 分别采集于养殖鱼塘, 农贸市场和超市, 共计 24 份样品, 带回实验室于 -20℃ 保存.



图 1 采样区域示意

Fig. 1 Sampling area in Guangdong province

表 1 主要养殖鱼塘采样点分布

Table 1 Location of sampling sites of freshwater fish pond in Guangdong province

广州		肇庆		惠州		茂名	
编号及采样点	经纬度	编号及采样点	经纬度	编号及采样点	经纬度	编号及采样点	经纬度
G2 番禺万顷沙	N22°43. 347 E113°32. 334	Z1 肇庆四会	N23°40. 300 E112°36. 744	H1 惠州汝湖	N23°11. 058 E114°26. 378	M1 茂名红丰	N21°40. 908 E110°42. 004
G3 番禺 15 涌	N22°37. 917 E113°37. 079	Z2 肇庆四会铁场	N23°22. 225 E112°39. 108	H2 惠州小金	N23°11. 168 E114°22. 949	M2 茂名茂南区	N21°37. 421 E110°41. 586
G4 番禺 16 涌	N22°38. 607 E113°36. 411	Z3 肇庆高要	N23°56. 507 E112°37. 385	H3 惠州平潭	N23°03. 815 E114°35. 309	M3 茂名茂南区	N21°41. 921 E110°48. 224

1.2 实验仪器及试剂

仪器: 旋转蒸发仪 (德国 Heidolph 公司), 索氏抽提器 (天津天玻玻璃仪器有限公司), Agilent 6890 气相色谱仪, 原子吸收分光光度计 AAS (澳大利亚 GBC 公司), 双道原子荧光光度计 AFS-930 (北京吉天仪器有限公司).

试剂: 正己烷、丙酮和二氯甲烷为分析纯、无水硫酸钠、硝酸、硫酸及高氯酸均为分析纯, 购于广州化学试剂厂. 正己烷、丙酮和二氯甲烷实验前全玻璃系统重蒸馏, 并检验无干扰峰, 无水硫酸钠在 450℃ 马弗炉干燥 12 h, 冷却待用. 标准品购于国家标准物质研究中心.

1.3 样品处理

水样: 六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 检测, 取

1 L 水样过 0.7 μm 玻璃纤维滤膜, 滤液以固相萃取法进行富集 (过 SPE 小柱: Supelclean™ ENVITM-18, 3 mL), 乙酸乙酯洗脱, 高纯氮气吹干, 正己烷定容至 0.5 mL, 待 GC-ECD 分析; 重金属检测, 取水样 1 000 mL, 浓缩 10 倍后, 经消解, 定容 25 mL, 采用火焰及石墨炉原子吸收分光光度法测定水样中 Cu、Pb 和 Cd 的含量, 原子荧光法测砷的含量, 具体方法参照文献 [15].

生物样: 六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 检测, 样品经 -20℃ 冷冻干燥后, 称取 10 g 样品, 与 10 g 无水硫酸钠混合后用滤纸 (经二氯甲烷抽提) 包好, 置于索氏提取器中, 加入 80 mL 丙酮和二氯甲烷混合液 (体积比为 1:2), 在 60℃ 水浴中抽提 48 h. 提取液经浓硫酸灼烧后, 用旋转蒸发仪浓缩至 5 mL.

经正己烷溶剂置换后的浓缩液过氧化铝(3 cm)和硫酸硅胶(10 cm)的层析柱,用二氯甲烷和正己烷(体积比为 2:3)的混合液冲洗,淋洗旋转蒸发浓缩至 0.5 mL 左右,用高纯氮气吹干,正己烷定容至 0.5 mL,待 GC 分析检测;重金属检测,分取 10 g 罗非鱼背部肌肉,Cu、Pb 和 Cd 测试采用 HNO₃-H₂SO₄-H₂O₂-HClO₄湿法消解,砷的含量测试采用 HNO₃-H₂SO₄-HClO₄ 湿法消解。

1.4 样品分析

HCHs 和 DDTs 采用 Agilent 6890 气相色谱仪进行分析,仪器的配置与使用条件为:⁶³Ni 的电子捕获检测器(ECD),色谱柱型号 Agilent DB-1701,长 30 m、内径 0.32 mm、固定相膜厚 0.25 mm,柱前压 50 kPa,载气为高纯氮气,流速 2 mL·min⁻¹.柱升温程序为 100℃,保持 1 min,以 15℃·min⁻¹程序升温至 230℃,气化室和检测器温度分别为 260℃和 300℃.采用原子吸收分光光度计火焰及石墨炉法测定样品中 Cu、Pb 和 Cd 的含量,采用原子荧光法测砷的含量。

1.5 质量控制

HCHs 和 DDTs 利用混合标样对样品各峰进行外标定性、定量,分析过程中同时进行方法空白、基质加标和样品重复检测控制.在水样中 HCHs 和 DDTs 的回收率为 73.3%~97.5%,HCHs 检出限为 0.150~0.70 μg·L⁻¹,DDTs 检出限为 0.93~9.20 μg·L⁻¹.生物样回收率控制在 80%~110%间,HCHs 检出限为 0.015~0.070 ng·g⁻¹,HCHs 检出限为 0.093~0.92 ng·g⁻¹.

重金属标准物回收率在 95%~120%之间.仪器最低检出限 Cu、As、Cd、Pb 分别为 83.60、4.04、5.44、13.21 μg·L⁻¹.

1.6 数据分析

采用统计软件 Origin 6.0 进行相关的数据分析及统计。

2 健康风险评价方法

2.1 美国(USEPA)健康风险评价方法

2.1.1 Hg、Cu 和 Pb 非致癌物所致风险模型

$$R_{ig}^n = \frac{D_{ig} \times 10^{-6}}{RfD_{ig} / \text{安全因子} \times 70}$$

(1)

表 2 致癌强度系数和危害剂量参考值

Table 2 Carcinogenic risk index and reference harm dosage of HCHs and DDTs							
农药名称	α-HCH	β-HCH	γ-HCH	p,p'-DDE	o,p'-DDT	p,p'-DDD	p,p'-DDT
CSF × 10 ⁻⁶ /d ⁻¹	6.3	1.8	1.3	0.34		0.24	0.34
RHD × 10 ⁻⁹ /d ⁻¹	8	0.5	0.5	0.5			

$$D_{ig} = \text{日平均水产品摄入量} \times c_i / 60$$

(2)

式中, R_{ig}^n 为非致癌物*i*经食入途径所致健康危险的个人平均年风险(a⁻¹), D_{ig} 为通过饮食途径暴露的日最大暴露剂量[mg·(kg·d)⁻¹], RfD_{ig} 为非致癌污染物*i*的食入途径参考剂量[mg·(kg·d)⁻¹],本研究中非致癌物 Pb、Cu 的 RfD_{ig} 分别为 0.014 mg·(kg·d)⁻¹、0.005 mg·(kg·d)⁻¹,安全因子取值为 10,70 为人均寿命,a;日平均水产品摄入量采用广东省居民膳食结构,城市平均水产品摄入量为 70.8 g·(人·d)⁻¹,农村 39.0 g·(人·d)⁻¹[17],60 为人均体重,kg.

2.1.2 Cd 和 As 致癌物所致健康危害的风险模型

$$R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig} \times q_{ig})] / 70$$

(3)

式中, R_{ig}^c 为化学致癌物*i*经食入途径产生的平均个人致癌年风险(a⁻¹); D_{ig} 为化学致癌*i*经食入途径的单位体质量日最大暴露剂量[mg·(kg·d)⁻¹]; q_{ig} 为化学致癌物*i*经食入途径致癌强度系数[mg·(kg·d)⁻¹],根据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)通过全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,Cd 和 As 的致癌强度系数 q_{ig} 值为 6.1 mg·(kg·d)⁻¹和 15 mg·(kg·d)⁻¹;70 为人类平均寿命(a).通过饮食途径暴露的日最大暴露剂量(D_{ig})参照式(2)计算。

2.1.3 HCHs 和 DDTs 致癌物所致健康危害的风险模型

根据可疑致癌化学物的致癌强度系数 CSF(表 2),水产品每天每千克体重日均消费量 CW(d⁻¹),估算某农药的致癌风险系数[18] CRI:

$$CRI = c_i \times CW \times CSF$$

(4)

当 CRI ≤ 10⁻⁴,作为可接受的致癌风险,即是安全的。

根据化学物质的危害剂量参考值 RHD(表 2),计算接触风险指数:

$$ERI = c_i \times CW / RHD$$

当人体对某种可疑致癌化学物的接触量不超过危害剂量参考值 ERI ≤ 1,认为接触风险可以接受[17]。

2.2 每日最大耐受摄入量 (PMTDI) 健康风险评估方法^[12]

$$MDI = c_i \times M_i \quad (5)$$

式中, MDI 为理论最大摄入量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_i 为罗非鱼肌肉中的重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); M_i 为罗非鱼平均摄入量 [$\text{g} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$], JECFA 提出铜、铅、镉的暂定 PMTDI (以 BW 计) 分别为 0.05 ~ 0.50、0.004、0.001 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 人体重量以 60 kg 计算^[19]. 当 MDI/BW 小于 JECFA 提出的 PMTDI 时, 得出此重金属对人体不存在健康风险; 反之, 得出此重金

属对人体存在健康风险.

3 结果与分析

3.1 广东主要养殖鱼塘表层水体中 HCHs、DDTs 和重金属含量与分析

表 3 列出了鱼塘中表层水 HCHs、DDTs 和部分重金属含量, 结果显示, HCHs 总量检出范围为 2.634 ~ 37.182 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 20.39 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, DDTs 总量检出范围为 2.05 ~ 12.21 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 5.59 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 4 个城市罗非鱼养殖区含量排列顺

表 3 广东省罗非鱼养殖鱼塘水中 HCHs、DDTs 和重金属的量

Table 3 Concentrations of HCHs, DDTs and heavy metals in water of fish pond (*Tilapia*) in Guangdong Province

编号	HCHs、DDTs/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$										重金属/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	δ -HCH	$\sum$ BHCs	p,p' -DDE	o,p' -DDT	p,p' -DDD	p,p' -DDT	$\sum$ DDTs	Cu	Pb	Cd	As
Z1	0.25	0.36	0.90	1.13	2.63	nd	nd	4.03	0.54	4.56	0.011	0.056	0.003 2	0.038 3
Z2	1.41	0.48	7.19	0.61	9.69	0.53	1.02	2.30	3.50	7.34	0.019	0.020	nd	0.013 3
Z3	0.85	0.85	1.99	0.83	4.51	nd	nd	2.62	0.61	3.23	0.023	0.097	nd	0.071 5
H1	0.38	5.42	12.14	1.01	18.94	0.37	nd	1.84	1.15	3.35	0.004	0.019	nd	0.012 1
H2	nd	8.60	5.52	3.65	17.77	2.46	1.19	1.57	0.73	5.94	0.011	nd	nd	0.048 7
H3	0.76	3.44	3.21	1.99	9.39	0.35	nd	2.56	1.22	4.12	nd	nd	nd	0.049 2
M1	32.68	nd	54.20	1.68	88.55	nd	1.87	3.82	1.97	7.69	0.011	0.029	nd	0.011 9
M2	0.59	1.05	11.68	1.07	14.38	0.31	nd	4.12	0.81	5.23	0.019	0.027	nd	0.013 6
M3	1.15	0.23	0.73	1.47	3.57	nd	nd	2.93	0.52	3.45	0.023	nd	nd	0.046 5
G2	0.17	0.94	2.31	1.20	4.613	nd	nd	1.82	0.23	2.05	0.006	0.012	0.0002	0.011 2
G3	0.72	0.39	35.65	0.43	37.18	0.45	1.17	8.71	1.88	12.21	0.040	0.040	0.000 2	0.060 0
G4	0.77	1.60	30.30	0.80	33.46	0.83	0.81	3.32	2.93	7.89	0.101	nd	0.000 1	0.081 2
平均值	3.61	2.12	13.82	1.32	20.39	0.67	1.21	3.30	1.34	5.59	0.024	0.038	0.000 9	0.038 1

序为, 茂名 > 广州 > 惠州 > 肇庆, 与国内主要水体比较, 高于贵州百花湖水体与北京官厅水库接近^[20~22], 低于国内黄浦江、九龙江及苏州河水体含量^[23~25]. 养殖水体中重金属, Cu 含量范围为 nd ~ 0.040 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.024 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Pb 含量范围为 nd ~ 0.097 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.038 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cd 含量范围为 nd ~ 0.003 2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.000 9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, As 含量范围为 0.011 2 ~ 0.081 2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.038 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均达到地表水环境质量标准^[26] (GB 3838-2002) 第三类水质要求.

HCHs 和 DDTs 组成特征可用于评价污染物输入的种类, 残留输入的方式, 主要依据是 HCHs 和 DDTs 生产和使用的种类不同. HCHs 曾以两种形态被使用, 一种工业品 HCHs, 含有 4 种形态的 BHCs, 其含量分别为 α -HCH (65% ~ 70%)、 γ -HCH (12% ~ 14%)、 δ -HCH (6%)、 β -HCH (5% ~ 6%)^[27]. 另一种俗称林丹, γ -HCH 含量高达 99% 以上, 因此环境样品中 BHCs 残留输入状况通常以 α/γ 比值作为评价, 样品中 HCH 的 α/γ 比值在 4 ~ 7 之间, 则说

明源于工业品, 若比值接近于 1, 则说明环境中 γ -HCH 的使用. 同样工业用品 DDT 由大于 70% 的 p,p' -DDT 和大约 15% 的 o,p' -DDT 组成, o,p' -DDT 较 p,p' -DDT 更易降解, DDT 被禁用后, 现在生产的 DDT 主要是作为生产三氯杀螨醇的中间体存在^[28], 在三氯杀螨醇中, o,p' -DDT 的含量高于 p,p' -DDT 的含量, 另外 DDTs 在不同的自然环境中可降解为不同的产物, DDT 在有氧条件下转化为 p,p' -DDE, 而在厌氧条件下降解为 p,p' -DDD, 如果没有新的 DDT 的输入, 则 DDT 的相对含量就会不断降低, 而相应的产物含量会不断地升高, 因此可通过 DDT/(DDD + DDE) 和 DDD/DDE 的比值, 来示踪 DDT 农药的降解环境和降解程度, 并用于判断是否有新的 DDT 农药输入^[29, 30].

对罗非鱼养殖区 γ -HCH 占 HCHs 比例及 α/γ -HCH 比值研究显示, γ -HCH 比例为 34.18% ~ 95.88%, α/γ 为 0.031 ~ 1.58, 说明养殖水体中仍有 γ -HCH 的输入, 目前林丹做为林业杀虫剂仍在部分地区使用, 不排除污水流入鱼塘可能; DDT/(DDD

+ DDE) 比值均值为 0.49, o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值均值为 0.31, 可判断广东罗非养殖区总体上未有新的 DDT 输入源, 但个别采样点如四会和惠州小金口 DDT/(DDD + DDE), o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值大于 1, 说明可能曾使用过非工业生产 DDT 类化合物如(三氯杀螨醇杀虫剂)等。

3.2 鱼体肌肉中 BHCs, DDTs 和重金属残留健康风险评价

广东省主要罗非鱼养殖区罗非鱼肌肉中 HCHs 含量范围见图 2, 以干重计为 3.35 ~ 23.43

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $12.21\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, DDTs 见图 3, 含量范围为 $4.01\sim33.75\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $13.21\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 按罗非鱼体内含 70% ~ 80% 水分计^[31], 干重转化为湿重后残留含量低于海洋生物质量标准(GB 18421-2001)及澳大利亚食品卫生标准限定值(表 4)^[32~34]. 重金属含量见图 4, 罗非鱼样品中 Cd、Cu、As 和 Pb 均值为 0.070 6、0.805 6、0.257 和 0.409 6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 参考国家食品标准中鱼类相关限量指标^[35] GB 2762-2005, 未超标准值。

表 4 部分国家水产品中 HCHs 和 DDTs 残留限量

Table 4 Secure limitation of HCHs and DDTs to aquatic product in different countries	
污染物	最高限量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
$\sum\text{HCHs}$	2 000(中国, 瑞典), 300(法国), 500(德国)
$\sum\text{DDTs}$	1 000(中国), 200(法国), 2 000 ~ 5 000(瑞典, 美国, 加拿大, 德国, 丹麦, 卢森堡)
$\alpha\text{-HCH}/\beta\text{-HCH}/\gamma\text{-HCH}$	均为 10(澳大利亚)
$p,p'\text{-DDE}/o,p'\text{-DDT}/p,p'\text{-DDD}/p,p'\text{-DDT}$	均为 1 000(澳大利亚)

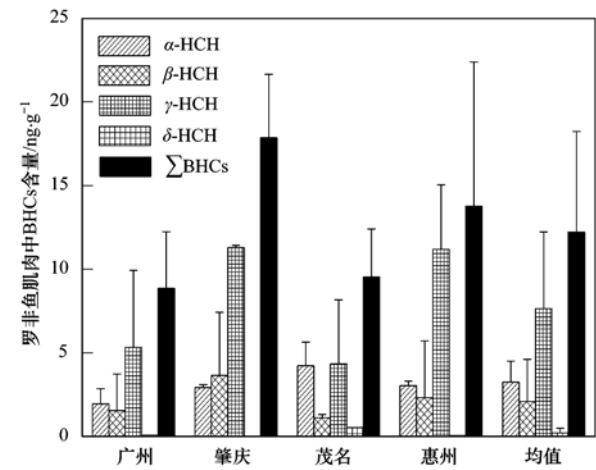


图 2 罗非鱼肌肉中 HCHs 含量分析
Fig. 2 Content analysis of BHCs in *Tilapia*s

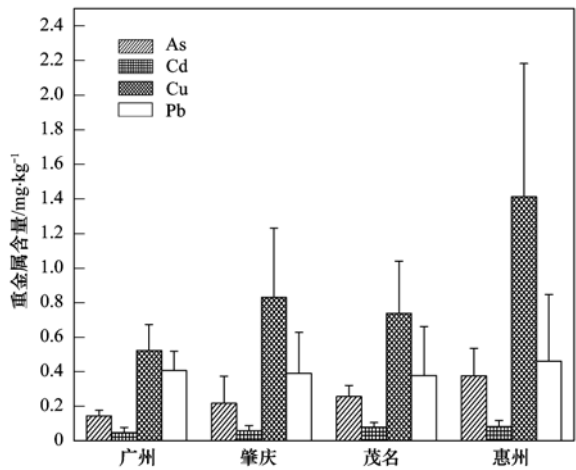


图 4 罗非鱼肌肉重金属元素含量分析
Fig. 4 Contents analysis of heavy metals in *Tilapia*s

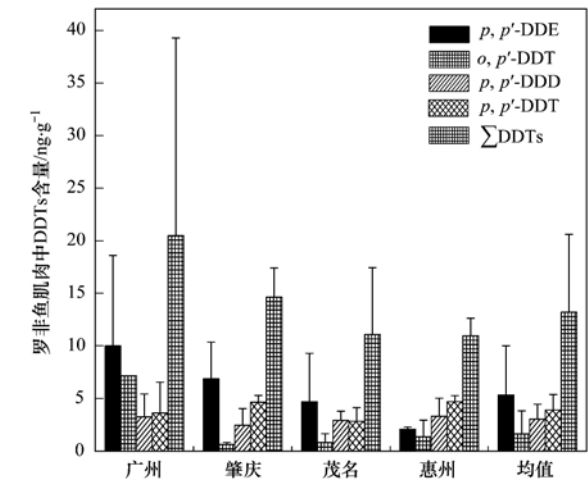


图 3 罗非鱼肌肉中 DDTs 含量分析
Fig. 3 Content analysis of DDTs in *Tilapia*s

3.3 罗非鱼肌肉中 HCHs、DDTs 和重金属残留食用安全健康风险评估

采用 USEPA 健康风险评估模型对罗非鱼肌肉中 HCHs、DDTs 残留经食用引起健康风险评估. 由图 5 可见, 广东罗非鱼样品中 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 p,p' -DDE、 o,p' -DDT、 p,p' -DDD 和 p,p' -DDT 的致癌风险指数(CRI)变化范围在 $0.09\times10^{-6}\sim6.28\times10^{-6}$ 之间, 6 种有机氯农药 CRI 总值, 城市人口为 $6.48\times10^{-6}\sim1.61\times10^{-5}$, 农村人口为 $3.57\times10^{-6}\sim5.84\times10^{-6}$, 均低于 10^{-4} , 显示致癌风险可接受。

广东罗非鱼接触风险指数 ERI 见图 6, 可见 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 p,p' -DDE 的 ERI 变化范围

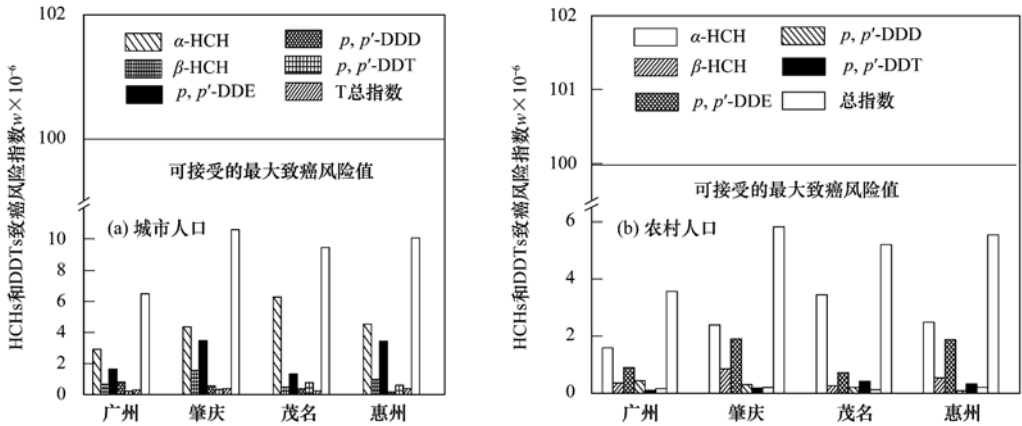


图5 广东省罗非鱼 BHCs 和 DDTs 致癌风险指数

Fig. 5 Carcinogenic risk indexes of BHCs,DDTs in Guangdong *Tilapias*

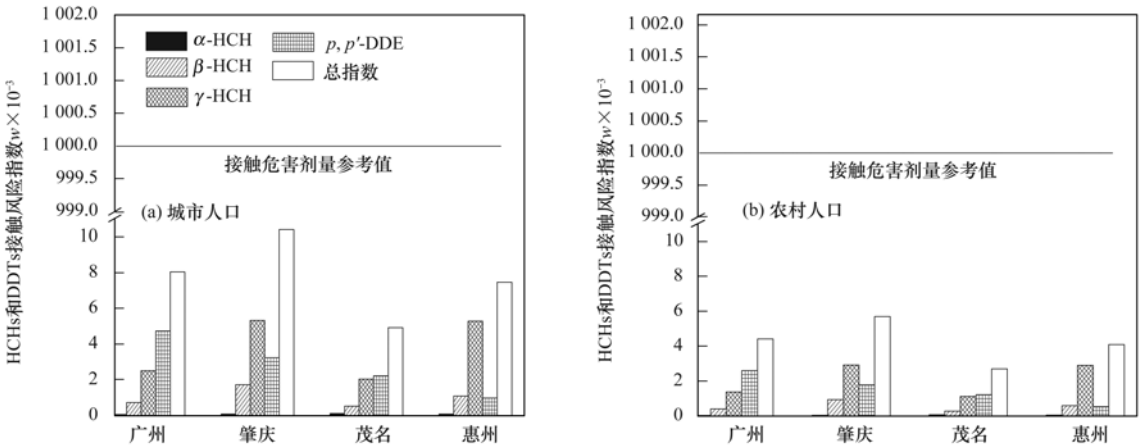


图6 广东省罗非鱼 HCHs 和 DDTs 接触风险指数

Fig. 6 Exposure risk indexes of BHCs,DDTs to Guangdong *Tilapias*

为 $0.031 \times 10^{-3} \sim 10.38 \times 10^{-3}$, ERI 总值变化范围为 $2.71 \times 10^{-3} \sim 10.38 \times 10^{-3}$, 均小于 1. 因此, 人们食用广东罗非鱼对 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 p,p' -DDE 接触剂量远低于危害剂量参考值, 即认为接触风险可接受.

采用 USEPA 健康风险评价模型对广东罗非鱼肌肉中重金属残留食用安全健康风险进行评估(表 5), Cd 个人致癌年风险水平城市人口为 $6.01 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 农村人口为 $0.92 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 低于 ICRP 推荐饮食途径最大可接受年风险水平 ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 对人体不存在致癌风险. As 致癌个人年风险, 城市人口为 $5.40 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 农村人口为 $2.97 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 城市人口通过食用罗非鱼 As 个人致癌年风险接近 ICRP 推荐饮食途径最大可接受年风险水平, 存在一定致癌风险. 非致癌健康风险评估, 通过食用罗非鱼 Cu 和 Pb 非致癌健康风险均远低于 5×10^{-5} 标准值, 对健康未造成风险. 采用世界卫生组织

织食品添加剂合作专家委员会(JECFA)健康风险评价模型分析(表 6), 所测重金属元素 MDI/BW 值均低于 JECFA 提出的每日最大摄入量标准值, 人们食用罗非鱼无摄入风险.

4 结论

(1) 12 个养殖鱼塘表层水中 HCHs 检出范围为 $2.634 \sim 37.182 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $20.39 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, DDTs 检出范围为 $2.05 \sim 12.21 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $5.59 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 与国内水主要水体比较, 低于主要河流污染水平. 主要罗非鱼养殖区水体中 HCHs、DDTs 含量排列顺序为; 茂名 > 广州 > 惠州 > 肇庆. 通过对罗非鱼养殖区 γ -HCH 所占比例、 α/γ -HCH 比值研究显示, γ -HCH 比例为 $34.18\% \sim 95.88\%$, 说明广东罗非鱼养殖区仍有新的 γ -HCH 输入, 不排除林丹做为杀虫剂使用可能, DDT 除个别采样点外, 未有新的输入源.

表 5 罗非鱼肌肉中重金属的健康风险评价(USEPA)/a⁻¹

Table 5 Health risk assessment of heavy metals in Guangdong *Tilapias* (USEPA)/a⁻¹

人群	采样点	As	Cd	Cu	Pb	ICRP 推荐的通过饮食途径 最大可接受年风险水平
城市居民	广州	3.65×10^{-5}	4.98×10^{-6}	1.77×10^{-7}	4.90×10^{-8}	5×10^{-5}
	肇庆	5.51×10^{-5}	6.23×10^{-6}	2.80×10^{-7}	4.71×10^{-8}	
	茂名	6.49×10^{-5}	8.24×10^{-6}	2.49×10^{-7}	4.57×10^{-8}	
	惠州	9.50×10^{-5}	8.61×10^{-6}	4.77×10^{-7}	5.56×10^{-8}	
	均值	6.29×10^{-5}	7.02×10^{-6}	2.96×10^{-7}	4.94×10^{-8}	
农村居民	广州	2.01×10^{-5}	2.74×10^{-6}	0.98×10^{-7}	2.70×10^{-8}	
	肇庆	3.04×10^{-5}	3.43×10^{-6}	1.54×10^{-7}	2.59×10^{-8}	
	茂名	3.58×10^{-5}	4.54×10^{-6}	1.37×10^{-7}	2.52×10^{-8}	
	惠州	5.23×10^{-5}	4.74×10^{-6}	2.63×10^{-7}	3.06×10^{-8}	
	均值	3.46×10^{-5}	3.86×10^{-6}	1.63×10^{-7}	2.72×10^{-8}	

表 6 罗非鱼的重金属的 I 健康风险评价(PMTDI)/g·kg⁻¹

Table 6 Health risk assessment of heavy metals in Guangdong *Tilapias* (PMTDI)/g·kg⁻¹

人群	采样点	As	Cd	Cu	Pb
城市居民	广州	0.170 ± 0.389	0.057 ± 0.036	0.617 ± 0.177	0.480 ± 0.132
	肇庆	0.258 ± 0.184	0.0713 ± 0.034	0.980 ± 0.473	0.461 ± 0.279
	茂名	0.303 ± 0.075	0.0945 ± 0.031	0.871 ± 0.357	0.448 ± 0.332
	惠州	0.444 ± 0.187	0.987 ± 0.042	1.668 ± 0.908	0.545 ± 0.454
	均值	0.029 ± 0.121	0.080 ± 0.037	0.479 ± 0.340	0.299 ± 0.264
农村居民	广州	0.094 ± 0.021	0.031 ± 0.020	0.340 ± 0.098	0.264 ± 0.073
	肇庆	0.142 ± 0.102	0.029 ± 0.0187	0.540 ± 0.260	0.254 ± 0.154
	茂名	0.167 ± 0.041	0.0520 ± 0.017	0.480 ± 0.196	0.247 ± 0.183
	惠州	0.245 ± 0.103	0.054 ± 0.023	0.919 ± 0.500	0.300 ± 0.250
	均值	0.162 ± 0.067	0.044 ± 0.020	0.570 ± 0.264	0.266 ± 0.165
暂定的每日最大耐受摄入量/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$		2.1	1.0	50 ~ 500	3.5

(2) 广东省主要罗非养殖区罗非鱼样品中 HCHs、DDTs 和重金属(Cd、Cu、As、Pb)的残留量未超海洋生物质量标准(GB 18421-2001), 国家食品标准中鱼类相关限量指标 GB 2762-2005 及澳大利亚食品卫生标准限定值, 总体上处于安全值范围内。

(3) 采用美国国家环境保护署(EPA)推荐的评价模型对食用罗非鱼途径引起健康风险评价结果表明, α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 p,p' -DDE、 o,p' -DDT、 p,p' -DDD 和 p,p' -DDT 的致癌风险指数变化范围在 $0.09 \times 10^{-6} \sim 6.28 \times 10^{-6}$ 之间, 低于 10^{-4} , 显示为可接受的致癌风险, α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 p,p' -DDE、的接触风险指数(ERI), 变化范围为 $0.031 \times 10^{-3} \sim 10.38 \times 10^{-3}$, 低于危害剂量参考值, 为可接受的接触风险; 食用罗非鱼 Cd、Cu、Pd、As 残留健康风险评价, 除 As 可能存在一定致癌风险外, Cd、Cu、Pd 的致癌和非致癌风险均低于国际放射性辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平, 不存在健康风险。

参考文献:

[1] 余刚, 黄俊, 张彭义. 持久性有机污染物: 倍受关注的全球

性环境问题[J]. 环境保护, 2001, (4): 37-39.

[2] Luckey T D, Venugopal B. Metal toxicity in mammals [M]. New York: Plenum Press, 1977.

[3] 张东杰. 重金属危害与食品安全[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011.

[4] 宋乾武, 代晋国. 水环境优先控制污染物及应急工程技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[5] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲河流及南海近海区域表层沉积物中有机氯农药含量及分布[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1272-1279.

[6] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲沉积物中毒害有机物的污染现状及评价[J]. 环境科学研究, 2001, 14(1): 19-23.

[7] 谢文平, 朱新平, 陈昆慈, 等. 珠江口水体、沉积物及水生动物中 HCHs 和 DDTs 的含量与生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1984-1994.

[8] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1917-1923.

[9] Xue N D, Wang H B, Xu X B. Progress in study on endocrine disrupting pesticides (EDPs) in aquatic environment [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20): 2257-2266.

[10] Fu J M, Mai B X, Sheng G Y, et al. Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China; an

- overview[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(9): 1411-1422.
- [11] Meng X Z, Zeng E Y, Yu L P, *et al.* Persistent halogenated hydrocarbons in consumer fish of China: Regional and global implications for human exposure [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(6): 1821-1827.
- [12] Guo J Y, Zeng E Y, Wu F C, *et al.* Organochlorine pesticides in seafood products from southern China and health risk assessment [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, **26**(6): 1109-1115.
- [13] 葛奇伟, 徐永健, 葛君远. 象山港养殖区缢蛏和泥蚶的 Cu、Cd、Pb 含量及其健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(8): 2042-2048.
- [14] 李秀珠. 福建三都湾渔业环境和养殖生物体总汞含量及人体暴露健康风险评价[J]. *中国水产科学*, 2008, **15**(6): 961-969.
- [15] 滕丽华. 宁波市饮用水中重金属铁锌铜健康风险度评价[J]. *广东微量元素科学*, 2007, **14**(6): 33-36.
- [16] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 马文军, 邓峰, 许燕君, 等. 广东省居民膳食营养状况研究[J]. *华南预防医学*, 2005, **31**(1): 1-5.
- [18] Watanabe W H, Desimone F K, Thiyagarajah A, *et al.* Fish tissue quality in the lower Mississippi River and health risks from fish consumption [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **302**(1-3): 109-126.
- [19] Jiang Q T, Lee T K, Chen K, *et al.* Human health risk assessment of organochlorines associated with fish consumption in a coastal city in China [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(1): 155-165.
- [20] 郑江, 王灵, 刘宁, 等. 乌鲁木齐地表水饮用水源地水体有机氯农药健康风险评价[J]. *环境检测管理与技术*, 2010, **22**(5): 26-30.
- [21] 万译文, 康天放, 周忠亮, 等. 北京官厅水库有机氯农药分布特征及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(4): 803-807.
- [22] 沈烨冰, 张勇, 李存雄, 等. 贵州百花湖水体中有机氯农药的残留及健康风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, **29**(3): 311-315.
- [23] 张祖麟, 陈伟琪, 哈里德, 等. 九龙江口水体中有机氯农药分布特征及归宿[J]. *环境科学*, 2001, **22**(3): 88-92.
- [24] 夏凡, 胡雄星, 韩中豪, 等. 黄浦江表层水体中有机氯农药的分布特征[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(2): 11-15.
- [25] 胡雄星, 夏德祥, 韩中豪, 等. 苏州河水及沉积物中有机氯农药的分布与归宿[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(1): 124-128.
- [26] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [27] Lee K T, Tanabe S, Koh C H. Distribution of organochlorine pesticides in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea [J]. *Environment Pollution*, 2001, **114**(2): 207-213.
- [28] Shen L, Wana F. Compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for organochlorine pesticides [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2005, **50**(3): 743-768.
- [29] 袁旭音, 王禹, 陈骏, 等. 太湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2003, **24**(1): 121-125.
- [30] Hitch R K, Day H P. Unusual persistence of DDT in some western USA soils [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1992, **48**(2): 295-246.
- [31] 雷思佳, 叶世洲, 李德尚, 等. 台湾红罗非鱼幼鱼水分含量与脂肪蛋白质含量及比能值之间关系的研究[J]. *华中农业大学学报*, 1999, **18**(4): 367-370.
- [32] GB18406. 4-2001, 农产品质量安全 无公害水产品安全要求[S].
- [33] 王初升, 许章程, 郑金树, 等. 研究海洋环境质量生物标准的意义及其内容[J]. *海洋环境科学*, 1999, **18**(3): 22-27.
- [34] Mansingh A, Wilson A. Insecticide contamination of Jamaican environment III. Baseline studies on the status of insecticidal pollution of Kingston Harbour [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, **30**(10): 640-645.
- [35] GB 2762-2005, 食品中污染物限量[S].

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人