

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序 ..... 郝郑平(477)

我国机动车排放VOCs及其大气环境影响 ..... 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)

基于PMF量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 ..... 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 ..... 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)

某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种 ..... 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季VOCs污染特征及来源解析 ..... 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)

某典型石油化工园区冬季大气中VOCs污染特征 ..... 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)

杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 ..... 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)

秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 ..... 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)

浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)

汽车制造企业恶臭来源及影响分析 ..... 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)

典型酿造业厂界无组织排放VOCs污染特征与风险评价 ..... 高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)

成都市大气环境VOCs污染特征及其健康风险评价 ..... 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)

上海地区住宅儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 ..... 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)

江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 ..... 夏思佳,刘倩,赵秋月(592)

江门市人为源挥发性有机物排放清单 ..... 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)

长江三角洲2014年天然源BVOCs排放、组成及时空分布 ..... 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)

北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单 ..... 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)

公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及VOCs成分谱 ..... 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)

生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 ..... 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)

低温等离子体-生物耦合系统对复合CVOCs的降解 ..... 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)

水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 ..... 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 ..... 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)

不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价 ..... 佟瑞鹏,张磊(663)

家具制造过程中VOCs的来源分析及环境健康风险评价 ..... 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告

北京市PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与PM<sub>10</sub>关系的时空变异特征 ..... 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)

小型池塘水-气界面CH<sub>4</sub>冒泡通量的观测 ..... 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)

中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 ..... 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)

铁岭市河流氮素时空分布及源解析 ..... 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)

基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征 ..... 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 ..... 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 ..... 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)

广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 ..... 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)

内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 ..... 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周徽(758)

河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 ..... 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 ..... 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)

城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 ..... 梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)

三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 ..... 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 ..... 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)

硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 ..... 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)

活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(II)的去除性能 ..... 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)

三维网状HZO@SGH对水中氟离子的吸附作用和机制 ..... 马福臻,周少奇,刘泽璐,支亮亮,周璇(828)

MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制 ..... 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)

污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性 ..... 侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)

染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 ..... 孟晓荣,王隽,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)

污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 ..... 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)

间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 ..... 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)

好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 ..... 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)

处理垃圾渗滤液的SBR中微生物种群与污泥比阻 ..... 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)

基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 ..... 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 ..... 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)

开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 ..... 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 ..... 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)

上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 ..... 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)

四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 ..... 迟菽琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)

硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积阻控 ..... 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)

电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 ..... 严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799,908,934)

# 上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价

孟媛, 刘翠翠, 仇雁翎\*, 周轶慧, 朱志良

(同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 中国作为农药的生产和使用大国, 曾大量使用滴滴涕 (DDTs)、六六六 (HCHs) 等有机氯农药. 水稻是上海市的主要粮食作物, 青浦和崇明区是其重要的水稻种植基地. 本研究检测了上海市青浦和崇明区稻米样品中 24 种有机氯农药的残留水平, 分析了 OCPs 的组成特征并对上海地区稻米中的 OCPs 残留进行了健康风险评价. 结果表明, 研究区稻米中 OCPs 以 DDTs 和 HCHs 为主要残留物. 青浦和崇明稻米中 24 种 OCPs 的总平均残留量分别为  $6.53 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $4.70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 低于食品安全国家标准中对应 OCPs 的再残留限值. 青浦区稻米中 4,4-DDE 和  $\beta$ -HCH 的残留水平最高, 崇明区稻米则以 2,4-DDT 和  $\beta$ -HCH 为主要成分. 来源解析显示, 上海市区域内近期可能仍有三氯杀螨醇和林丹的使用. 健康风险评价结果表明, 食用本研究区稻米因 OCPs 所产生的致癌与非致癌风险较低, 处于可接受水平.

**关键词:** 上海市; 有机氯农药; 稻米; 残留水平; 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(2018)02-0927-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201706080

## Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai

MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling\*, ZHOU Yi-hui, ZHU Zhi-liang

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment (Ministry of Education), College of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** As one of the main producers and consumers of pesticides in the world, China has historically used large quantities of organochlorine pesticides, such as DDT and HCH. Rice is a staple food crop in Shanghai, where the Qingpu and Chongming districts are two important rice planting areas. This study detected the residue levels of 24 organochlorine pesticides (OCPs) in rice samples collected from Qingpu and Chongming in Shanghai. The composition and health risk of OCPs in rice samples were investigated. The results revealed that DDTs and HCHs were the main OCPs in rice from the study area. The mean levels of 24 OCPs residues in rice from Qingpu and Chongming were  $6.53 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  and  $4.70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. The analyses of all the target compounds met the China National Food Safety Standard. The concentrations of 4,4-DDE and  $\beta$ -HCH were the highest in rice from Qingpu, while 2,4-DDT and  $\beta$ -HCH were the main components in rice from Chongming. Source analysis showed that dicofol and lindane might be still used recently in some areas of Shanghai. The health risk assessment results indicated that there was no obvious risk to human health by eating rice from Shanghai based on the OCPs studied.

**Key words:** Shanghai; organochlorine pesticides (OCPs); rice; residue levels; health risk

作为一种高效的杀虫剂和除草剂, 有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 曾在世界各地被广泛使用. 其理化性质稳定, 具有高毒性、高持久性和高累积性<sup>[1,2]</sup>, 是一种典型的持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs). 由于有机氯农药容易在生物和人体内积累, 造成各种急慢性毒性、内分泌干扰效应、三致效应 (致癌、致畸、致突变) 等危害<sup>[3,4]</sup>, 因此部分有机氯农药已被列入《POPs 公约》中的受控 POPs 名单, 并在世界各地逐渐禁用<sup>[5-7]</sup>. 中国作为农药的生产和使用大国, 曾大量使用滴滴涕 (DDTs)、六六六 (HCHs)、六氯苯 (HCB)、艾氏剂 (Aldrin)、狄氏剂 (Dieldrin)、七氯 (Heptachlor) 等有机氯农药. 据统计, 到 1983 年为

止我国 DDTs 和 HCHs 的累计生产量分别达到 40 万 t 和 490 万 t, 占世界总产量的 20% 和 33%<sup>[8,9]</sup>. 尽管中国自 1983 年起宣布停止 DDTs 和 HCHs 的生产, 然而在水体、土壤等各个环境介质中仍有一定的检出<sup>[10,11]</sup>.

稻米是支撑世界上近 60% 人口的粮食<sup>[12]</sup>, 稻米中的有机氯农药主要通过膳食进入人体从而影响人类健康<sup>[13]</sup>. 目前国内外研究多集中于稻米中重金属的污染状况及健康风险评价<sup>[14-17]</sup>, 而针对有机氯农药的研究相对较少. Mumtaz 等<sup>[18]</sup>检测了巴基斯坦旁遮普邦稻米中有机氯农药的残留水平并对

收稿日期: 2017-06-08; 修订日期: 2017-08-31

基金项目: 瑞中国际合作项目 (639-2013-6913)

作者简介: 孟媛 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境样品中 POPs 的监测分析与风险评价, E-mail: 1631199@tongji.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: yljqu@tongji.edu.cn

其进行健康风险评价,发现 DDTs 和 HCHs 是该区域稻米中最主要的有机氯农药,且食用当地稻米有一定的致癌风险. Chen 等<sup>[19]</sup>研究了江苏省 7 个城市中的稻米 OCPs 残留,检出的 DDTs、HCHs 残留量分别为 0 ~ 0.053 mg·kg<sup>-1</sup>、0 ~ 0.039 mg·kg<sup>-1</sup>,其他 OCPs 没有检出.

水稻是上海市的主要粮食作物,青浦和崇明区是其重要的水稻种植基地. 青浦区位于上海西南部,据 2016 年统计,青浦区水稻播种面积为 78 km<sup>2</sup>. 崇明岛位于长江入海口,是世界上最大的河口冲积岛,全岛地势平坦,土地肥沃,是上海市农产品重要的生产基地<sup>[20]</sup>.

本文以上海市青浦、崇明区的稻米为研究对象,分析了 24 种有机氯农药的残留水平及组成特征,并对研究区稻米的食用进行初步的健康风险评价,以期对有机氯农药的控制管理提供一定理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集

本研究于 2015 年 11 月在青浦区淀山湖附近设置 3 个采样单元共 15 个采样点,于 2016 年 10 月在崇明西北部和中西部设置 4 个采样单元共 20 个采样点(图 1). 实施采样时,每个采样单元在同一块稻田内,大小约 60 m × 150 m,每个采样单元内设 5 个采样点,每个采样点范围约 20 m × 30 m,包括东、西、南、北、中这 5 个分点,将 5 个分点所采集的稻谷混合作为一个样点的样品,每个采样点采集约 500 g 稻谷样品. 样品经干燥、脱壳后用球磨仪

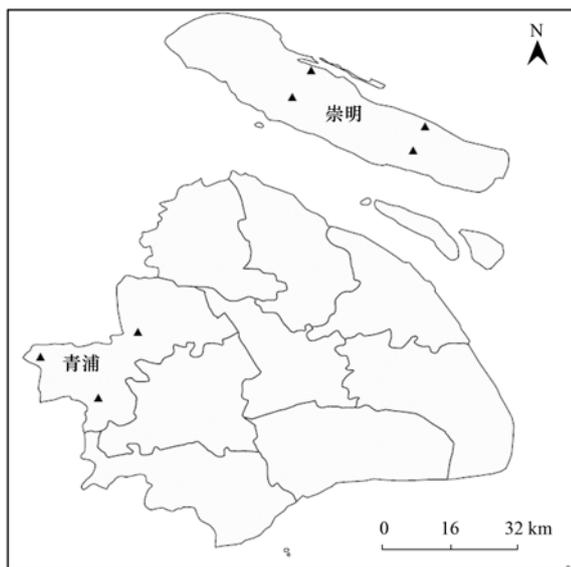


图 1 采样区域示意

Fig. 1 Regions for sampling

研磨至粉状,贮于玻璃样品瓶中备测.

### 1.2 样品的预处理

称取 5 g 稻米样品于玻璃离心管中,加入两种多氯联苯同系物替代标 PCB53 和 PCB200. 加入正己烷和丙酮混合液(8:2),经涡旋振荡、超声提取、离心,此过程重复 3 次. 将提取液旋蒸浓缩至约 1 mL,用正己烷转移并氮吹至约 2 mL,待进一步净化.

将提取液施于凝胶渗透色谱柱,用正己烷和二氯甲烷混合液(1:1)淋洗,收集的淋洗液经旋蒸浓缩并氮吹至约 2 mL. 后将样品转移至 Florisil 柱以进一步净化. Florisil 柱顶端加入 MgSO<sub>4</sub>,经丙酮、正己烷活化后,加入样品溶液,用正己烷和丙酮混合液(9:1)进行洗脱,将洗脱液氮吹至约 1 mL 转移至 GC 小瓶,再氮吹至近干,加入内标 PCNB(五氯硝基苯)和 PCB189,定容至 200 μL,待上机分析.

### 1.3 仪器分析条件

采用 Agilent 7890A 型气相色谱与电子捕获检测器(GC-ECD)对样品进行定量分析. 色谱柱为 Agilent DB-5(30 m × 250 μm × 0.25 μm);载气为高纯氮气,流速 1.1 mL·min<sup>-1</sup>;进样量为 1 μL,无分流;进样口温度为 250℃,检测器温度为 325℃;升温程序:初始温度 80℃保持 2 min,以 10℃·min<sup>-1</sup>的速率升至 195℃,后以 3℃·min<sup>-1</sup>的速率升至 230℃,再以 10℃·min<sup>-1</sup>的速率升至 310℃(保持 5 min).

### 1.4 质量控制

采用方法空白、空白加标、样品平行样和标准工作曲线等手段来进行分析质量控制. 每做 5 个样品同时做两个空白样品,每个采样点样品做 3 个平行样. 采用内标法定量,以 4,4-DDE 的保留时间为界,在此之前出峰采用内标 PCNB,之后采用内标 PCB189. 各标准工作曲线的线性相关系数都在 0.999 以上,各目标物的平均回收率为 68.2% ~ 121%. 替代标 PCB53 回收率为 70% ~ 105%,PCB200 回收率为 72% ~ 96%.

### 1.5 风险评价

采用 USEPA 推荐的健康风险评价模型,对上海地区稻米中有机氯农药进行健康风险评价<sup>[21]</sup>. 食用含有 OCPs 的稻米引起的健康风险包括致癌风险和非致癌风险. 用该模型计算有机氯农药摄食途径下的长期日暴露量[chronic daily intake, CDI, 单位:mg·(kg·d)<sup>-1</sup>],计算公式为:

$$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中,  $C$  为稻米中污染物的含量(mg·kg<sup>-1</sup>);  $IR$  为

日均摄入量( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ),参考2008年浙江省城乡居民膳食结构调查报告,城乡居民每人每日稻米平均摄入量为 $0.314\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ;EF为暴露频率( $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ),取值365;ED为暴露持续时间(a),取值70;BW为平均人体质量(kg),取值60;AT为终生平均作用时间(d),取值25 550.

致癌风险用风险值(Risk)表示,计算公式如下:

$$\text{RI} = \text{CDI} \times \text{SF} \quad (2)$$

式中,RI为风险指数;SF是致癌斜率因子( $\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$ ).

非致癌风险用危害指数(HI)表示,计算公式如下:

$$\text{HI} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}_i} \quad (3)$$

式中,RfD<sub>i</sub>为致癌污染物*i*的参考剂量 [ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ].各污染物质的致癌斜率因子、参考剂量来自USEPA综合风险信息数据库<sup>[22]</sup>(见表1).

表1 OCPs的致癌斜率因子和参考剂量值

污染物	SF/ $\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$	RfD/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$
α-HCH	6.3	—
β-HCH	1.8	—
γ-HCH	1.3	0.000 3
DDTs	0.34	0.000 5
六氯苯	1.6	0.000 3
环氧七氯	9.1	0.000 013
艾氏剂	17.0	0.000 03
狄氏剂	16.0	0.000 05
异狄氏剂	—	0.000 3
硫丹	—	0.006

表2 青浦和崇明稻米中OCPs的残留量<sup>1)</sup>

有机氯农药	青浦			崇明		
	范围/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	检出率/%	范围/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	检出率/%
∑ DDTs	0.11 ~ 5.68	3.23	100	0.05 ~ 6.61	2.56	100
∑ HCHs	0.06 ~ 2.44	0.89	100	0.11 ~ 0.83	0.55	100
六氯苯	N. D. ~ 0.32	0.09	40	N. D. ~ 0.01	0.00	15
环氧七氯	N. D. ~ 2.27	0.57	73.3	N. D. ~ 0.81	0.29	90
硫丹	N. D. ~ 0.55	0.13	60	N. D. ~ 0.64	0.16	60
氯丹	N. D. ~ 1.36	0.63	73.3	N. D. ~ 1.10	0.41	95
氧化氯丹	N. D. ~ 2.31	0.43	53.3	N. D. ~ 0.00	0.00	0
艾氏剂	N. D. ~ 0.29	0.07	33.3	N. D. ~ 0.60	0.19	70
异艾氏剂	N. D. ~ 0.29	0.05	26.7	N. D. ~ 0.59	0.18	85
狄氏剂	N. D. ~ 0.85	0.20	40	N. D. ~ 0.00	0.00	0
异狄氏剂	N. D. ~ 0.46	0.05	33.3	N. D. ~ 0.45	0.11	40
甲氧滴滴涕	N. D. ~ 0.55	0.12	46.7	N. D. ~ 0.59	0.16	60
灭蚊灵	N. D. ~ 0.58	0.12	53.3	N. D. ~ 0.90	0.18	40
∑ OCPs	0.17 ~ 12.72	6.53	100	0.31 ~ 10.76	4.70	100

1) N. D. 表示低于检出限,即未检测出;0.00表示虽然检出但低于定量限

## 2 结果与讨论

### 2.1 稻米中OCPs的残留状况

青浦和崇明地区稻米样品中24种有机氯农药的残留水平见表2.总体而言,青浦稻米样品有机氯农药的总含量范围为 $0.17\sim 12.72\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,平均含量是 $6.53\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ .DDTs和HCHs在所有稻米样品中均有检出,是最主要的残留组分,含量范围分别为 $0.11\sim 5.68\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.06\sim 2.44\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ .除此之外,其他OCPs在部分稻米样品中也有检出,占OCPs总残留量的 $0\sim 53.8\%$ ,其中氯丹、环氧七氯的残留量和检出率相对较高,平均含量分别为 $0.63\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.57\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,检出率均为73.3%.

崇明地区稻米中除氧化氯丹、狄氏剂未有检出外,其他OCPs均有一定的检出,总OCPs含量范围为 $0.31\sim 10.76\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,平均含量是 $4.70\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ .其中DDTs和HCHs是主要残留组分,含量范围分别为 $0.05\sim 6.61\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.11\sim 0.83\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,占OCPs总残留量的 $15.4\sim 69.1\%$ 和 $4.1\sim 28.5\%$ .氯丹、艾氏剂、异艾氏剂、环氧七氯、甲氧滴滴涕等也在崇明稻米中有所残留,其中氯丹、环氧七氯的残留量和检出率比其他组分高,残留范围分别为N. D. ~  $1.10\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和N. D. ~  $0.81\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,检出率分别为95%和90%.

本研究区中DDTs、HCHs、氯丹、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、灭蚊灵的残留量均远低于食品安全国家标准(GB 2763-2014)<sup>[23]</sup>中对应稻米的再残留限值,表明上海市稻米中OCPs的残留处于安全水平.

## 2.2 稻米中 OCPs 的组成特征

### 2.2.1 青浦地区稻米中 DDTs 和 HCHs 的组成特征

青浦地区 DDTs 和 HCHs 各组分组成特征见图 2. 青浦稻米中 6 种 DDTs 同系物均有不同程度检出, 其中以 4,4-DDE 残留最高, 检出率为 100%, 残留范围为  $0.05 \sim 3.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 占  $\sum$  DDTs 的 31.7% ~ 67.2%. 其次为 4,4-DDT 和 2,4-DDT, 含量范围分别为 N. D. ~  $1.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、N. D. ~  $1.36 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 占  $\sum$  DDTs 的 0 ~ 42.7% 和 0 ~ 31.2%. DDTs 各组分残留量从高到低依次为 4,4-DDE > 4,4-DDT > 2,4-DDT > 2,4-DDE > 2,4-DDD > 4,4-DDD. 从图 2(a) 可以看出, 青浦不同采样单元稻米中 DDTs 的组成特征有一定规律, 而残留量有所差异, 其总体残留水平为第三采样单元 > 第二采样单元 > 第一采样单元. 有研究表明, 4,4-DDT/(4,4-DDE + 4,4-DDD) 的比值可以用来判断有无新 DDT 的输入, 若比值大于 1, 表明有新 DDT 源的释放, 反之则表明土壤中的 DDT 来源于历史上的使用<sup>[24]</sup>. 在本研究区域该比值在 0 ~ 0.67 之间, 表明稻米中 DDTs 均来源于早期农药施用的残留. 另外, 2,4-DDT/4,4-DDT 可用于区分工业 DDTs 和三氯杀螨醇的来源<sup>[24]</sup>. 由于三氯杀螨醇中 2,4-DDT 含量较高, 2,4-DDT/4,4-DDT 在 1.3 ~ 9.3 或是更高表明有三氯杀螨醇的使用, 而工业 DDTs 中该比值则在 0.2 ~ 0.3 之间. 本研究 2,4-DDT/4,4-DDT 在 0 ~ 2.03 之间, 有 14.3% 的点位超过 1.3, 表明研究区域内稻米 DDT 大部分源于工业 DDTs 的使用, 而局部区域三氯杀螨醇的使用或许是 DDT 的主要来源.

青浦稻米中 HCHs 主要的 4 种异构体  $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -HCH 均有检出, 与样品中 DDTs 相比, HCHs 的残留水平稍低, 各异构体的平均含量从高至低依次为  $\beta$ -HCH ( $0.49 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) >  $\delta$ -HCH ( $0.20 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) >  $\alpha$ -HCH ( $0.12 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) >  $\gamma$ -HCH ( $0.09 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 它们对  $\sum$  HCHs 的平均贡献率分别为 59.49%、25.13%、8.47%、6.91%. 不同采样单元稻米中的 HCHs 总体残留水平与 DDTs 基本一致, 由高到低依次为第三采样单元 > 第二采样单元 > 第一采样单元. 究其原因, 这种采样单元之间的差异可能由于周边环境不同所致.  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH 的比值可以用于判断 HCHs 的来源, 若  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH 在 4 ~ 7 之间, 表明该地区 HCHs 主要来源于历史残留的工业 HCHs; 若  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH 小于 1, 则表明该地区近

期有林丹的释放<sup>[25]</sup>. 本研究中  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH 在 0.36 ~ 34.03, 其中有 75% 的点位比值小于 1, 说明稻米中大部分 HCHs 可能来源于近期林丹的使用.

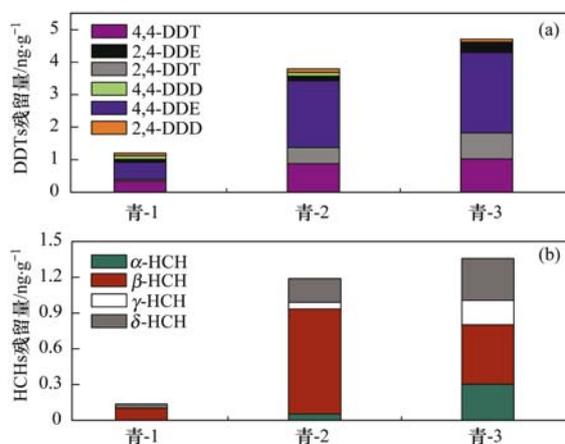


图 2 青浦地区稻米中 DDTs 及 HCHs 组份组成特征

Fig. 2 Compositions of DDTs and HCHs in rices from Qingpu

### 2.2.2 崇明地区稻米中 DDTs 和 HCHs 的组成特征

崇明稻米中 DDTs 的 6 种同系物平均残留量从高到低依次为 2,4-DDT ( $1.23 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) > 4,4-DDE ( $0.56 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) > 4,4-DDT ( $0.54 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) > 2,4-DDE ( $0.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) > 4,4-DDD ( $0.05 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) > 2,4-DDD ( $0.02 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ). 由图 3(a) 可知, 崇明地区不同采样单元稻米中 DDT 组成特征有所差异, 其中一、二采样单元稻米中 2,4-DDT 和 4,4-DDT 是其主要残留类型, 分别占该地块 DDTs 的 37.9% 和 36.6%; 而三、四采样单元稻米中以 4,4-DDE 和 2,4-DDT 残留量较高, 分别占  $\sum$  DDTs 的 50.7% 和 28.8%. 由于崇明是长江冲积形成的岛屿, 岛上不同方位的土壤成陆时间不一, 理化性质存在差异. 本研究所涉及的稻田, 位于崇明西北部长江北支边的一、二采样单元, 是近年泥沙冲积形成的新土地, 位于崇明中东部的三、四采样单元是冲积形成已久的旧土地. 崇明地区稻米中 4,4-DDT/(4,4-DDE + 4,4-DDD) 的比值在 0 ~ 7.24, 其中新生土地的稻米样品该比值皆小于 1, 而旧土地的稻米样品中有 62.5% 超过 1, 表明新土地稻米中 DDTs 主要来源于早期农药的施用, 其最初来源可能为长江从上中游沿岸携带而来, 而旧土地多半地区可能存在新的 DDTs 输入. 对于 2,4-DDT/4,4-DDT 的比值, 新旧土地各有 44.4%、62.5% 的点位超过 1.3, 表明研究区域内或许存在三氯杀螨醇的使用.

崇明地区 HCHs 残留水平稍低于 DDTs, 平均

残留量由高到低依次为  $\beta$ -HCH ( $0.30 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) >  $\alpha$ -HCH ( $0.16 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) >  $\delta$ -HCH ( $0.08 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) >  $\gamma$ -HCH ( $0.02 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )，检出率分别为 100%、90%、95%、35%。本研究中  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH 比值均大于 1，说明崇明地区 HCHs 主要来源于历史残留的工业 HCHs，近期没有林丹使用的迹象。

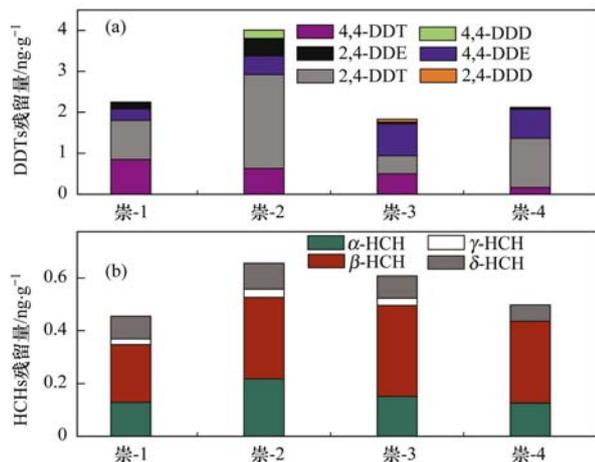


图3 崇明地区稻米中 DDTs 及 HCHs 组分组成特征

Fig. 3 Compositions of DDTs and HCHs in rices from Chongming

### 2.2.3 稻米中其他 OCPs 的组成特征

青浦和崇明地区稻米中其他 OCPs 的残留水平见图 4，除顺式氯丹、艾氏剂、灭蚁灵等少数 OCPs 外，青浦地区稻米中 OCPs 残留量整体高于崇明。青浦地区稻米中反式氯丹、 $\beta$ -环氧七氯、氧化氯丹的残留量和检出率较高，平均含量分别为  $0.60$ 、 $0.49$ 、 $0.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，检出率分别为 60%、53.3%、53.3%。反式氯丹、艾氏剂、异艾氏剂、 $\beta$ -环氧七氯、甲氧滴滴涕等在崇明稻米中有所残留，其中反式氯丹和异艾氏剂的残留量相对较高，残留范围分别为  $\text{N. D.} \sim 1.00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $\text{N. D.} \sim 0.59 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，检出率为 65% 和 85%。与国内外相比，本研究中环氧七氯、氯丹、硫丹、六氯苯的残留量均低于中国环鄱阳湖<sup>[26]</sup>、江西<sup>[27]</sup>、巴基斯坦<sup>[18]</sup>、泰国<sup>[28]</sup> 稻米中相应物质的含量。其中六氯苯在我国并未用于农业生产，而是作为五氯酚和五氯酚钠的中间体，以及防治血吸虫病的有效杀虫剂<sup>[29]</sup>。六氯苯具有较高的蒸气压和较强的挥发性，因此环境中的六氯苯更容易在大气中进行远距离迁移<sup>[26, 30]</sup>。本研究稻米中 HCB 结果较低的原因可能包括两个方面：一是当地环境中 HCB 的背景含量较低，二是由于 HCB 本身的理化性质和水稻的生理生化性质，导致其不易在稻米中积累。

目前有关艾氏剂、异艾氏剂、狄氏剂、异狄氏

剂的残留水平研究较少。虽然艾氏剂和狄氏剂在中国未曾用于大规模生产，仅在实验室阶段有少量的合成和研究，然而研究表明，艾氏剂和狄氏剂在中国各个环境介质如大气<sup>[31]</sup>、水体<sup>[32]</sup>、沉积物<sup>[33-35]</sup>、土壤<sup>[36-39]</sup> 中有所检出，甚至在作物<sup>[40,41]</sup>、人体脐带血<sup>[42,43]</sup> 中也有所检出。比较本研究中测得艾氏剂和狄氏剂含量发现，上海市艾氏剂和狄氏剂的污染水平处于中国 OCPs 的中低浓度水平。中国艾氏剂和狄氏剂的检出原因主要有两点，一是由于某些低纬度发展中国家仍在使用的艾氏剂和狄氏剂，使其通过长距离的大气传输及全球蒸馏效应迁移并沉降到中国<sup>[37,44]</sup>，另一方面科学研究的小规模使用、某些地区可能存在的违禁使用也会造成其检出<sup>[33, 38, 42]</sup>。总体而言，本研究区稻米中的上述 OCPs 处于较低的污染水平。

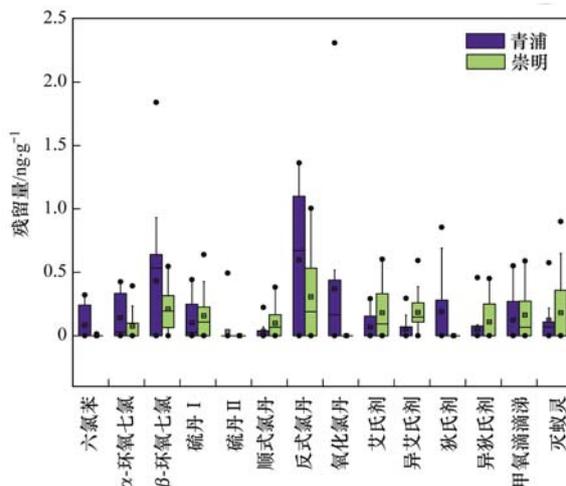


图4 稻米中其他 OCPs 的残留状况

Fig. 4 Residues of other OCPs in rices from Qingpu and Chongming

### 2.3 稻米中 OCPs 的健康风险评估

稻米是上海市居民的主要粮食作物之一，为考察研究区稻米的质量安全，以摄食为人体暴露途径，评价其对人体产生的致癌和非致癌风险，评价结果见表 3。

参考国际辐射防护委员会、美国环保署等提供的与致癌风险相关的各项参数，致癌风险值小于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  被认为是可接受水平<sup>[21,45,46]</sup>。在本研究中，青浦、崇明稻米中 8 种 OCPs 的总致癌风险指数  $\sum \text{RI}$  分别为  $6.83 \times 10^{-5}$  和  $7.7 \times 10^{-5}$ ，尚处于可接受水平。对于单污染物的致癌风险，本研究区域所有 OCPs 均处于可接受水平。总体而言，本研究区域稻米中 OCPs 的致癌健康风险较低，对食用人群身体健康基本不造成致癌风险。

表 3 上海市稻米中 OCPs 的致癌风险指数 (RI) 和非致癌危害指数 (HI)

项目	致癌风险指数 (RI)		非致癌危害指数 (HI)	
	青浦	崇明	青浦	崇明
DDTs	$1.74 \times 10^{-5}$	$6.21 \times 10^{-6}$	0.1	$3.65 \times 10^{-2}$
$\alpha$ -HCH	$1.19 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-5}$	—	—
$\beta$ -HCH	$7.15 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-6}$	—	—
$\gamma$ -HCH	$7.48 \times 10^{-7}$	$1.50 \times 10^{-6}$	$1.92 \times 10^{-3}$	$3.84 \times 10^{-3}$
HCB	$4.35 \times 10^{-6}$	$3.35 \times 10^{-7}$	$9.07 \times 10^{-3}$	$6.97 \times 10^{-4}$
环氧七氯	$7.14 \times 10^{-7}$	$5.71 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$4.83 \times 10^{-2}$
艾氏剂	$2.67 \times 10^{-6}$	$2.31 \times 10^{-5}$	$5.23 \times 10^{-3}$	$4.53 \times 10^{-2}$
狄氏剂	$2.34 \times 10^{-5}$	$2.31 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-2}$	$4.53 \times 10^{-2}$
异狄氏剂	—	—	$2.09 \times 10^{-3}$	$9.41 \times 10^{-3}$
硫丹	—	—	$1.25 \times 10^{-3}$	$3.49 \times 10^{-5}$
$\sum$ RI	$6.83 \times 10^{-5}$	$7.7 \times 10^{-5}$	—	—
$\sum$ HI	—	—	0.14	0.19

所检出的有机氯农药各组分的非致癌危害指数 HI 值范围分别为  $3.49 \times 10^{-5} \sim 0.1$ , 青浦和崇明稻米中 8 种 OCPs 的非致癌危害指数  $\sum$  HI 分别为 0.14 和 0.19, 远低于美国环保署标准 (HI < 1), 表明长期食用该研究区稻米基本不会因本研究所涉及的污染物对人体健康产生非致癌风险。

### 3 结论

(1) 上海市稻米中传统 OCPs 仍普遍存在, 且均以 DDTs 和 HCHs 为主要残留物。青浦和崇明区稻米中 24 种 OCPs 的含量范围分别为  $0.17 \sim 12.72 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.31 \sim 10.76 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 远低于食品安全国家标准中的再残留限值, 处于安全水平。

(2) 研究区稻米中的 DDTs 和 HCHs 各同系物均有不同程度检出, 青浦区以 4,4-DDE 和  $\beta$ -HCH 为主, 崇明区以 2,4-DDT 和  $\beta$ -HCH 为主。青浦区稻米中的 DDTs 主要来自早期农药施用, 局部地区可能存在三氯杀螨醇的使用, HCHs 很可能主要来源于林丹的近期使用; 崇明区新生土地稻米中 DDTs 主要来源于早期农药的施用, 旧土地则多半有新的工业 DDTs 输入, 崇明地区无论新旧土地近期均可能有三氯杀螨醇的使用, 而 HCHs 主要还是来源于历史残留。

(3) 青浦和崇明区稻米中 8 种 OCPs 的总致癌风险指数分别为  $6.83 \times 10^{-5}$ 、 $7.7 \times 10^{-5}$ , 非致癌危害指数分别为 0.14、0.19, 没有超出可接受水平, 表明长期食用本研究区稻米基本不会因本研究

的 OCPs 对人体健康产生危害。

### 参考文献:

- [1] El-Shahawi M S, Hamza A, Bashammakh A S, *et al.* An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants[J]. *Talanta*, 2010, **80**(5): 1587-1597.
- [2] Jones K C, de Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science[J]. *Environmental Pollution*, 1999, **100**(1-3): 209-221.
- [3] Rissato S R, Galhiane M S, Ximenes V F, *et al.* Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in soil and water samples in the Northeastern part of São Paulo State, Brazil [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(11): 1949-1958.
- [4] Mahugija J A M, Henkelmann B, Schramm K W. Levels, compositions and distributions of organochlorine pesticide residues in soil 5-14 years after clean-up of former storage sites in Tanzania[J]. *Chemosphere*, 2014, **117**: 330-337.
- [5] Gao J, Zhou H F, Pan G Q, *et al.* Factors influencing the persistence of organochlorine pesticides in surface soil from the region around the Hongze Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **443**: 7-13.
- [6] Ahad K, Mohammad A, Khan H, *et al.* Monitoring results for organochlorine pesticides in soil and water from selected obsolete pesticide stores in Pakistan[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **166**(1-4): 191-199.
- [7] Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs), All POPs listed in the Stockholm Convention [EB/OL]. <http://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx>.
- [8] 华小梅, 单正军. 我国农药的生产, 使用状况及其污染环境因子分析[J]. *环境科学进展*, 1996, **4**(2): 33-45.  
Hua X M, Shan Z J. The production and application of pesticides and factor analysis of their pollution in environment in China[J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, **4**(2): 33-45.
- [9] 迭庆杞, 聂志强, 黄启飞, 等. 珠江三角洲土壤中有氯农药的分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(2): 298-304.  
Die Q Q, Nie Z Q, Huang Q F, *et al.* Organochlorine pesticides (OCPs) in soils of Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(2): 298-304.
- [10] Mishra K, Sharma R C, Kumar S. Contamination levels and spatial distribution of organochlorine pesticides in soils from India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **76**: 215-225.
- [11] Qu C K, Qi S H, Yang D, *et al.* Risk assessment and influence factors of organochlorine pesticides (OCPs) in agricultural soils of the hill region: a case study from Ningde, southeast China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **149**: 43-51.
- [12] Nguyen T D, Han E M, Seo M S, *et al.* A multi-residue method for the determination of 203 pesticides in rice paddies using gas chromatography/mass spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, **619**(1): 67-74.
- [13] Otake T, Aoyagi Y, Matsuo M, *et al.* Evaluation of pressurized liquid extraction for the analysis of four pesticides in unpolished rice[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2008, **43**(5): 390-394.

- [14] 涂杰峰, 刘兰英, 罗钦, 等. 福建省稻米镉含量及其健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(4): 695-701.  
Tu J F, Liu L Y, Luo Q, *et al.* Contents and health risk assessment of cadmium in milled rice in Fujian Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(4): 695-701.
- [15] Fang Y, Sun X Y, Yang W J, *et al.* Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China[J]. Food Chemistry, 2014, **147**: 147-151.
- [16] 刘兰英, 涂杰峰, 邱伟兴, 等. 福建闽西矿区周边稻米重金属含量及健康风险评估[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, **44**(12): 99-106.  
Liu L Y, Tu J F, Qiu W Y, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in rice in mining area of western Fujian[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, **44**(12): 99-106.
- [17] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As, Pb, Cd 污染及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2314-2320.  
Lei M, Zeng M, Wang L H, *et al.* Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(11): 2314-2320.
- [18] Mumtaz M, Qadir A, Mahmood A, *et al.* Human health risk assessment, congener specific analysis and spatial distribution pattern of organochlorine pesticides (OCPs) through rice crop from selected districts of Punjab Province, Pakistan[J]. Science of the Total Environment, 2015, **511**: 354-361.
- [19] Chen S B, Shi L L, Shan Z J, *et al.* Determination of organochlorine pesticide residues in rice and human and fish fat by simplified two-dimensional gas chromatography[J]. Food Chemistry, 2007, **104**(3): 1315-1319.
- [20] 潘静, 杨永亮, 何俊, 等. 崇明岛不同典型功能区表层土壤中有机氯农药分布及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2286-2292.  
Pan J, Yang Y L, He J, *et al.* Distribution and ecological risk evaluation of organochlorine pesticides in surface soils from different land use areas in Chongming Island[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(11): 2286-2292.
- [21] EPA/600/Z-92/001. Guidelines for exposure assessment[S].
- [22] EPA-HQ-ORD-2007-0664, Integrated risk information system (IRIS)[S].
- [23] GB 2763-2014, 食品中农药最大残留限量[S].
- [24] Harner T, Wideman J L, Jantunen L M M, *et al.* Residues of organochlorine pesticides in Alabama soils[J]. Environmental Pollution, 1999, **106**(3): 323-332.
- [25] Walker K, Vallero D A, Lewis R G. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(24): 4373-4378.
- [26] 胡春华, 陈禄禄, 李艳红, 等. 环鄱阳湖区水稻-土壤有机氯农药污染及健康风险评估[J]. 环境化学, 2016, **35**(2): 355-363.  
Hu C H, Chen L L, Li Y H, *et al.* Distribution and health risk assessment of organochlorine pesticides in rice and soil in the area around Poyang Lake[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(2): 355-363.
- [27] 周立峰. 江西省大米中农药类持久性有机污染物的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011. 74-80.
- [28] Chaiyarat R, Sookjam C, Eiam-Ampai K, *et al.* Organochlorine pesticide levels in the food web in rice paddies of Bueng Boraphet wetland, Thailand [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(5): 230.
- [29] Chen L G, Feng Q H, He Q S, *et al.* Sources, atmospheric transport and deposition mechanism of organochlorine pesticides in soils of the Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2017, **577**: 405-412.
- [30] 毛海红, 孙玉川, 付允, 等. 雪玉洞表土有机氯农药的分布及来源研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1134-1141.  
Mao H H, Sun Y C, Fu Y, *et al.* OCPs distribution and possible sources in the surface soil of Xueyu Cave[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(5): 1134-1141.
- [31] Ouyang H L, Wang Q M, He W, *et al.* Organochlorine pesticides in the dust fall around Lake Chaohu, the fifth largest lake in China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(1): 383-393.
- [32] Wu C F, Luo Y M, Gui T, *et al.* Concentrations and potential health hazards of organochlorine pesticides in shallow groundwater of Taihu Lake region, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 1047-1055.
- [33] Wang W, Bai J H, Xi M, *et al.* Occurrence, sources, and risk assessment of OCPs in surface sediments from urban, rural, and reclamation-affected rivers of the Pearl River Delta, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(3): 2535-2548.
- [34] Zhao Z H, Zhang L, Wu J L. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from lakes along the middle-lower reaches of the Yangtze River and the Huaihe River of China [J]. Limnology and Oceanography, 2016, **61**(1): 47-60.
- [35] Guo W, Zhang H Y, Cui S B, *et al.* Assessment of the distribution and risks of organochlorine pesticides in core sediments from areas of different human activity on Lake Baiyangdian, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, **28**(4): 1035-1044.
- [36] Han Y X, Mo R H, Yuan X Y, *et al.* Pesticide residues in nutrient-planted soils of China and their relationship between nut/soil [J]. Chemosphere, 2017, **180**: 42-47.
- [37] Niu L, Xu C, Zhu S Y, *et al.* Residue patterns of currently, historically and never-used organochlorine pesticides in agricultural soils across China and associated health risks [J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 315-322.
- [38] 韦燕莉, 鲍恋君, 巫承洲, 等. 快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3821-3829.  
Wei Y L, Bao L J, Wu C Z, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of insecticides in surface soil from a rapidly urbanizing region[J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3821-3829.
- [39] Wang Y H, Xu Y Y, Qi S H, *et al.* Distribution and potential sources of organochlorine pesticides in the karst soils of a tiankeng in southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(6): 2873-2881.
- [40] Liu Y H, Shen D Y, Li S L, *et al.* Residue levels and risk assessment of pesticides in nuts of China [J]. Chemosphere,

- 2016, **144**: 645-651.
- [41] Liu Y H, Li S L, Ni Z L, *et al.* Pesticides in persimmons, jujubes and soil from China; residue levels, risk assessment and relationship between fruits and soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 620-628.
- [42] Luo D, Pu Y B, Tian H Y, *et al.* Concentrations of organochlorine pesticides in umbilical cord blood and related lifestyle and dietary intake factors among pregnant women of the Huaihe River Basin in China[J]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 276-283.
- [43] Cao L L, Yan C H, Yu X D, *et al.* Relationship between serum concentrations of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides and dietary habits of pregnant women in Shanghai[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409** (16): 2997-3002.
- [44] Zhang A P, Fang L, Wang J L, *et al.* Residues of currently and never used organochlorine pesticides in agricultural soils from Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, **60**(12): 2982-2988.
- [45] U.S. EPA. Soil screening guidance: technical background document[R]. Washington, DC: EPA, 1996.
- [46] 黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建鹫峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2691-2697.
- Huang H F, Qi S H, Qu C K, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of organochlorine pesticides in soil from Jiufeng Mountain range in Fujian, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2691-2697.

---

## 《环境科学》连续 6 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2017 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2017 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2017 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 6 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

## CONTENTS

Preface .....	HAO Zheng-ping ( 477 )
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment .....	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> ( 478 )
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing .....	..... HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> ( 493 )
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> ( 502 )
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park .....	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> ( 511 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China .....	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 517 )
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park .....	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> ( 525 )
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China .....	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> ( 533 )
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao .....	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> ( 543 )
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province .....	..... YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> ( 551 )
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making .....	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> ( 557 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers .....	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 567 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu .....	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> ( 576 )
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors .....	..... JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> ( 585 )
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province .....	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue ( 592 )
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City .....	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> ( 600 )
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014 .....	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> ( 608 )
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing .....	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> ( 618 )
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel .....	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 626 )
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter .....	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> ( 633 )
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter .....	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> ( 640 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event .....	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> ( 648 )
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems .....	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> ( 655 )
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes .....	TONG Rui-peng, ZHANG Lei ( 663 )
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing .....	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> ( 672 )
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Beijing .....	..... YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> ( 684 )
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method .....	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> ( 691 )
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China .....	..... WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> ( 703 )
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling .....	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> ( 711 )
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis .....	..... LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> ( 720 )
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China .....	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> ( 729 )
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake .....	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> ( 738 )
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China .....	..... LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> ( 748 )
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter .....	..... ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> ( 758 )
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir .....	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> ( 765 )
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis .....	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 774 )
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream .....	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> ( 783 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> ( 792 )
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment .....	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> ( 800 )
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors .....	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> ( 811 )
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel .....	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> ( 819 )
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution .....	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> ( 828 )
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds .....	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> ( 838 )
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 844 )
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology .....	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> ( 852 )
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> ( 859 )
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode .....	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> ( 865 )
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge .....	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> ( 872 )
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate .....	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> ( 880 )
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil .....	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> ( 889 )
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin .....	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> ( 899 )
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss .....	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> ( 909 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area .....	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> ( 916 )
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai .....	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> ( 927 )
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables .....	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> ( 935 )
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils .....	..... LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> ( 944 )
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors .....	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> ( 953 )