

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	
《环境科学》征稿简则 (1332)	
信息 (1350, 1509, 1582, 1644)	
专辑征稿通知 (1523)	

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征

丁中原¹, 毛潇萱¹, 马子龙¹, 田慧¹, 郭强¹, 黄韬¹, 高宏^{1*}, 李军², 张干²

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 利用 PUF 大气被动采样器对河西走廊及兰州地区进行了为期 1 a, 分 4 个季度的大气样品采集, 应用 HP6890 II GC-ECD 对大气中典型有机氯农药六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 的含量进行了分析。研究结果表明, 河西走廊和兰州地区大气中 $\sum$ HCHs (α -HCH + β -HCH + γ -HCH + δ -HCH) 和 $\sum$ DDTs (p,p' -DDT + o,p' -DDT + p,p' -DDE + p,p' -DDD) 的平均浓度分别为 $86.22 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $34.06 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 研究区 $\sum$ HCHs 和 $\sum$ DDTs 的背景浓度平均为 $54.41 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $21.56 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 同国内外其它地区相比, 污染处于相对较低的水平。总体而言, $\sum$ HCHs 和 $\sum$ DDTs 均表现出秋季浓度相对较高 (均值分别为 $127.4 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $47.06 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$) 的季节特征, 酒泉、安西、张掖三地的 HCHs 和 DDTs 污染水平较高, 推测与这 3 个地区的耕地面积和历史使用量较大有关。源解析表明, 研究区内的 HCHs 主要来源于禁用前的历史残留以及林丹的使用, DDTs 来源于工业 DDTs 的近期使用, 部分地区如酒泉和安西可能存在三氯杀螨醇的使用。河西走廊和兰州地区人群通过呼吸途径对 HCHs 和 DDTs 的暴露水平较低。

关键词: 有机氯农药; 六六六; 滴滴涕; 大气残留; 河西走廊; 兰州地区

中图分类号: X131.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)04-1258-06

Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China

DING Zhong-yuan¹, MAO Xiao-xuan¹, MA Zi-long¹, TIAN Hui¹, GUO Qiang¹, HUANG Tao¹, GAO Hong¹, LI Jun², ZHANG Gan²

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Air samples were seasonally collected in Hexi Corridor and Lanzhou, Gansu province, using polyurethane foam (PUF) based passive air samplers for a year and determined hexachlorocyclohexanes (HCHs) and dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs). Atmospheric concentrations of $\sum$ HCHs (α -HCH + β -HCH + γ -HCH + δ -HCH) and $\sum$ DDTs (p,p' -DDT + o,p' -DDT + p,p' -DDE + p,p' -DDD) were $86.22 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $34.06 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ in Hexi Corridor and Lanzhou with background concentrations of $54.41 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $21.56 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, which were lower than previously reported values elsewhere. In general, the seasonal pollution characteristics of $\sum$ HCHs and $\sum$ DDTs exhibited higher levels with the average concentrations of $127.4 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $47.06 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ in autumn, respectively. Furthermore, relatively higher residual concentrations of HCHs and DDTs were found in Jiuquan, Anxi and Zhangye, relating to their more arable lands and more intensively historical usage. Source apportionment indicated HCHs were mainly originated from historical technical-HCHs residues and recent Lindane usage. Recently introduced technical-DDTs was highly responsible for DDTs contamination, whereas the higher concentrations of o,p' -DDT observed in Jiuquan and Anxi may be attributed to dicofol usage. In addition, human exposure to HCHs and DDTs in Hexi Corridor and Lanzhou via inhalation could be relatively low.

Key words: organochlorine pesticides; hexachlorocyclohexanes (HCHs); dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs); atmospheric residual concentration; Hexi Corridor; Lanzhou

有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 是一种半挥发性持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs), 它具有毒性大, 在环境中难降解, 可进行长距离迁移, 具有生物积累的潜力等特点, 对生态系统和人类健康都造成了巨大的危害^[1-5]。在偏远地区的各类环境介质中都检测到了

OCPs 的存在^[6-9], 大气传输起着重要的作用, 同时

收稿日期: 2012-06-24; 修订日期: 2012-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971267/D010903); 甘肃省留学人员科技活动择优项目

作者简介: 丁中原 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区有机污染物区域环境过程, E-mail: dingzhongyuan@126.com

* 通讯联系人, E-mail: honggao@lzu.edu.cn

大气也是 OCPs 进入生物体内的重要途径之一. 为了评价 OCPs 对环境和人类健康的危害和风险, 其区域大气浓度的基础信息完善是极为重要的.

六六六(hexachlorocyclohexanes, HCHs)和滴滴涕(dichlorodiphenyltrichloroethanes, DDTs)是两种典型的有机氯农药. 李向阳^[10]的调查研究了甘肃省 HCHs 和 DDTs 使用清单, 甘肃省于 1952 ~ 1984 年共使用 HCHs 64 991 t, 1951 ~ 1984 年共使用 DDTs 15 589 t.

河西走廊和兰州地区位于甘肃省境内, 耕地面积约占全省的 17%, 是甘肃乃至全国重要的商品粮种植基地, 在甘肃省“两翼齐飞”发展战略中扮演重要一环, 且这一地区在 70 年代曾大量使用 HCHs 和 DDTs, 探究这一地区 HCHs 和 DDTs 的大气残留浓度分布及其规律具有重要意义. 到目前为止, 针对这一地区 HCHs 和 DDTs 残留情况的研究已见报道, 但大多只针对单个城市点^[11, 12], 区域性的研究还较少. 本研究采用聚氨酯泡沫(polyurethane foam, PUF)被动采样器对河西走廊和兰州地区进行了为期 1 a, 分 4 个季度的大气观测, 探究了这一地区大气中 HCHs 和 DDTs 的时空分布特征及来源.

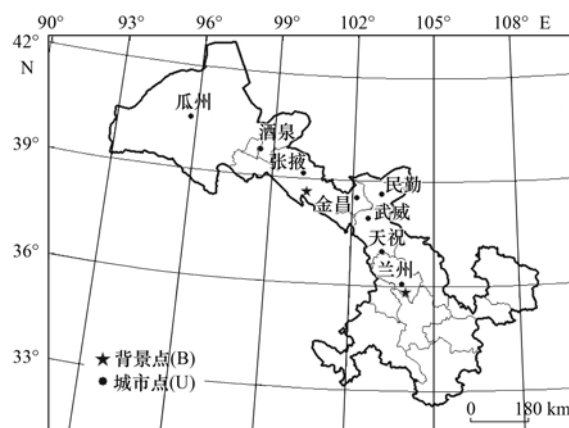
1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采用了国际上通用的 PUF 被动采样器对大气样品进行采集, 这种被动采样技术的详细介绍可参见文献[13, 14]. 在研究区域共布设了 8 个城市点(U)、7 个农村点(R)和 2 个背景点(B), 城市点和农村点布置在河西走廊地区的部分大中城市及其辖下乡村中, 背景点布置于人类活动干扰较少且远离城市的兰州市兴隆山和张掖市祁连山森林生态站(图 1). 以 3 个月为周期(约 90 d)采集了为期 1 a, 分 4 个季度的大气样品, 采样时间分别为秋季(2010 年 9 月初 ~ 2010 年 11 月末)、冬季(2010 年 11 月末 ~ 2011 年 2 月末)、春季(2011 年 2 月末 ~ 2011 年 5 月末)和夏季(2011 年 5 月末 ~ 2011 年 8 月末).

1.2 样品处理及分析

样品采集后的 PUF 碟片用色谱纯二氯甲烷通过索氏提取器抽提 24 h, 抽提前在二氯甲烷中加入活化铜片和回收率指示物 2,4,5,6-四氯间二甲苯, PCB30, PCB209. 使用旋转蒸发器将提取液浓缩并将溶剂转换为正己烷, 浓缩至 3 mL 后通过酸性硅胶-氧化铝层析柱(制作方法见文献[12])分离净



农村点(R)与城市点(U)相距较近, 因图例重叠问题, 未标出

图 1 PUF 采样点位置示意

Fig. 1 Locations of PUF passive sampling

化, 用 20 mL 正己烷/二氯甲烷混合液(1:1, 体积比)冲淋, 将冲淋液浓缩至 0.5 mL 后加入 20 ng PCB54 作为内标, 待测.

采用气相色谱仪-⁶³Ni 电子捕获检测器(HP6890 II GC-ECD)对有机氯农药组分进行分析. 色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). 载气为高纯氦气, 流速为 1.0 mL · min⁻¹. 不分流进样, 进样量为 1 μL. 程序升温条件为: 初始温度为 60℃, 保持 1 min, 以 7℃ · min⁻¹ 的升温速率升温至 180℃, 再以 3℃ · min⁻¹ 的升温速率升温至 205℃, 然后以 6℃ · min⁻¹ 的升温速率升温至 290℃, 最后在 290℃ 保留 28 min.

1.3 质量保证和质量控制(QA/QC)

为保证分析结果的真实性和准确性, 在本研究的样品采集和分析过程中实施了严格的质量保证和控制措施. 野外空白用来检验 PUF 碟片在运输过程中是否受到了外源污染, 实验室空白用以检验实验室分析过程中所用试剂、药品、仪器等的本底值, 野外空白以及实验室空白样品同大气样品的处理过程相同, 空白值均远小于大气样品含量的 1%. 本研究中各化合物的方法检出限为 0.03 ~ 0.70 ng, 低于检出限的分析结果以 n. d. (not detected) 表示. 样品回收率: 2,4,5,6-四氯间二甲苯为 67% ~ 112%, PCB30 为 78% ~ 93%, PCB209 为 85% ~ 117%. 数据均经空白扣除和回收率校正(用 2,4,5,6-四氯间二甲苯和 PCB30 回收率的算术平均值来校正 HCHs, 用 PCB209 的回收率来校正 DDTs).

2 结果与讨论

2.1 HCHs 和 DDTs 的大气残留特征

大气浓度($\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)可根据 PUF 碟片采集到的 OCPs 的量(pg)和有效采样体积(m^3)来推算出. 对具有较高辛醇-气分配系数(K_{oa})的化合物而言,根据采样速率($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)和采样时间(d)可以推算出有效采样体积(m^3). 本研究采用的采样速率为 $3.5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 这与 Gouin 等^[15,16]利用效能参考物质对 PUF 被动采样器的采样速率进行校正的研究结果相一致.

河西走廊及兰州地区 HCHs 和 DDTs 的大气残留浓度列于表 1. HCHs 的检出率为 97.1% ~ 100%, DDTs 的检出率为 80.9% ~ 100%, 均表现出较强的残留特征. $\sum$ HCHs 的大气浓度范围为 $10.01 \sim 268.4 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\sum$ DDTs 为 $1.414 \sim 123.8 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 从总体看, HCHs 的污染水平是高于 DDTs

的,这主要是由于 HCHs 各异构体的蒸气压比 DDTs 及其类似物高^[17,18],同时,根据李向阳^[10]对甘肃省 HCHs 和 DDTs 使用清单的调查研究,可推出在河西走廊及兰州地区 HCHs 的使用量较 DDTs 要大. 在 HCHs 的各异构体中, α -HCH 的浓度范围为 $8.140 \sim 228.6 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$,所占的含量最大,在 DDTs 及其类似物中, p,p' -DDE 的浓度范围为 $\text{n. d.} \sim 73.73 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$,所占的含量最大.

同国内外其它地区相比,研究区内 OCPs 的大气浓度是相对较低的^[12, 19~21],这说明在被禁用近 30 年后, HCHs 和 DDTs 在研究区环境中的含量已大大减少. 另外,在禁用之前,甘肃省 HCHs 和 DDTs 的使用量相较我国其它地区是比较小的^[10, 22, 23].

表 1 河西走廊和兰州地区 HCHs 和 DDTs 的大气浓度含量水平¹⁾/ $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table1 Atmospheric concentrations of HCHs and DDTs in Hexi Corridor and Lanzhou/ $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$

化合物	秋	冬	春	夏
α -HCH	16.80 ~ 228.6 (68.46)	8.140 ~ 76.32 (43.25)	16.09 ~ 42.11 (27.46)	9.868 ~ 62.14 (27.71)
β -HCH	n. d. ~ 51.15 (34.40)	1.668 ~ 170.7 (28.94)	5.674 ~ 30.00 (16.10)	0.3344 ~ 38.17 (16.40)
γ -HCH	11.92 ~ 161.7 (30.65)	n. d. ~ 28.55 (9.253)	1.803 ~ 10.29 (6.273)	3.878 ~ 51.17 (16.31)
δ -HCH	n. d. ~ 16.34 (11.26)	n. d. ~ 37.57 (9.706)	n. d. ~ 11.51 (4.663)	n. d. ~ 11.39 (3.985)
p,p' -DDE	11.98 ~ 73.73 (29.78)	0.4458 ~ 61.85 (14.53)	n. d. ~ 48.58 (10.37)	2.209 ~ 42.40 (12.41)
p,p' -DDD	n. d. ~ 15.06 (3.622)	0.1637 ~ 8.757 (1.842)	n. d. ~ 8.846 (0.8536)	0.1149 ~ 6.220 (2.459)
o,p' -DDT	n. d. ~ 16.16 (6.665)	0.5090 ~ 12.19 (3.449)	n. d. ~ 33.29 (7.092)	0.4892 ~ 38.41 (8.652)
p,p' -DDT	n. d. ~ 55.34 (6.988)	n. d. ~ 4.020 (0.9626)	0.7921 ~ 15.10 (6.339)	n. d. ~ 48.11 (11.91)
$\sum$ HCHs	71.61 ~ 188.4 (127.4)	10.01 ~ 268.4 (90.74)	35.70 ~ 78.62 (54.71)	29.38 ~ 158.5 (64.41)
$\sum$ DDTs	13.54 ~ 123.8 (47.06)	1.414 ~ 84.37 (20.79)	6.003 ~ 54.64 (26.28)	8.224 ~ 110.7 (35.44)

1) 括号内为均值, n. d. 表示未检出

2.2 HCHs 和 DDTs 的季节分布规律及来源解析

由表 1 可知,河西走廊和兰州地区的 HCHs 和 DDTs 大气浓度呈现夏秋季节高而冬春季节低的规律. 夏秋季节研究区的平均温度比冬春季节要高,温度的升高将促使 HCHs 和 DDTs 从土壤中挥发进入大气,造成大气浓度的升高,说明温度是影响 HCHs 和 DDTs 大气季节性浓度变化的一个重要因素.

整体来看, $\sum$ HCHs 和 $\sum$ DDTs 均表现出秋季浓度最高,春季最低的季节特征. 各 HCHs 异构体、DDTs 及其类似物都表现出了相似的季节特征. 这可能是由于在秋季河西走廊和兰州地区温度较高, OCPs 的挥发作用较强,同时光辐射较弱,大气光降解作用也较弱;而在春季,研究区的平均风速可达 $3.0 \sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[24], OCPs 的迁移扩散作用导致春季浓度的降低.

2.2.1 HCHs 的来源解析

占工业 HCHs 的质量分数: α -HCH 为 60% ~ 70%, β -HCH 为 5% ~ 12%, γ -HCH 为 10% ~ 12%, δ -HCH 为 6% ~ 10%, ε -HCH 为 3% ~ 4%. β -HCH 同 α -HCH 相比,其蒸气压较低,环境持久性较强^[17],环境中 α -HCH/ β -HCH 的值常用来反映工业 HCH 的“新旧”. 如果 α -HCH/ β -HCH 较高,则极有可能有新输入的工业 HCH,比值较低,则更有可能是历史残留^[12]. 研究区内大气中 α -HCH/ β -HCH 比值为 $0.184 \sim 82.8$,大部分地区的比值为在 1 ~ 3 之间,同时考虑到 α -HCH 的挥发性更强,总体环境中该比值会更低,表明研究区内的 HCHs 残留可能更多来自于禁用前的历史残留.

1991 年林丹 (Lindane, γ -HCH 含量 > 99%) 在中国开始使用,到 2000 年林丹在中国的使用量达 3200 t ^[22]. 在林丹中, γ -HCH 的含量在 99% 以上,因此如果环境中 α -HCH/ γ -HCH 的值小于 1,一般认为存在林丹的使用,如果比值大于 3,则认为来源

于工业 HCHs 的使用或历史残留。研究区内大气中 α -HCH/ γ -HCH 的值在 0.884 ~ 13.4 之间(均值为 4.03),推测研究区内大部分地区的 γ -HCH 很可能来自于工业 HCHs 的历史残留。但在兰州和金昌的城市点发现的 $\sum$ HCHs 高值,结合文献[22]关于林丹使用清单的研究和两地 γ -HCH 的浓度高值,推测这两个地区可能存在林丹的输入。

2.2.2 DDTs 的来源解析

DDTs 在施用后,小部分通过液滴飘浮于空气中,大部分将吸附于地表土壤或植物叶面上。董继元等[25]对 DDTs 在区域环境中的归趋行为进行了初步模拟,结果显示,土壤作为 DDTs 最主要的储库,占据了总残留量的 99% 以上。DDTs 进入环境后由于降解作用会逐渐转化为 DDEs(氧化条件下)和 DDDs(还原条件下)。一般来说,如果环境中 DDTs/DDEs 的值小于 1,表明来源于历史残留,如果比值大于 1,表明有新源的引入[14]。在研究区内大气中 p,p' -DDT/ p,p' -DDE 的值在 0.013 2 ~ 7.16 之间(均值为 0.914),但如果考虑到大气-地表交换作用的影响,大气中和土壤中 p,p' -DDT/ p,p' -DDE 的值之间的联系可由两种化合物的过冷饱和蒸气压来表示[26]:

$$R_{\text{air(a/b)}}/R_{\text{soil(a/b)}} = P_{\text{L(a)}}^0/P_{\text{L(b)}}^0 \quad (1)$$

式中, $R_{\text{air(a/b)}}$ 为大气中 2 种污染物 a 和 b 的比值, $R_{\text{soil(a/b)}}$ 为土壤中 2 种污染物的比值, $P_{\text{L(a)}}^0$ 和 $P_{\text{L(b)}}^0$ 分别代表 a 和 b 的过冷饱和蒸气压。

按照公式(1)可得出土壤中 p,p' -DDT/ p,p' -DDE 的值为 6.09,推断研究区内部分地区的 DDTs 可能来自新源的引入。

1970s 末我国开始生产和使用三氯杀螨醇,1983 年我国禁止工业 DDTs 在农业上的使用后,仍继续生产 DDTs,主要用于出口、公共卫生领域(如传播性病媒控制)、制造农药三氯杀螨醇(dicofol)和制造船舶防污涂料[12]。在生产三氯杀螨醇的合成反应中,有一部分 DDTs 会残留在产品中。在 1988 ~ 2002 年,中国共生产了近 40 000 t 三氯杀螨醇,并主要在中国使用[27]。三氯杀螨醇中残留的 DDTs 中 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 的值为 1.3 ~ 9.3,工业 DDTs 中该比值为 0.2 ~ 0.3,研究区内大气中 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 的值在 0.140 ~ 41.8 之间(均值为 3.36),结合公式(1)可得出土壤中 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 的值为 0.520,因此推断研究区内大部分地区 DDTs 很可能来自新的工业 DDTs 而非三氯杀螨醇

的引入。由于工业 DDTs 已被禁止在农业上的使用,其来源可能是在公共卫生中用于控制传播性病媒。但值得注意的是,根据 Qiu 等[27]的研究,在甘肃省存在三氯杀螨醇的使用。另外,在研究中发现部分采样点如酒泉市和安西县在春夏季节存在 o,p' -DDT 的高值,很可能来源于三氯杀螨醇的使用。

2.3 HCHs 和 DDTs 的空间分布特征

河西走廊和兰州地区各采样点(背景点除外) $\sum$ HCHs 的各季度平均大气浓度为 29.00 ~ 124.4 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 86.22 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,兰州背景和张掖背景的大气浓度分别为 53.23 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 55.59 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各采样点(背景点除外) $\sum$ DDTs 的各季度平均大气浓度为 18.32 ~ 60.59 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 34.06 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,兰州背景和张掖背景的大气浓度分别为 18.67 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 24.45 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

由图 2 和图 3 可以看出,酒泉、安西、张掖这 3 地的 HCHs 和 DDTs 浓度值较高,这和 3 个地区的耕地面积和历史使用量较大有关。资料显示,1984 年甘肃省在对上一年生产的小麦、玉米进行的抽样调查中,张掖有 11% 的小麦样品中 HCHs 含量超过国家标准,最高值达到 306 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,污染极为严重[28]。

在图 2 中可以看出,各采样点的 HCHs 浓度大致趋于相同,最高点浓度值仅是最低点浓度的 2.05 倍,最低点浓度值与背景点相差非常小。各采样点的 DDTs 及其类似物的浓度也大致趋于相同。究其原因,HCHs 和 DDTs 在禁用近 30 年后在小尺度空间范围内已逐渐达到平衡,即使部分地区可能存在

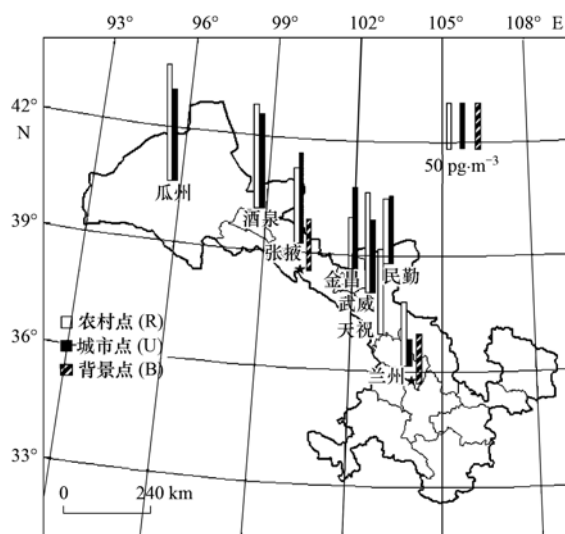


图 2 河西走廊和兰州地区大气中 $\sum$ HCHs 的各季度平均大气浓度

Fig. 2 Average concentration of $\sum$ HCHs in the atmosphere

新源的引入,仍更趋向于呈现面源污染的特征,因此各地区的受污染程度差别并不大.

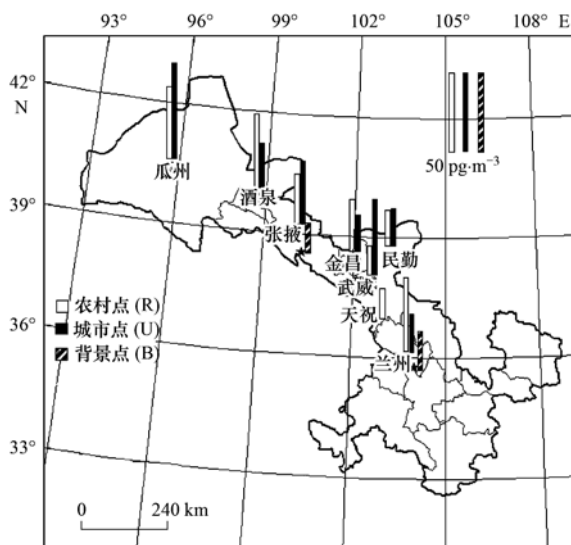


图3 河西走廊和兰州地区大气中 $\sum$ DDTs 的各季度平均大气浓度

Fig. 3 Average concentration of $\sum$ DDTs in the atmosphere

2.4 河西走廊和兰州地区人群对 HCHs 和 DDTs 的呼吸暴露

大气中的 HCHs 和 DDTs 能通过呼吸作用进入人体,对人体免疫、神经和生殖系统产生慢性毒理作用,Liu 等^[29]的研究发现大气的 DDTs 浓度与母乳中 DDTs 的浓度有较好的相关性 ($P < 0.01$). 河西走廊和兰州地区人群通过呼吸途径对 HCHs 和 DDTs 的长期日摄入量 (chronic daily intake) 可由公式(2)算出:

$$CDI_{i}^{air} = \frac{c_i \cdot IR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AL} \quad (2)$$

式中, c_i 取自本研究中 $\sum$ HCHs 和 $\sum$ DDTs 的平均浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); 本研究将研究对象定为 0~6 岁儿童 (敏感人群), 与暴露有关的各项行为模式和生理因子参数的取值均来源于 U. S. EPA 所推荐的儿童暴露参数^[30]: IR (inhalation rate) 为空气吸入速率 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), 取 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; ED (exposure duration) 为暴露时间 (a), 取 6 a; EF (exposure frequency) 为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), 取 $360 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; BW (body weight) 为体重 (kg), 取 16 kg; AL (average lifetime) 为平均寿命 (d), 取 $70 \times 365 \text{ d}$.

经计算可得河西走廊和兰州地区人群 (儿童) 通过呼吸途径对 HCHs 和 DDTs 的长期日摄入量和分别为 $2.210 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 8.694×10^{-4}

$\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 郭森等^[31]用类似方法计算的天津地区人群 (儿童) 对 HCHs 的呼吸暴露为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 比本研究结果高, 这主要与天津地区 HCHs 大气残留浓度较高有关. 尽管研究区人群 (儿童) 通过呼吸途径对 HCHs 和 DDTs 的长期日摄入量并不高, 但在部分地区的 HCHs 和 DDTs 高值及可能存在的新源引入, 仍可能会对人体健康造成不利影响.

3 结论

(1) 甘肃省河西走廊和兰州地区 HCHs 和 DDTs 在大气中均有检出, 但与国内外其它地区相比大气浓度相对较低.

(2) 河西走廊和兰州地区 HCHs 和 DDTs 均表现出了秋季大气浓度最高, 春季最低的季节特征.

(3) 研究区内各采样点的 HCHs 和 DDTs 大气浓度相差并不大, 说明在禁用近 30 年后, HCHs 和 DDTs 已在小尺度空间范围内逐渐分布均匀并达到平衡.

(4) 河西走廊和兰州地区人群通过呼吸途径对 HCHs 和 DDTs 的暴露水平较低, 但在部分地区, 大气中 HCHs 和 DDTs 仍可能会对人体健康造成不利影响.

参考文献:

- [1] Zhou P P, Zhao Y F, Li J G, *et al.* Dietary exposure to persistent organochlorine pesticides in 2007 Chinese total diet study[J]. *Environment International*, 2012, **42**: 152-159.
- [2] Behrooz R D, Barghi M, Bahramifar N, *et al.* Organochlorine contaminants in the hair of Iranian pregnant women [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(3): 235-241.
- [3] Burns J S, Williams P L, Sergeyev O, *et al.* Serum concentrations of organochlorine pesticides and growth among Russian boys [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, **120**(2): 303-308.
- [4] Çok I, Mazmanci B, Mazmanci M A, *et al.* Analysis of human milk to assess exposure to PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the vicinity Mediterranean city Mersin, Turkey[J]. *Environment International*, 2012, **40**: 63-69.
- [5] Yu H Y, Guo Y, Zeng E Y. Dietary intake of persistent organic pollutants and potential health risks via consumption of global aquatic products[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, **29**(10): 2135-2142.
- [6] Baek S Y, Choi S D, Chang Y S. Three-year atmospheric monitoring of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in polar regions and the South Pacific [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(10): 4475-4482.
- [7] Jiao L P, Zheng G J, Minh T B, *et al.* Persistent toxic

- substances in remote lake and coastal sediments from Svalbard, Norwegian Arctic: Levels, sources and fluxes[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1342-1351.
- [8] Sonne C, Wolkers H, Leifsson P S, *et al.* Organochlorine-induced histopathology in kidney and liver tissue from Arctic fox (*Vulpes lagopus*) [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(7): 1214-1224.
- [9] Su Y S, Hung H, Blanchard P, *et al.* Spatial and seasonal variations of hexachlorocyclohexanes (HCHs) and hexachlorobenzene (HCB) in the Arctic atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(21): 6601-6607.
- [10] 李向阳. 甘肃省有机氯农药清单及其归趋行为数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. 31-33.
- [11] 任婷. 兰州地区典型持久性有机污染物环境行为初探[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. 24-26.
- [12] 刘向. 利用被动采样技术研究中国城市大气中的可持续性有机污染物[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007. 88-89, 185-187, 189-192.
- [13] 张干, 刘向. 大气持久性有机污染物 (POPs) 被动采样[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2-3): 297-306.
- [14] Harner T, Shoeib M, Diamond M, *et al.* Using passive air samplers to assess urban-rural trends for persistent organic pollutants. 1. polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(17): 4474-4483.
- [15] Gouin T, Wania F, Ruepert C, *et al.* Field testing passive air samplers for current use pesticides in a tropical environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(17): 6625-6630.
- [16] Gouin T, Harner T, Blanchard P, *et al.* Passive and active air samplers as complementary methods for investigating persistent organic pollutants in the Great Lakes Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(23): 9115-9122.
- [17] Xiao H, Li N Q, Wania F. Compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for α -, β -, and γ -hexachlorocyclohexane[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2004, **49**(2): 173-185.
- [18] Shen L, Wania F. Compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for organochlorine pesticides[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2005, **50**(3): 742-768.
- [19] Pozo K, Harner T, Lee S C, *et al.* Assessing seasonal and spatial trends of persistent organic pollutants (POPs) in Indian agricultural regions using PUF disk passive air samplers [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 646-653.
- [20] Pozo K, Harner T, Lee S C, *et al.* Seasonally resolved concentrations of persistent organic pollutants in the global atmosphere from the first year of the GAPS study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **43**(3): 796-803.
- [21] Jaward F M, Zhang G, Nam J J, *et al.* Passive air sampling of polychlorinated biphenyls, organochlorine compounds, and polybrominated diphenyl ethers across Asia[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(22): 8638-8645.
- [22] Li Y F, Cai D J, Shan Z J, *et al.* Gridded usage inventories of technical hexachlorocyclohexane and Lindane for China with $1/6^\circ$ latitude by $1/4^\circ$ longitude resolution [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **41**(3): 261-266.
- [23] Li Y F, Cai D J, Singh A. Historical DDT use trend in China and usage data gridding with $1/4^\circ$ by $1/6^\circ$ longitude/latitude resolution[J]. *Advances in Environmental Research*, 1998, **2**(4): 497-506.
- [24] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000. 172-173.
- [25] 董继元, 王式功, 高宏, 等. 兰州地区 DDT 的环境多介质迁移和归趋模拟[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 519-522.
- [26] Kurt-Karakus P B, Bidleman T F, Staebler R M, *et al.* Measurement of DDT fluxes from a historically treated agricultural soil in Canada[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(15): 4578-4585.
- [27] Qiu X H, Zhu T, Yao B, *et al.* Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(12): 4385-4390.
- [28] 甘肃省志编纂委员会. 甘肃省志环境保护志[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2007. 127.
- [29] Liu X, Zhang G, Li J, *et al.* Seasonal patterns and current sources of DDTs, chlordanes, hexachlorobenzene, and endosulfan in the atmosphere of 37 Chinese cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(5): 1316-1321.
- [30] USEPA. EPA/600/P-95/002. Exposure factors handbook[R]. Washington DC: National Center for Environmental Assessment, 1997. 104-126.
- [31] 郭森, 陶澍, 杨宇, 等. 天津地区人群对六六六的暴露分析[J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 164-167.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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