

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

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:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	《环境科学》征稿简则(4166)
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	编辑征稿通知(4172)

太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析

廖小平, 张彩香*, 赵旭, 向青清, 李佳乐

(中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 采用气相色谱-电子捕获检测器(GC-ECD)方法分析了太原市小店污灌区 9 个土壤剖面中有机氯农药(OCPs)的垂直分布特征。结果表明, OCPs 主要积累在土壤上层 0~30 cm, 含量最大值为 98.56 ng·g⁻¹, 其中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)、硫丹(endosulfans)和甲氧滴滴涕(methoxychlor)为主要污染物质, 占总有机氯农药的 85.1%, 其它有机氯农药物质相对含量较少。绝大部分剖面土中 OCPs 含量随着深度增加而明显减少, β -HCH 和 DDE(*o,p'*-DDE + *p,p'*-DDE)在 HCH 农药和 DDT 农药中占主要成分。组分分析表明, 清灌区和沼泽区中最近可能有新的 DDT 源输入, 其它剖面土中 HCH 和 DDT 主要来自历史使用残留。研究区内绝大部分土壤为粉砂壤土; 污灌区和清灌区中 $\sum$ OCPs 含量与总有机碳(TOC)均表现出明显正相关性, 但沼泽区和背景点与 TOC 相关性不显著。

关键词: 污灌区; 剖面土; 有机氯农药; 垂直分布; 来源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4263-07

Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City

LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, XIANG Qing-qing, LI Jia-le

(State Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

Abstract: Nine profile soil samples were collected from Xiaodian sewage irrigation area in Taiyuan city, and the concentrations of organochlorine pesticides (OCPs) were determined by gas chromatography coupled with electron capture detector (GC-ECD) to analyze the vertical distribution. The results showed that the OCPs were mainly accumulated in the surface soil layer (0-30 cm) with the maximum concentration of 98.56 ng·g⁻¹, and HCHs, DDTs, endosulfans and methoxychlor were the predominant contaminants compared with other pesticides in the surface soil, which accounted for 85.1% in total OCPs. The concentrations of OCPs were clearly decreased with the increasing of the depth to the top layer in the most profile soils. β -HCH and DDE (sum of *o,p'*-DDE and *p,p'*-DDE) were the main contaminants in HCH pesticides and DDT pesticides, respectively. Composition analysis indicated that new DDT sources might be introduced into the groundwater irrigation and swamp area recently, and the main source of HCHs and DDTs was the residual of history use in other areas. Most profile soils were defined silt loam in study area. The correlations between the concentration of $\sum$ OCPs and the total organic carbon (TOC) were positively significant in sewage irrigation area and groundwater irrigation area, but they were not significantly correlated in swamp area and background area.

Key words: sewage irrigation area; profile soil; organochlorine pesticides; vertical distribution; source

在全球范围内有机氯农药(OCPs)曾被广泛使用^[1-3], 尽管当前绝大多数有机氯农药被禁止使用^[4,5], 但由于其在环境中具有高持久性、生物富集性和长距离迁移的特征^[6,7], 至今在世界各地土壤中仍有大量残留有机氯农药被检测出来^[8-11]。同时在一定条件下土壤可能作为二次污染源将污染物质释放到环境中^[12], 从而对周边环境和人类产生一定影响。因此, 了解土壤中有机氯农药含量和分布对土地的合理运用必不可少。

太原市小店区位于太原盆地中南部, 市区东南端, 农业生产是该区域土地主要利用方式。由于该地区属于水资源严重缺乏区域, 污水灌溉成为缓解当地农业用水的有效途径, 至今已有 30 a 的历史, 导致该地区的土壤污染。近年来, 尽管国

内一些学者对该地区土壤中重金属和多环芳烃等相关污染状况已做了大量的调查工作^[13-16], 但对太原市污灌区深层土壤中有机氯农药污染的研究较少。

因此本研究以太原市小店污灌区土壤为对象, 调查和评价太原市小店区土壤剖面中 OCPs 残留浓度水平及分布特征, 同时分析污水灌溉对剖面土中 OCPs 分布影响。

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972156); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 廖小平(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机污染物环境化学, E-mail: Liaoxiao_p@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: Caixiangzhang@yahoo.com

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据太原市小店区地理特征和灌溉渠分布特点,于2010年8月在研究区域共选取9个剖面土采样点(图1).区域中主要有3条污水灌溉渠,分别为:东干渠、北张退水渠和太榆退水渠.9个剖面土定义为4种不同区域,其中清灌区(GS-6)位于小店区东面,采用地下水灌溉;沼泽区(GS-5)位于汾河岸边,受汾河水影响较大;背景点(GS-9)位于小店高山地区,采用雨水灌溉;其它剖面土均位于污灌区.土样采集分为8个层位:0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~70、70~80和90~110 cm.利用洛阳铲采集土样,为避免交叉污染,采集的土壤去除浮土,然后装入事先洗净并烘干的铝盒中,用封口膜密封保存.所有样品被立即送到实验室,放入冰箱-4℃冷冻保存,一周内进行处理和分析.

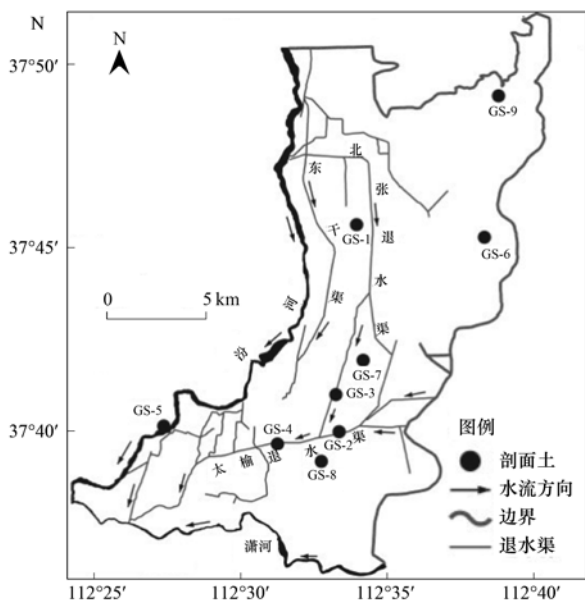


图1 研究区域剖面土采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites and the study area

1.2 土样预处理

准确称取自然风干的样品($10\text{ g} \pm 0.02\text{ g}$)放入事先用二氯甲烷抽提过的滤纸中,并加入少量烘干的无水硫酸钠和回收率指示剂(四氯间二甲苯和十氯联苯)20 ng,随后放入索氏抽提器中.抽提器平底烧瓶中加入二氯甲烷试剂120 mL和已经活化好的铜片数片,抽提24 h,并保证每小时抽提1次.抽提完后,加入少许无水硫酸钠除去溶液中残余水分.利用旋转蒸发器(瑞士Buchi公司, Rotavapor R-210)在恒温水浴(40℃)下用正己烷替换浓缩至

3 mL,转移至事先用正己烷活化的硅胶/氧化铝(体积比为2:1)层析柱净化,洗脱溶液为二氯甲烷与正己烷(体积比为2:3)混合液.洗脱液浓缩至0.5 mL,并用正己烷转移至棕色细胞瓶中.上机前用氮吹仪(美国,EFCG-11155-DA)浓缩至0.25 mL之后,加入内标物(五氯硝基苯,PCNB)20 ng.

1.3 测试方法和主要试剂

TOC含量:LiquiTOC总有机碳分析仪(德国,Elementar),上样前在土壤中加入一定量HCl,去除无机碳,烘干待测;粒度分析:LS230全自动激光粒度分析仪(美国,Beckman Coulter);OCPs含量:Agilent HP6890气相色谱仪(美国,Agilent).

色谱柱为DB-5石英毛细管柱($30\text{ m} \times 0.32\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$);载气为高纯 N_2 ,待测样品以不分流方式进样2 μL ,进样口温度290℃,检测器温度300℃;升温程序为:100℃保持1 min,以4℃·min⁻¹升至200℃,2℃·min⁻¹升至230℃,再以8℃·min⁻¹升至280℃,保持15 min.

主要试剂及处理:有机氯农药标准物质由24种有机氯农药(α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、*o*,*p*'-DDE、*p*,*p*'-DDE、*o*,*p*'-DDD、*p*,*p*'-DDD、*o*,*p*'-DDT、*p*,*p*'-DDT、 α -endosulfan、 β -endosulfan、endosulfan-sulfate、*trans*-chlordan、*cis*-chlordan、HCB、aldrin、endrin、dieldrin、heptachlor、heptachlor-epoxide、*trans*-nonchlor、*cis*-nonchlor、methoxychlor)组成的混标;回收率指示剂为2,4,5,6-四氯间二甲苯(TCMX)和十氯联苯(PCB209);内标化合物为五氯硝基苯(PCNB);上面提及的农药标准试剂均购自美国Ultra Scientific公司.硅胶(青岛海洋化工厂分厂,分析纯),活化条件为:180℃,12 h;氧化铝(国药集团化学试剂有限公司,分析纯),活化条件为:240℃,12 h;无水硫酸钠(天津市福晨化学试剂厂,分析纯),450℃烘焙4 h;氮气(武钢氧气气瓶检验厂,99.99%);二氯甲烷、正己烷、丙酮(美国TEDIA公司,农残级).

1.4 质量保证与质量控制(QA/QC)

化合物含量通过内标法定量,用配制的10、20、50、100、150、200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 标准系列,6点校正曲线法进行,经过线性回归得到各自的线性方程,相关系数 R 均大于0.99.依据信噪比(S/N)为3,OCP检测限范围为0.001~0.005 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$.样品中TCMX和PCB209回收率范围分别为67%~102%和65%~112%.预处理15个样时,做一个方法空白,以检验分析过程中引起的

污染,结果表明空白样中均没有检测到目标化合物;对 Agilent 色谱工作站进行日校正,分析有机氯农药标准物质($100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),所有样品都经过回收率校正和仪器校正.

2 结果与讨论

2.1 表层土中有机氯含量分布

表 1 为 9 个采样点地表土(0 ~ 10 cm)中有机氯农药含量,在所有表层土中 24 种有机氯农药物质均被检测到,表明该研究区域内有机氯农药普遍存在.总有机氯含量(24 种)在地表土中范围为 $13.49\sim98.56\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $36.76\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 其中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)、硫丹(endosulfans)和甲氧滴滴涕(methoxychlor)为有机氯农药中主要成分

(DDTs 含量最高),上述物质含量占总有机氯农药百分比范围为 $57.4\%\sim96.4\%$,平均值为 85.1% . 其它物质含量相对较小,其中反式氯丹(*cis*-chlordan)、七氯(包含 heptachlor 和 heptachlor-epoxide)、狄氏剂(dieldrin)、异狄氏剂(endrin)和九氯(包括 *trans*-nonachlor 和 *cis*-nonachlor)含量均没有超过 $1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 通过比较不同灌溉区域地表土中有机氯含量发现,污灌区和清灌区中 HCHs 和 DDTs 含量都要明显高于背景点中含量,表明人类活动对该区域表土中 OCPs 分布有一定的影响. 清灌区(GS-6)地表土中有机氯农药主要成分(HCHs、DDTs、硫丹和甲氧滴滴涕)含量高于污灌区部分剖面土中含量,有些甚至高出 1 个数量级,可能是由于清灌区内集约化种植蔬菜导致大量有机氯农药残留^[17].

表 1 9 个采样点中地表土中有机氯含量¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Concentration of organochlorine pesticides in the surface soil of the nine sampling sites/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

有机氯农药	GS-1 ^a	GS-2 ^a	GS-3 ^a	GS-4 ^a	GS-5 ^b	GS-6 ^c	GS-7 ^a	GS-8 ^a	GS-9 ^d	平均值
HCHs ²⁾	3.06	2.03	4.47	6.65	1.81	4.59	7.99	11.64	1.76	4.89
DDTs ³⁾	6.16	2.97	4.33	77.93	28.91	11.12	9.57	6.94	2.70	16.74
endosulfans ⁴⁾	11.92	0.55	0.24	1.23	4.57	0.71	0.36	1.00	1.88	2.50
<i>trans</i> -chlordan	1.39	2.35	1.67	0.42	1.46	1.70	1.66	0.24	1.60	1.39
<i>cis</i> -chlordan	0.06	0.07	0.09	0.19	0.05	0.28	0.22	0.19	0.01	0.13
HCB	0.73	0.51	1.23	0.85	1.88	4.42	0.59	1.55	0.28	1.34
aldrin	0.17	2.37	1.24	1.53	0.26	0.36	2.93	3.17	1.61	1.52
heptachlor	0.55	0.54	0.32	0.20	0.84	0.41	1.04	0.03	0.16	0.45
heptachlor-epoxide	0.07	0.08	0.01	0.05	0.13	nd	0.02	0.01	0.07	0.06
<i>trans</i> -nonachlor	0.08	0.17	0.24	0.11	0.13	0.02	0.05	0.55	0.22	0.17
<i>cis</i> -nonachlor	0.59	0.10	0.09	0.14	0.48	0.43	0.28	0.05	0.15	0.26
dieldrin	0.25	0.05	0.01	0.01	0.04	0.03	0.05	0.03	0.01	0.05
endrin	0.35	0.10	0.02	0.06	0.08	0.05	0.05	0.07	0.03	0.09
methoxychlor	6.12	2.80	4.48	9.19	7.14	10.75	5.49	15.61	2.99	7.17
$\sum\text{OCPs}$	31.49	14.89	18.43	98.56	47.78	34.88	30.29	41.07	13.49	36.76

1) a;污灌点(污水灌溉); b;沼泽区(汾河岸边); c; 清灌点(地下水灌溉); d;背景点(雨水灌溉); 2) HCHs = α -HCH + β -HCH + γ -HCH + δ -HCH; 3) DDTs = o,p' -DDE + p,p' -DDE + o,p' -DDD + p,p' -DDD + o,p' -DDT + p,p' -DDT; 4) endosulfans = α -endosulfan + β -endosulfan + endosufan-sulfate

2.2 剖面土中有机氯含量分布

2.2.1 剖面土中 OCPs 含量分布与土壤理化性质

图 2 为研究区内总有机氯农药($\sum\text{OCPs}$)含量在 9 个剖面土中(0 ~ 110 cm)垂直分布特征,可以看出绝大部分剖面土中(除了 GS-5 和 GS-6),随着深度的增加, $\sum\text{OCPs}$ 浓度逐渐下降,最后趋于稳定. 有机氯含量变化最剧烈部位主要位于 0 ~ 50 cm 土层中,可能是由于频繁的耕作行为和降水渗透过程所导致. GS-5 剖面土中 $\sum\text{OCPs}$ 含量变化最复杂,可能与该点处于汾河边,水岩交换作用比较频繁,长期受到汾河水质影响所致.

图 3 为部分剖面土中粒度和 TOC 含量分布. 土壤粒度分析表明,靠近汾河沼泽区(GS-5)砂粒含量最大(67.3%); GS-4、GS-6 和 GS-9 剖面土中,粉

砂粒所占比例分别为 74.9%、72.2% 和 71.4%. 根据美国土壤质地分类法,上述剖面土中绝大部分土壤为粉砂壤土. 由图 3 可以看出,GS-4 和 GS-9 剖面土中,随着深度增加,TOC 含量逐渐减少;而 GS-5 和 GS-6 剖面土中,TOC 含量变化相对较复杂. 污灌区(GS-4)表层土壤(0 ~ 10 cm)中 TOC 含量最高,所占比例为 2.26%,可能与灌溉污水含有大量有机质有关,同时发现该层土壤 $\sum\text{OCPs}$ 含量达到最大,含量为 $98.56\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 通过统计分析表明,污灌区(GS-4)和清灌区(GS-6)剖面土中 $\sum\text{OCPs}$ 与 TOC 表现出较高的正相关性($r = 0.984$, $P = 0.0004$; $r = 0.857$, $P = 0.029$),而沼泽区(GS-5)与背景点(GS-9)中 $\sum\text{OCPs}$ 含量与 TOC 相关性不够明显.

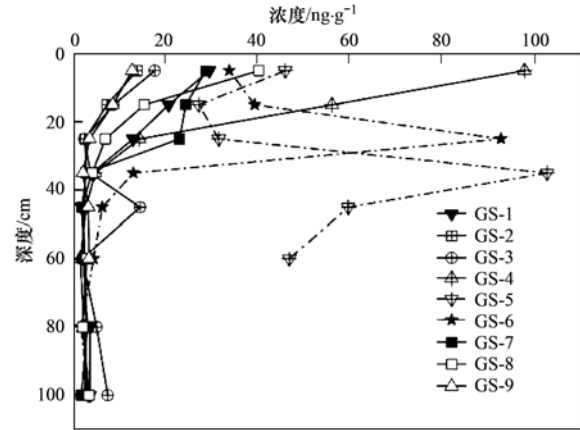


图2 有机氯农药总浓度在剖面土深度上分布特征

Fig. 2 Distribution of total OCPs in profile soils versus depth

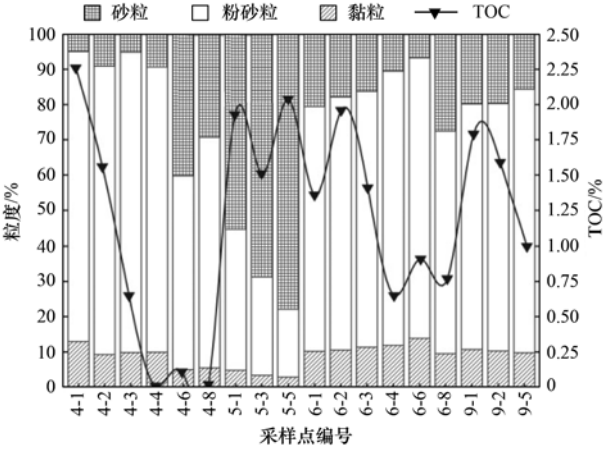


图3 部分剖面土中粒度分布和总有机碳含量

Fig. 3 Distribution of granularity and the concentration of total organic carbon in part of the profile soils

2.2.2 剖面土中 HCH 和 DDT 农药垂直分布特征

图4 为剖面土中 HCH 的 4 种异构体垂直分布特征. 可以看出,在不同区域中 HCHs (α -HCH + β -

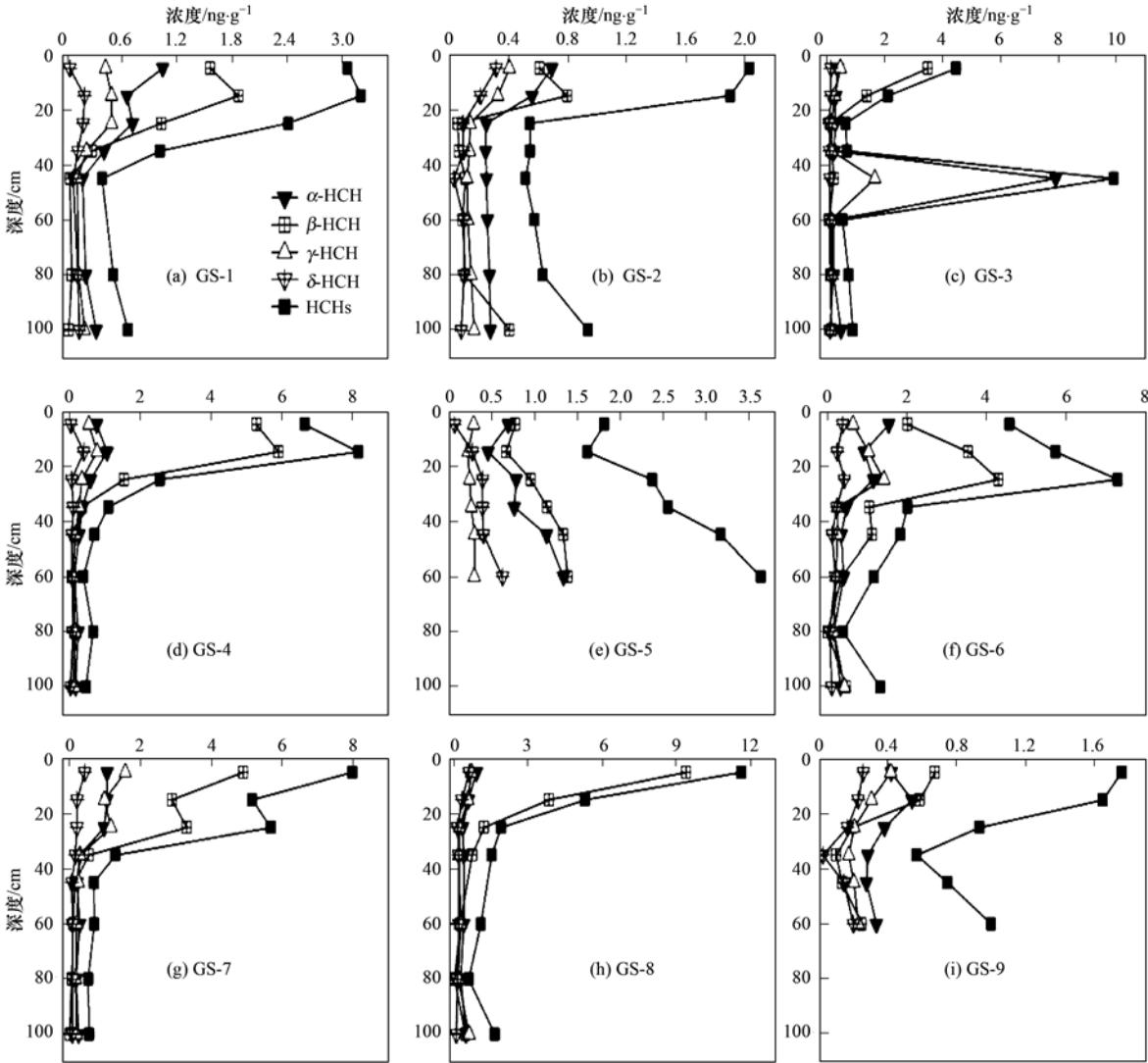


图4 采样点剖面土中六六六异构体垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of HCH isomers in the profile soils of the sampling sites

HCH + γ -HCH + δ -HCH) 含量随着深度增加, 变化趋势差别较大. 污灌区中高浓度 HCHs 主要集中于表层土壤中, 随着深度降低含量逐渐减少直至趋于稳定; 清灌区 (GS-6) 中 HCHs 含量变化与污灌区显著不同表现为先增大后急剧减少至稳定, 在 20 ~ 30 cm 层位中达到最大值 ($7.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$); 沼泽区 (GS-5) 中 HCHs 含量随着深度的降低不断增加, 可能与该剖面处于汾河岸边, 水岩交互作用较强导致土壤中黏粒含量较少有关^[18].

如图 4 所示, 剖面土中 HCHs 含量变化主要集中于 0 ~ 40 cm 层位, 可能与频繁的农耕行为和间歇式灌溉有关^[18]. 4 种异构体含量顺序依次为 β -HCH > α -HCH > γ -HCH > δ -HCH, 该结果与实际环境中 HCH 异构体脱氯降解速率 (γ -HCH > α -HCH > δ -HCH > β -HCH) 事实基本一致^[19]; 其中 β -HCH 占主导成分, 主要是由于其特殊化学结构, 导致其在环境

中很难被水解和微生物降解^[20].

图 5 为剖面土中 DDT 农药垂直分布特征. 总体上, $\sum$ DDTs 浓度随着深度增加而急剧减少 (0 ~ 30 cm), 最后趋于稳定. 在不同剖面土中, DDT 农药降解产物 (DDD 和 DDE) 含量差别较大, 即使在同一剖面土中 (GS-6) 不同深度 DDD 和 DDE 含量也有较大差别. 污灌区中 DDTs 农药含量变化方式与 HCHs 一致; 清灌区 (GS-6) 中 DDTs 含量变化形式与 HCHs 相同 ($r = 0.829$, $P = 0.011$), 同样在 20 ~ 30 cm 层位处出现明显驼峰.

大部分剖面土中, 表土层 (0 ~ 30 cm) DDE 含量占优势, 下层土壤主要为 DDD, 可能是由于上层土壤通气性能好, 微生物主要进行好氧降解, 导致 DDT 更易转化为 DDE, 随着深度增加, 通气性逐渐降低, DDT 主要降解为 DDD^[21,22].

2.2.3 剖面土中有机氯来源分析

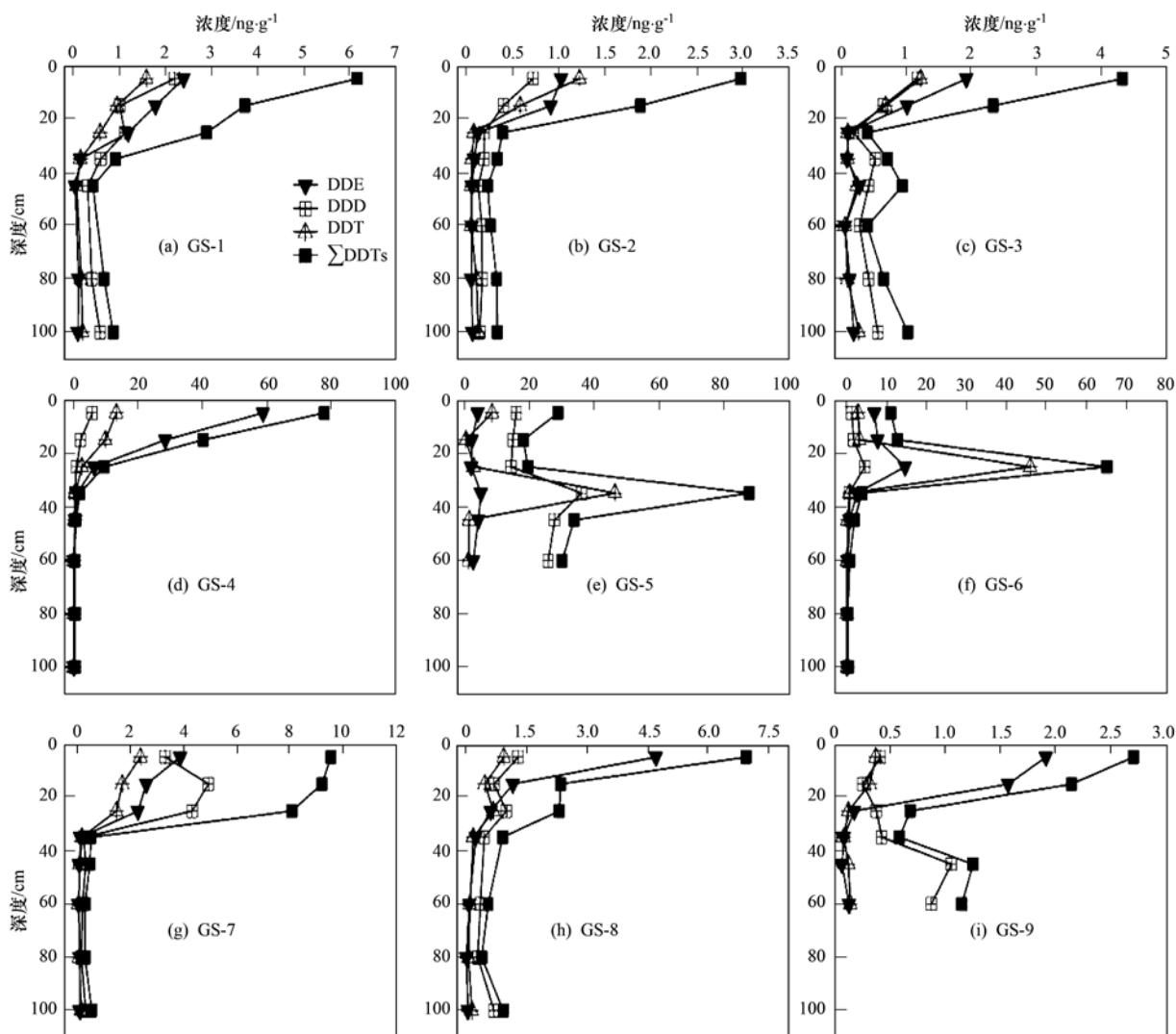


图 5 采样点剖面土中 DDT 农药垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distribution of DDTs in the profile soils of the sampling sites

研究 HCH 农药各异构体比值,可以判断环境中 HCH 农药的来源^[23,24]. 表 2 为 HCH 农药各异构体在剖面土中的含量及其比值,可以看出 β -HCH 为剖面土中主要成分; α -HCH/ γ -HCH 比值均低于工业 HCH 中比值(4 ~ 7),表明该区域剖面土中残留 HCH 农药主要来自历史上工业 HCH 和林丹使用残留. 污灌区 GS-3 剖面 40 ~ 50 cm 土层处, $\sum$ HCHs 含量突然增大主要是 α -HCH 和 γ -HCH 含量有所增加,导致 α -HCH/ γ -HCH 比值增大(4.76),表明该处可能存在新的工业 HCH 源.

表 3 为剖面土中 DDT 农药代谢物含量及其各组分比值. 根据 DDT 农药各代谢物与母体化合物比值可以推断环境中 DDT 来源以及推断农药土壤环境的时间长短^[25,26]. 如果 DDT/(DDE + DDD)

<1,表明土壤中 DDT 农药主要来自于历史使用残留,值越小说明使用的年代越久远. 如表 3 所示,只有剖面土 GS-5 和 GS-6 中存在比值 >1 的点,表明该研究区域土壤中 DDT 农药主要来自于历史使用残留. GS-5 剖面 30 ~ 40 cm 土层中,DDT/(DDE + DDD) 比值为 1.12, DDT 含量高达 46.46 ng·g⁻¹; GS-6 剖面土 20 ~ 30 cm 土层中,DDT/(DDE + DDD) 比值为 2.40, DDT 含量为 46.03 ng·g⁻¹,表明 GS-5 和 GS-6 土壤中最近有新的 DDT 源输入. o,p' -DDT/ p,p' -DDT > 1.3 的点分布在 GS-3、GS-6 和 GS-7 剖面土中,但这些点主要位于剖面土底层土壤中,并且 o,p' -DDT 和 p,p' -DDT 含量都非常小,推断该区域内较少使用三氯杀螨醇农药^[27,28].

表 2 剖面土中 HCH 异构体含量和 α -HCH/ γ -HCH 比值/ng·g⁻¹
Table 2 Concentration of HCH isomers and the ratios of α -HCH/ γ -HCH in profile soils/ng·g⁻¹

采样点	α -HCH /ng·g ⁻¹	β -HCH /ng·g ⁻¹	γ -HCH /ng·g ⁻¹	δ -HCH /ng·g ⁻¹	$\sum$ HCHs /ng·g ⁻¹	α -HCH/ γ -HCH
GS-1	0.17 ~ 1.05	0.02 ~ 1.87	0.11 ~ 0.49	0.03 ~ 0.19	0.39 ~ 3.21	1.35 ~ 2.47
GS-2	0.25 ~ 0.69	0.06 ~ 0.80	0.12 ~ 0.41	0.03 ~ 0.32	0.52 ~ 2.03	1.65 ~ 2.09
GS-3	0.23 ~ 7.91	0.08 ~ 3.49	0.13 ~ 1.66	0.08 ~ 0.22	0.54 ~ 9.92	0.78 ~ 4.76
GS-4	0.15 ~ 1.07	0.07 ~ 5.91	0.10 ~ 0.78	0.03 ~ 0.41	0.39 ~ 8.17	1.18 ~ 1.70
GS-5	0.45 ~ 1.33	0.67 ~ 1.38	0.22 ~ 0.30	0.07 ~ 0.62	1.61 ~ 3.64	2.07 ~ 4.54
GS-6	0.16 ~ 1.55	0.01 ~ 4.31	0.16 ~ 1.42	0.05 ~ 0.42	0.39 ~ 7.31	0.77 ~ 2.41
GS-7	0.20 ~ 1.07	0.01 ~ 4.91	0.18 ~ 1.58	0.07 ~ 0.44	0.53 ~ 7.99	0.67 ~ 1.40
GS-8	0.28 ~ 0.90	0.02 ~ 9.41	0.17 ~ 0.71	0.10 ~ 0.61	0.6 ~ 11.64	0.79 ~ 2.04
GS-9	0.27 ~ 0.54	0.10 ~ 0.67	0.14 ~ 0.42	0.02 ~ 0.25	0.57 ~ 1.76	1.00 ~ 1.88

表 3 剖面土中 DDT 农药代谢物含量及各组分比例
Table 3 Concentration of metabolites for DDT pesticides and the compositional ratios

采样点	DDE(o,p' -DDE + p,p' -DDE) /ng·g ⁻¹	DDD(o,p' -DDD + p,p' -DDD) /ng·g ⁻¹	DDT(o,p' -DDT + p,p' -DDT) /ng·g ⁻¹	$\sum$ DDTs (DDE + DDD + DDT) /ng·g ⁻¹	DDT/ (DDE + DDD)	o,p' -DDT/ p,p' -DDT
GS-1	0.05 ~ 2.39	0.31 ~ 2.19	0.06 ~ 1.58	0.42 ~ 6.16	0.18 ~ 0.34	0.11 ~ 0.55
GS-2	0.05 ~ 1.02	0.13 ~ 0.72	0.05 ~ 1.22	0.23 ~ 2.97	0.20 ~ 0.70	0.08 ~ 1.07
GS-3	0.07 ~ 1.93	0.19 ~ 1.18	0.06 ~ 1.23	0.40 ~ 4.33	0.17 ~ 0.41	0.09 ~ 4.47
GS-4	0.08 ~ 58.88	0.15 ~ 5.77	0.06 ~ 13.29	0.31 ~ 77.93	0.21 ~ 0.35	0.27 ~ 1.23
GS-5	2.23 ~ 5.18	14.50 ~ 36.14	0.62 ~ 46.46	18.19 ~ 87.78	0.04 ~ 1.12	0.03 ~ 0.75
GS-6	0.07 ~ 14.65	0.19 ~ 4.51	0.06 ~ 46.03	0.32 ~ 65.19	0.22 ~ 2.40	0.02 ~ 1.86
GS-7	0.04 ~ 3.88	0.14 ~ 4.94	0.05 ~ 2.38	0.28 ~ 9.57	0.22 ~ 0.43	0.23 ~ 1.77
GS-8	0.03 ~ 4.70	0.30 ~ 1.30	0.07 ~ 0.94	0.40 ~ 6.94	0.16 ~ 0.42	0.14 ~ 0.62
GS-9	0.07 ~ 1.91	0.25 ~ 1.06	0.08 ~ 0.37	0.59 ~ 2.70	0.11 ~ 0.23	0.29 ~ 0.79

3 结论

(1)所有剖面土表层土壤中 24 种有机氯农药均被检测到,表明研究区内有机氯农药普遍存在,其中 HCH、DDT、甲氧滴滴涕以及硫丹为主要有机氯农药,占总有机氯含量的 85%,其它物质包括氯丹、九氯、艾氏剂、荻氏剂和六氯苯等有机氯农药含量

相对较少.

(2)污灌区和清灌区中 $\sum$ OCPs 含量均要大于背景点中含量,沼泽区 $\sum$ OCPs 含量受汾河影响较大;污灌区和清灌区中 $\sum$ OCPs 含量与 TOC 表现出明显正相关性,但沼泽区和背景点与 TOC 相关性不显著.

(3) 研究区剖面土中, HCH 农药和 DDT 农药含量随着深度增加逐渐减少直至趋于平衡, 但污灌区和清灌区中有机氯农药变化形式显著不同. 大部分剖面土中, β -HCH 占主要成分; 上层土壤 (0 ~ 30 cm) DDE 含量占优势, 随着深度降低, DDD 含量逐渐增大.

(4) 研究区内 HCH 农药主要来自历史上工业 HCH 和林丹使用残留; DDT 农药主要是历史上工业 DDT 使用残留, 三氯杀螨醇农药在研究区内较少使用. 但在沼泽区 (GS-5) 和清灌区 (GS-6) 内最近有新的 DDT 源输入.

(5) 由于污灌区有机氯含量在剖面土中分布特征与清灌区和沼泽区明显不同, 所以有必要对研究区内灌溉废水和汾河水质以及土壤理化性质作进一步全面分析, 以便更深层次理解有机氯农药在污灌区土壤中迁移行为路径.

参考文献:

- [1] Gonzalez M, Miglioranza K S B, Aizpún J E, *et al.* Assessing pesticide leaching and desorption in soils with different agricultural activities from Argentina (Pampa and Patagonia) [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(3): 351-358.
- [2] Li Y F, Mcmillan A, Scholtz M T. Global HCH usage with 1° × 1° longitude/latitude resolution [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(12): 3525-3533.
- [3] 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 and Technology*, 2006, **40**(15): 4578-4585.
- [4] Li Y F, Cai D J, Shan Z J, *et al.* Gridded usage inventories of technical hexachlorocyclohexane and lindane for China with 1/6° latitude by 1/4° longitude resolution [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **41**(3): 261-266.
- [5] Heberer T, Dünbnier U. DDT metabolite Bis (Chlorophenyl) acetic acid: the neglected environmental contaminant [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(14): 2346-2351.
- [6] Wania F, Mackay D. Peer reviewed: tracking the distribution of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(9): 390A-396A.
- [7] Li Y F, Macdonald R W. Sources and pathways of selected organo-chlorine pesticides to the Arctic and the effect of pathway divergence on HCH trends in biota: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **32**(1-3): 87-106.
- [8] Li X H, Zhu Y F, Liu X F, *et al.* Distribution of HCHs and DDTs in soils from Beijing City, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **51**(3): 329-336.
- [9] Yang R Q, Lü A H, Shi J B, *et al.* The levels and distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from the Haihe River, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(3): 347-354.
- [10] Jiang Y F, Wang X T, Jia Y, *et al.* Occurrence, distribution and possible sources of organochlorine pesticides in agricultural soil of Shanghai, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **170**(2-3): 989-997.
- [11] Aigner E J, Leone A D, Falconer R L. Concentrations and enantiomeric ratios of organochlorine pesticides in soils from the U. S. corn belt [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(9): 1162-1168.
- [12] Zheng X Y, Liu X D, Liu W J, *et al.* Concentrations and source identification of organochlorine pesticides (OCPs) in soils from Wolong Nature Reserve [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(5): 743-751.
- [13] 张乃明, 李保国, 胡克林. 太原污灌区土壤重金属和盐分含量的空间变异特征 [J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(3): 349-353.
- [14] 张乃明, 邢承玉, 贾润山, 等. 太原污灌区土壤重金属污染研究 [J]. *农业环境保护*, 1996, **15**(1): 21-23.
- [15] 孙强, 马腾, 祁志冲, 等. 污水灌溉区包气带中重金属元素空间分布特征——以太原市某污水灌溉区为例 [J]. *地质科技情报*, 2010, **29**(3): 86-90.
- [16] 杜斌, 龚娟, 李佳乐. 太原市污水灌溉对水土环境的有机污染研究 [J]. *人民长江*, 2010, **41**(17): 58-61.
- [17] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海崇明岛农田土壤中有有机氯农药残留特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2455-2461.
- [18] 金爱芳, 何江涛, 陈素媛, 等. 北京东南郊污灌区土壤有机氯农药的垂向分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(9): 1970-1977.
- [19] Wang X J, Piao X Y, Chen J, *et al.* Organochlorine pesticides in soil profiles from Tianjin, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(9): 1514-1520.
- [20] Zhou Y, Wang Y X, Zwahlen F, *et al.* Organochlorine pesticide residues in the environment of central Jiangnan plain, China [J]. *Environmental Forensics*, 2011, **12**(1): 106-119.
- [21] Pereira W E, Hostettler F D, Rapp J B. Distributions and fate of chlorinated pesticides, biomarkers and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments along a contamination gradient from a point-source in San Francisco Bay, California [J]. *Marine Environmental Research*, 1996, **41**(3): 299-314.
- [22] Gong Z M, Tao S, Xu F L, *et al.* Level and distribution of DDT in surface soils from Tianjin, China [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(8): 1247-1253.
- [23] Kim S K, Oh J R, Shim W J, *et al.* Geographical distribution and accumulation features of organochlorine residues in bivalves from coastal areas of South Korea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **45**(1-2): 268-279.
- [24] Sun K, Zhao Y, Gao B, *et al.* Organochlorine pesticides and poly-brominated diphenyl ethers in irrigated soils of Beijing, China: Levels, inventory and fate [J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(9): 1199-1205.
- [25] 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.
- [26] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2713-2722.
- [27] Qiu X H, Zhu T, Yao B, *et al.* Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(12): 4385-4390.
- [28] Zhang J Q, Qi S H, Xing X L, *et al.* Organochlorine pesticides (OCPs) in soils and sediments, southeast China: a case study in Xinghua Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(6): 1270-1275.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行