

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	吴菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险

张石磊, 薛南冬*, 杨兵, 李发生, 陈宣宇, 刘博, 孟磊

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 分析了某污染场地挖掘过程中场地内及其周边空气中 HCHs 和 DDTs 的污染物分布特征; 应用健康风险评价模型研究了挖掘场地附近居民区经呼吸暴露途径的致癌和非致癌风险。结果表明, 挖掘区附近居民区空气中 HCHs 和 DDTs 呈现出明显的季节分布特征, 秋冬季节浓度高, 春夏季节浓度较低。∑ HCHs 冬季浓度在 5.65 ~ 133 ng·m⁻³ 之间, 均值为 28.6 ng·m⁻³; ∑ DDTs 冬季浓度在 4.48 ~ 2 800 ng·m⁻³ 之间, 均值为 457.3 ng·m⁻³。∑ HCHs 春季浓度在 6.23 ~ 26.4 ng·m⁻³ 之间, 均值为 15.1 ng·m⁻³; ∑ DDTs 夏季浓度在 3.17 ~ 8.1 ng·m⁻³ 之间, 均值为 6.1 ng·m⁻³, 春夏季节施工可减少二次污染产生。居民区空气中 HCHs 和 DDTs 浓度与离地面高度呈显著负相关 ($P < 0.05$, $n = 33$)。挖掘区附近成人居民经呼吸暴露产生的致癌风险及非致癌风险在可接受风险范围内, 但挖掘过程对幼年居民产生一定的致癌及非致癌风险。因此, 该类污染场地挖掘过程中应采取措施抑制挖掘区污染物向空气扩散, 以降低风险。

关键词: HCHs; DDTs; 挖掘; 分布; 健康风险评价

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0686-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.041

Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation

ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong*, YANG Bing, LI Fa-sheng, CHEN Xuan-yu, LIU Bo, MENG Lei

(State Key laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Air samples were collected to analyze the distribution of HCHs and DDTs around a contaminated site during its excavation. The carcinogenic risks and non-carcinogenic risks through breath exposure were studied by health risk assessment modes. The results showed that, there was an obvious seasonal variation of HCHs and DDTs in air around the excavating area. The concentrations of HCHs and DDTs were higher in winter and autumn, lower in spring and summer. The ∑ HCHs concentration ranged from 5.65 ng·m⁻³ to 133 ng·m⁻³, and the average value was 28.6 ng·m⁻³; ∑ DDTs concentration ranged from 4.48 ng·m⁻³ to 2 800 ng·m⁻³, and the average value was 457.3 ng·m⁻³ in winter. However, the ∑ HCHs concentration was between 6.23 ng·m⁻³ and 26.4 ng·m⁻³, and the average value was 15.1 ng·m⁻³ in spring; the ∑ DDTs concentration was between 3.17 ng·m⁻³ and 8.1 ng·m⁻³, and the average value was 6.1 ng·m⁻³ in summer. So the pollution could be reduced by excavating in spring and summer. The concentrations of HCHs and DDTs in the residents area were negatively correlated to the height ($P < 0.05$, $n = 33$). The carcinogenic and non-carcinogenic risks of adult residents through respiration to residents near the excavating area were lower than the acceptable level, while the excavating process caused carcinogenic and non-carcinogenic risks to young residents to some extent. In order to decrease the risks, measures should be taken to restrain the pollutants in the excavation area diffusing into the air.

Key words: HCHs; DDTs; excavation; distribution; health risk assessment

六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)是曾被广泛使用的有机氯杀虫剂^[1,2], 由于它们具有较强的神经和生殖毒性^[3], 并能引发癌症^[4,5], 严重威胁人类健康, 中国于 1980s 先后禁止生产和使用。但过去曾生产 HCHs 和 DDTs 而遗留下来的污染场地则成为目前中国重要的环境问题^[1]。尽管关于 HCHs 和 DDTs 环境影响的研究一直是中国环境科学领域的热点, 但主要集中在土壤、沉积物、河流及湖泊中

的分布、风险及来源分析等方面^[6~9], 而针对污染场地空气中 HCHs 和 DDTs 污染及其风险的研究鲜有报道。土壤挖掘是污染场地在异位修复过程中的重要环节, 而由于这类污染物的半挥发性, 在挖掘扰

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-09-04

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109017); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA06A304)

作者简介: 张石磊(1985~), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为土壤环境工程, E-mail: zhangshilei309@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ndxue2013@gmail.com

动过程中不可避免的会提升挖掘场地及周边空气中污染物的含量,导致二次污染,威胁人类健康^[10]. 因此本文针对土壤挖掘扰动过程中空气中 HCHs 和 DDTs 的分布特征及健康风险进行了研究.

1 材料与方法

1.1 样品采集

使用空气被动采样器收集某污染场地挖掘过程中居民区及挖掘场地的空气样品,空气被动采样器由 2 个相向的不锈钢圆盖、1 根主轴螺杆和聚氨酯泡沫(PUF)组成,顶端由支架固定,采样时将 PUF 固定在主轴上,PUF 能同时吸附空气中气态和颗粒态污染物. 采样时间为 2012 年 1 月~2013 年 7 月,分别在居民楼的 2、3、4、5、6、7、8、10、12、14、15、17、20 楼层(每层楼高度为 2.4 m)设置采样点;居民楼离污染场地挖掘区 100~120 m. 同时在污染场地挖掘区内不同高度(15、30、60、90、130、185 cm)设置采样点. 在远离场地(5 km 以上)设对照点. 每个采样点放置两个空气被动采样器,收集平行样品. 采样点分布如图 1 所示.

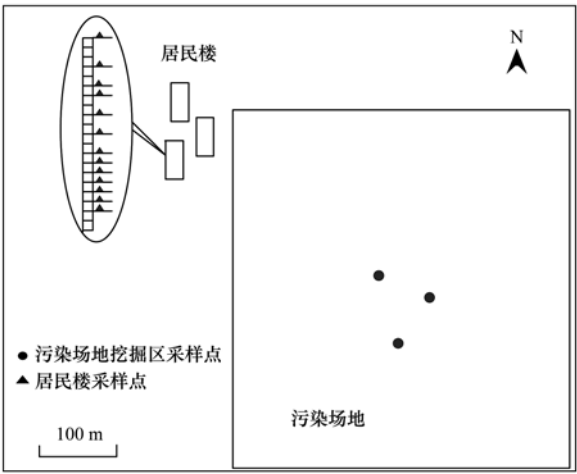


图1 采样点分布示意
Fig. 1 Location of sampling sites in the studied area

1.2 样品分析

应用 GC-MS 仪(HP7890GC/5975MSD),弹性石英毛细管柱 DB-5MS(30 m×0.25 mm I. D×0.25 m)测定样品中 DDTs 和 HCHs. 仪器条件:进样口无分流模式,温度 250℃;柱流量 1.0 mL·min⁻¹;炉温 70℃保持 1 min,以 40℃·min⁻¹升到 180℃保留 2 min,再以 20℃·min⁻¹升到 200℃保留 1 min,再以 20℃·min⁻¹升到 240℃保留 2 min,最后以 2℃·min⁻¹升到 250℃保留 2 min. 载气为氦气,流量 1 mL·min⁻¹,进样体积 5 L. 离子化能量为 70 eV. 离子源(EI 源)230℃,四极杆 150℃,倍增器电压 1 600 V,接口温度 200℃.

1.3 健康风险评价方法

致癌风险等于单位体重摄入的污染物浓度与癌症斜率因子的乘积,用以衡量致癌化学物质的健康风险^[11]. 根据美国环境保护署(USEPA)的化学物质致癌分类标准,HCHs 被认为是可能的致癌物,参照丁中原等^[12]研究中针对空气中 HCHs 风险评价模型,王宗爽等^[13]研究中模型参数,对挖掘区居民经呼吸暴露于 HCHs 进行致癌和非致癌风险评价,呼吸暴露模型如下:

ADD_{呼吸摄入} = $\frac{c_A \times IR \times ED \times EF}{BW \times AT}$

式中,ADD 为经呼吸途径的日均暴露剂量 ng·(kg·d)⁻¹;c_A 为空气中污染物浓度,mg·m⁻³;IR 指呼吸速率,m³·d⁻¹;ED 为暴露期,a;EF 为暴露频率,d·a⁻¹;BW 为体重,kg;AT 指平均接触时间,a. 相关参数见表 1.

致癌风险模型如下:

R_{呼吸} = $\sum (ADD \times SF_i)$

式中,R_{呼吸}指经呼吸暴露途径产生的致癌风险,SF_i指 HCHs 的致癌斜率因子,α-HCH 为 8.35 [mg·(kg·d)⁻¹]⁻¹;β-HCH 为 2.46 [mg·(kg·d)⁻¹]⁻¹;γ-HCH 为 1.80 [mg·(kg·d)⁻¹]⁻¹;p,p'-DDT 为 0.34

表 1 健康风险评价人体暴露参数

暴露参数	成人		儿童		文献
	男性	女性	男性	女性	
IR(呼吸速率)/m ³ ·d ⁻¹	13.51	11.55	5.71	5.58	[13,14]
EF(暴露频率)/d·a ⁻¹	350	350	350	350	[15]
BW(体重)/kg	62.7	54.4	10.6	10.1	[16]
ED(暴露期)/a	3	3	3	3	
AT(平均接触时间,非致癌/致癌)/a	3/69.6	3/73.3	3/69.6	3/73.3	

$[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]^{-1}$; p, p' -DDD 为 $0.242 [\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]^{-1}$; p, p' -DDE 为 $0.34 [\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]^{-1}$.

非致癌风险是每日单位体重摄入量与慢性参考剂量的比值,非致癌风险模型如下:

$$HQ_{\text{呼吸}} = \sum \left(\frac{ADD}{RfD_i} \right)$$

式中, $HQ_{\text{呼吸}}$,经呼吸途径暴露产生的非致癌风险; ADD ,呼吸暴露量; RfD_i ,慢性参考剂量,其中 α -HCH 为 $5 \times 10^{-4} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; β -HCH 为 $2 \times 10^{-4} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; γ -HCH 为 $3 \times 10^{-4} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. p, p' -DDT 为 $5 \times 10^{-4} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 挖掘过程中污染场地内及周边居民区空气中 HCHs 及 DDTs 污染

污染场地内空气中 HCHs 浓度在 $141.9 \sim 211.9 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,平均浓度为 $172.4 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$; DDTs 浓度在 $324.0 \sim 909.5 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,平均浓度为 $480.0 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$,其平均浓度分别是对照点浓度的 305 倍和 471 倍.与已有报道其它地区空气中浓度相比,挖掘

区空气中 HCHs 和 DDTs 浓度高出 $10^2 \sim 10^3$ 个数量级,显然,污染场地土壤挖掘过程中,扰动促进了土壤中 HCHs 和 DDTs 向空气中扩散,提高了周围空气中污染物的浓度.挖掘过程中周边居民区空气中 HCHs 及 DDTs 浓度,平均值分别为 $9.9 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $18.3 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$,范围分别为 $5.2 \sim 15.1 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $13.2 \sim 25.1 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$.与已有报道的其它地区空气中浓度相比 HCHs 在居民区浓度明显高出很多(表 2),平均浓度是鞍山工业区冬季采暖期空气中 HCHs 浓度的 2 倍^[17];是长江三角洲地区浓度的 521 倍^[18];是广州空气中浓度的 106 倍^[19];是香港空气中的 7.4 倍^[20];是韩国空气中的 139 倍^[21];是新加坡空气中浓度的 41 倍^[22];是美国新泽西州大气中浓度的 220 倍^[23].同时,与其他国家和地区相比研究区域明显 DDTs 污染较严重,平均浓度是长江三角洲地区空气中浓度的 109 倍;是广州空气中浓度的 197 倍^[19];是印度旁遮普省空气中浓度的 52 倍^[24];是美国新泽西州和加拿大新不伦瑞克省空气中浓度的数百倍^[23].可见,污染场地的土壤挖掘过程中导致了在污染场地内及周边区域空气中 HCHs 及 DDTs 污染.

表 2 其他地区大气中污染物含量/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 2 Content of pollutants in the atmosphere of other regions/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$

区域	浓度均值 $\pm$ 标准差		文献
	HCHs	DDTs	
挖掘区	172.4	480	本研究
居民区	9.9	18.3	本研究
对照点浓度	0.565	1.02	本研究
鞍山工业区	6.7	14.2	[17]
长江三角洲地区	0.019 ± 0.032	0.168 ± 0.11	[18]
广州	0.093 ± 0.073	0.318 ± 0.279	[19]
香港	1.33	—	[20]
韩国	0.071	—	[21]
新加坡	0.24 ± 0.089	—	[22]
美国新泽西州	0.045 ± 0.016	0.031 ± 0.025	[23]
加拿大新不伦瑞克省	0.149 ± 0.062	0.237 ± 0.106	[23]
印度旁遮普省	0.055 ± 0.037	0.35 ± 0.24	[24]

2.1.1 挖掘场地空气中 HCHs 和 DDTs 的垂直分布

在污染场内离地面不同高度处(15、30、60、90、130、185 cm)收集空气样品,分析不同高度空气中 HCHs 和 DDTs 的浓度.污染场地中 HCHs 和 DDTs 的浓度随高度变化如图 2 所示.

挖掘区空气中 DDTs 浓度随高度升高而降低,离地面高度为 15 cm 时,DDTs 浓度为 $909.5 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$;离地面 30 cm 时,DDTs 浓度为 $516.7 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$;离地面 185 cm 时 DDTs 浓度为 $324.0 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$.可见挖掘扰动过程会引起近地面空气中

DDTs 浓度增加,且高度是影响此过程中 DDTs 分布的主要因素.挖掘扰动过程中,HCHs 浓度呈波动性降低,距离地面 15 cm 时,HCHs 浓度为 $201.1 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$;离地面 30 cm 时,HCHs 浓度为 $211.9 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$;离地面 185 cm 时 HCHs 浓度为 $141.9 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$.可见在挖掘扰动过程中会引起近地面空气中 HCHs 的增加,但不同于 DDTs,HCHs 浓度呈波动性降低,这可能是由于 HCHs 的蒸气压较 DDTs 高,挖掘扰动过程对 HCHs 的影响较为显著,使得 HCHs 浓度波动性较强.

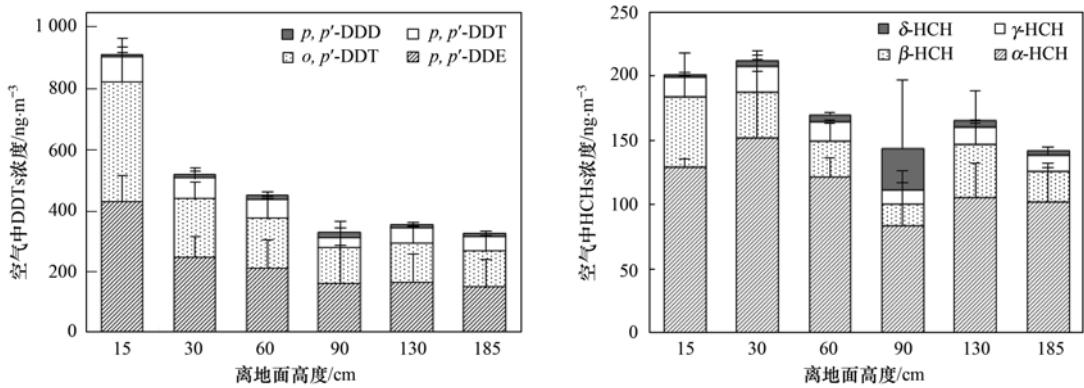


图2 挖掘场地空气中 HCHs 和 DDTs 浓度
Fig. 2 HCHs and DDTs concentrations in the air of excavation area

2.1.2 场地周边居民区空气中 HCHs 和 DDTs 的垂直分布

为研究场地挖掘对周边居民区空气质量的影响,分别在居民楼不同楼层采样,分析 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH 这 4 种同系物及 $\sum$ HCHs 和 p,p' -DDE、 p,p' -DDD、 o,p' -DDT、 p,p' -DDT 这 4 种异构体和 $\sum$ DDTs 浓度随高度的变化(如图 3)。

分析居民区空气中 HCHs 和 DDTs 浓度 ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 与离地面高度 (cm) 的相关性发现,HCHs 浓度与高度呈显著负相关 ($P < 0.05$, $n = 33$),相关系数为 0.67. α -HCH 和 γ -HCH 浓度与高度极显著负相关 ($P < 0.05$, $n = 33$),相关系数分别为 0.81 和 0.72, β -HCH 浓度与高度呈显著负相关, δ -HCH 浓度与高度相关性不显著. DDTs 浓度与高度呈显著负相关 ($P < 0.05$, $n = 33$),相关系数为 0.41. p,p' -DDE、 p,p' -DDD、 o,p' -DDT 和 p,p' -DDT 浓度均与高度呈负相关, p,p' -DDE 相关性较小,相关系数为 0.03,其它 3 种异构体浓度与高度的相关系数在 0.24 ~ 0.29 之间. 由此可见,场地中 HCHs 和 DDTs

在空气中分布不仅与污染物本身性质有关,同时也与离地面高度有关.

2.1.3 挖掘过程中周边居民区空气中 HCHs 及 DDTs 季节分布特征

为了考察不同季节污染场地空气中污染物的变化,挖掘过程中分别在春季、夏季、秋季和冬季收集空气样品,分析居民区空气中 HCHs 及 DDTs. 不同季节污染场地空气中 HCHs 及 DDTs 浓度列于表 3.

如表 3 所示,HCHs 春季的浓度为 5.78 ~ 16.3 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 8.63 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$;夏季为 3.17 ~ 8.05 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 6.09 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$;秋季为 5.42 ~ 55.2 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 16.7 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$;冬季为 5.65 ~ 133 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 28.6 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,HCHs 浓度呈现出秋冬季节高而春夏季较低的特点,各异构体也表现出了相似的特征,其中最高均值出现在冬季 (28.6 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$). 冬季空气中 HCHs 浓度高,可能是由于冬季空气稳定度较高,容易形成逆温效应,不利于 HCHs 的扩散;秋季空气中 HCHs 浓度高可能是由于秋季温度高,利于土壤中 HCHs 向空气中挥

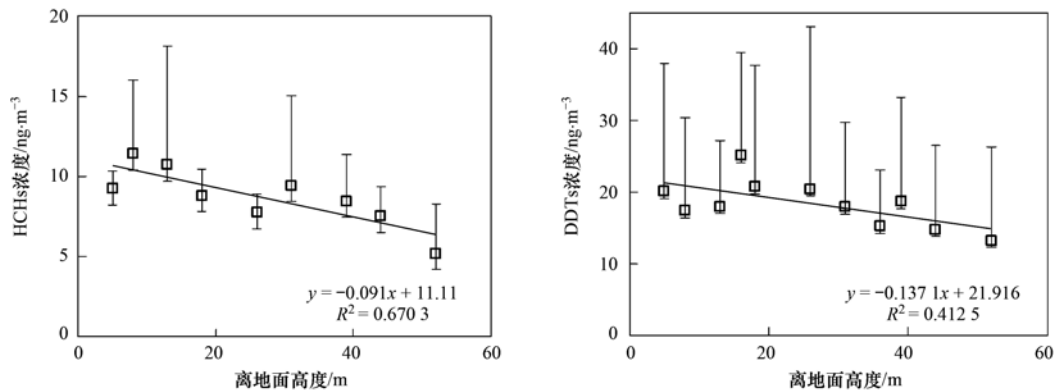


图3 居民区空气中 HCHs 及 DDTs 浓度与高度的相关性 ($n = 33$)
Fig. 3 Correlation between HCHs and DDTs concentrations in residential air and the height

发^[11]. 空气中 HCHs 浓度最低均值出现在夏季,这可能是由于该地区夏季降雨多,空气中 HCHs 经雨水冲刷而使得其浓度降低. DDTs 春季浓度为 6.23~26.4 ng·m⁻³,均值为 15.1 ng·m⁻³;夏季浓度为 6.86~46.3 ng·m⁻³,均值为 32.4 ng·m⁻³;秋季浓度为 54.5~388 ng·m⁻³,均值为 200 ng·m⁻³;冬季浓度为 4.48~2 800 ng·m⁻³,均值为 457 ng·m⁻³,呈现出与 HCHs 相似的季节变化规律,均为秋冬季节高而春夏季节较低,春季空气中 DDTs 浓度较低一方面可

能是由于该地区春季多雨,经雨水冲刷作用去除空气中部分 DDTs,另一方面春季多风,平均风速在 2.9 m·s⁻¹,部分地区最高可达 27.0 m·s⁻¹,加强了空气中 DDTs 的扩散,因此春季空气中 DDTs 浓度为全年最低. 显然,空气中 HCHs 和 DDTs 污染浓度不仅是由于温度降低,挥发量减少,污染浓度降低,而且大气不稳定及雨水的冲刷也使得污染浓度降低. 可见,尽量在春夏季节较低气温时段施工,可减少在修复该类污染场地过程中 HCHs 和 DDTs 的污染浓度.

表 3 挖掘过程中周边居民区空气中 HCHs 及 DDTs 浓度范围及平均值/ng·m⁻³

污染物	污染物浓度范围(平均浓度)			
	春季	夏季	秋季	冬季
α-HCH	1.92~8.87(4.01)	1.48~4.51(2.92)	2.64~42.2(11.9)	2.41~48.7(10.5)
β-HCH	1.01~3.65(1.82)	0.50~2.03(1.52)	0.25~4.74(1.93)	1.72~17.3(6.25)
γ-HCH	0.55~1.96(1.05)	0.48~1.54(1.10)	0.50~5.90(1.73)	0.39~37.2(5.99)
δ-HCH	0.30~2.83(1.75)	0.39~0.85(0.55)	0.18~2.35(1.08)	1.12~30.2(5.91)
p,p'-DDE	2.11~23.7(7.92)	4.17~25.2(17.5)	6.02~70.4(24.3)	1.77~2250(317)
p,p'-DDD	0.49~2.17(1.46)	0.53~10.3(3.41)	0.38~12.6(2.33)	0.30~644(80.6)
o,p'-DDT	1.63~4.21(3.32)	1.53~11.9(7.86)	2.5~36.1(8.34)	1.64~317(46.4)
p,p'-DDT	0.57~3.30(2.41)	0.63~5.06(3.65)	0.43~10.7(2.68)	0.19~77.1(12.9)
∑ HCHs	5.78~16.3(8.63)	3.17~8.05(6.09)	5.42~55.2(16.7)	5.65~133(28.6)
∑ DDTs	6.23~26.4(15.1)	6.86~46.3(32.4)	54.5~388(200)	4.48~2800(457)

2.2 致癌风险

2.2.1 不同季节经呼吸暴露途径的致癌风险

场地空气中 HCHs 和 DDTs 对周边居民区健康风险主要暴露途径是经呼吸暴露途径. 应用健康风险评价模型,分析了在场地挖掘扰动过程中,场地周边居民区空气中 HCHs 和 DDTs 经呼吸暴露途径对儿童和成人的致癌风险. 表 4 列出了经呼吸暴露途

径不同季节 HCHs 和 DDTs 的致癌风险. 从中可见,大多成年人点位 HCHs 的致癌风险均低于可接受水平(1.0×10^{-6})^[25],其中成年女性的致癌风险大多在 $0.26 \times 10^{-6} \sim 0.81 \times 10^{-6}$ 之间,成年男性的致癌风险大多在 $0.18 \times 10^{-6} \sim 0.83 \times 10^{-6}$ 之间;幼年经呼吸暴露途径产生一定程度的致癌风险,54.35% 点位中幼年男性的致癌风险在 $1.00 \times 10^{-6} \sim 2.65 \times$

表 4 不同季节 HCHs 和 DDTs 的致癌风险¹⁾ × 10⁻⁶

Table 4 Carcinogenic risk of HCHs and DDTs in different seasons × 10⁻⁶

楼层	春								夏								秋冬							
	成年				儿童				成年				儿童				成年				儿童			
	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女
	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs
2	0.45	0.05	0.58	0.04	1.55	0.10	1.10	0.10	0.39	0.09	0.51	0.08	1.40	0.20	0.95	0.2	0.45	0.01	0.55	0.01	0.38	0.004	1.10	0.02
3	0.76	0.04	1.00	0.03	2.65	0.10	1.85	0.10	0.33	0.08	0.45	0.06	1.20	0.20	0.8	0.15	0.48	0.01	0.60	0.01	0.40	0.01	1.15	0.05
4	0.26	0.03	0.35	0.03	0.95	0.05	0.65	0.05	0.29	0.06	0.39	0.05	1.05	0.15	0.7	0.15	0.19	0.00	0.28	0.00	0.19	0.00	0.45	0.01
5	0.35	0.04	0.48	0.04	1.25	0.10	0.85	0.10	0.18	0.06	0.26	0.06	0.70	0.15	0.45	0.15	0.66	0.01	1.08	0.01	0.73	0.01	1.60	0.05
7	0.44	0.04	0.61	0.04	1.65	0.10	1.05	0.10	0.31	0.09	0.46	0.09	1.25	0.25	0.75	0.2	0.83	0.04	1.56	0.04	1.05	0.03	2.00	0.10
8	0.40	0.04	0.49	0.03	1.30	0.10	1.00	0.10	0.29	0.09	0.44	0.09	1.20	0.20	0.7	0.2	0.41	0.01	0.53	0.01	0.35	0.01	1.00	0.05
10	0.29	0.03	0.44	0.03	1.15	0.05	0.70	0.05	0.35	0.10	0.48	0.10	1.30	0.25	0.85	0.25	0.31	0.01	0.45	0.01	0.30	0.01	0.75	0.02
12	0.29	0.04	0.38	0.04	1.00	0.10	0.70	0.10	0.23	0.06	0.34	0.06	0.90	0.15	0.55	0.15	0.55	0.01	0.81	0.01	0.55	0.01	1.35	0.05
14	0.43	0.04	0.50	0.04	1.35	0.10	1.05	0.10	0.21	0.05	0.31	0.05	0.85	0.15	0.5	0.15	1.65	0.01	1.86	0.01	1.25	0.01	4.00	0.05
15	0.26	0.04	0.35	0.04	0.95	0.10	0.65	0.10	0.25	0.08	0.36	0.08	0.95	0.20	0.6	0.2	0.39	0.01	0.60	0.01	0.40	0.01	0.95	0.05
17	0.25	0.03	0.34	0.03	0.90	0.10	0.60	0.10	0.26	0.06	0.38	0.06	1.00	0.15	0.65	0.15	0.33	0.01	0.50	0.01	0.34	0.01	0.80	0.02
20	0.28	0.03	0.38	0.03	1.00	0.05	0.70	0.05	0.28	0.06	0.39	0.06	1.05	0.15	0.65	0.15	n.	d.	n.	d.	n.	d.	n.	d.

1)n. d. 为未检出

10^{-6} 之间,34.3% 幼年女性致癌风险在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 4.0 \times 10^{-6}$ 之间. 幼年男性致癌风险最高,成年男性致癌风险最低. 挖掘场地居民区空气中 DDTs 的致癌风险范围在 $0.25 \times 10^{-8} \sim 0.25 \times 10^{-6}$ 之间,低于可接受水平(1.0×10^{-6}).

根据美国 EPA 在国家风险计划中建立的健康风险评价基准^[26],多种化学物质的同一暴露途径的

综合致癌风险为该暴露途径下,各化学物质的致癌风险之和,低于 1.0×10^{-6} 为可接受水平. 本研究中 HCHs 和 DDTs 的综合致癌风险在 $0.18 \times 10^{-6} \sim 4.25 \times 10^{-6}$ 之间,其中 69.30% 点位低于可接受水平(1.0×10^{-6}). 但为降低挖掘过程对幼年产生的致癌风险,应采取措施如喷洒抑制剂等,以减少污染物向居民区扩散.

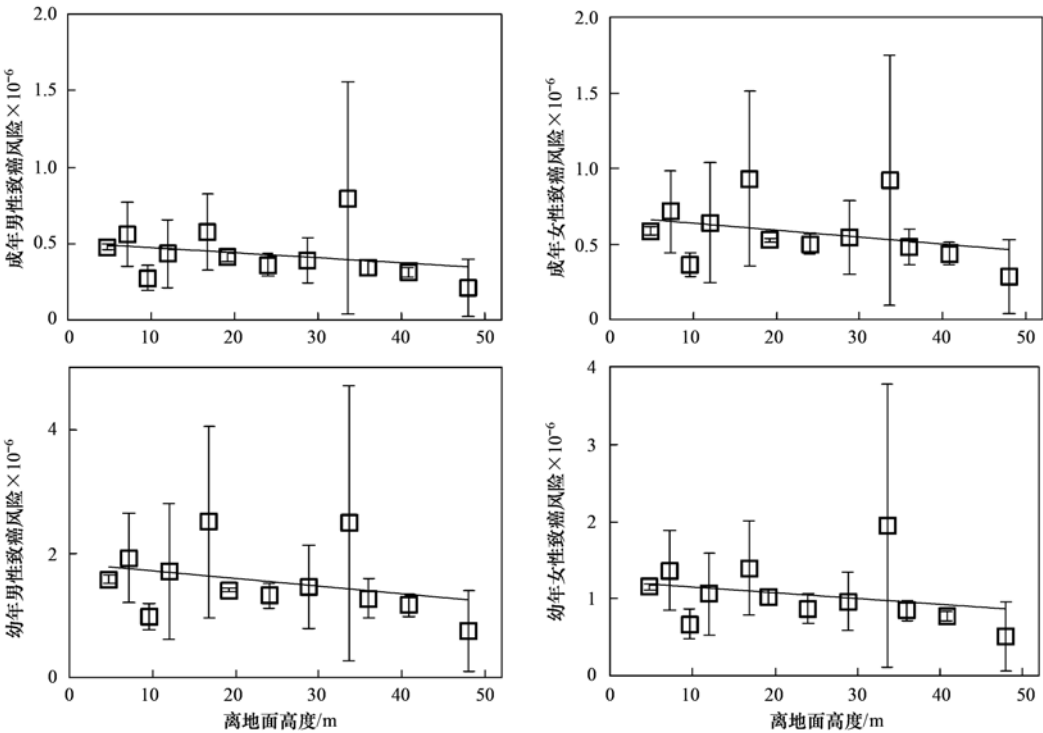


图 4 居民区空气中综合致癌风险与高度的关系

Fig. 4 Relationship between carcinogenic risk in residential air and the height

表 5 致癌风险与高度的关系

类别	致癌风险与高度的关系	相关系数
成年男性	$y = -0.0032x + 0.5038$	$R^2 = 0.0793 (n = 36)$
成年女性	$y = -0.0045x + 0.6844$	$R^2 = 0.1019 (n = 36)$
幼年男性	$y = -0.0125x + 1.8469$	$R^2 = 0.1049 (n = 36)$
幼年女性	$y = -0.0073x + 1.2218$	$R^2 = 0.0722 (n = 36)$

2.2.2 离地面不同高度的致癌风险

挖掘场地居民区空气中 HCHs 的致癌风险与垂直高度有一定相关性(表 5 和图 4). 主要表现为,春季 2、3 层居民较其他楼层致癌风险高,冬季 7 层、14 层附近居民较其他楼层致癌风险高. 这可能是由于春夏季风速较高,大气稳定度低,利于高层中 HCHs 扩散,而春季气温升高,使得冬季沉积在地表土壤中 HCHs 挥发至近地面,所以低楼层居民致癌风险较高;冬季空气较为稳定,容易形成逆温层,使

得高楼层空气中 HCHs 不易扩散,而冬季气温低,部分 HCHs 沉降到地表土壤中,所以冬季高楼层居民致癌风险较高,低楼层致癌风险相对较低. DDTs 致癌风险随垂直高度的变化趋势同 HCHs 有相似特点.

2.3 非致癌风险

当污染物的单一暴露途径非致癌风险 $HI < 0.1$ 时,认为非致癌风险较小或可以忽略, $HI > 0.1$ 时认为存在非致癌风险^[26]. 多种化学物质的同一暴露途径的综合非致癌风险为该暴露途径下各化学物质的非致癌风险之和,低于 0.1 为可接受水平^[26]. 分析在场地挖掘扰动过程中,场地周边居民区空气中 HCHs 和 DDTs 经呼吸暴露途径对儿童和成人的非致癌风险如表 6 所示,挖掘场地居民区附近 HCHs 经呼吸暴露途径产生的成人的非致癌风险在 $1.83 \times 10^{-3} \sim 4.52 \times 10^{-2}$ 之间,低于非致癌风险可接受

水平. DDTs 经呼吸暴露途径产生的成人的非致癌风险在 $0.12 \times 10^{-3} \sim 2.14 \times 10^{-3}$ 之间, 低于非致癌风险可接受水平; 儿童的非致癌风险在 $1.74 \times 10^{-2} \sim 0.53$ 之间, 具有一定程度的非致癌风险. HCHs

和 DDTs 综合非致癌风险在 $2.99 \times 10^{-2} \sim 0.54$ 之间, 因此, 场地挖掘过程中, 57.64% 点位经呼吸暴露途径对居民区产生的综合非致癌风险低于可接受水平 ($HI < 0.1$).

表 6 不同季节 HCHs 和 DDTs 的非致癌风险¹⁾ $\times 10^{-3}$

Table 6 Noncarcinogenic risk of HCHs and DDTs in different seasons $\times 10^{-3}$

楼层	春								夏								秋冬							
	成年				儿童				成年				儿童				成年				儿童			
	男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女	
	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs	HCHs	DDTs
2	4.64	1.16	4.58	1.22	11.60	274.92	12.22	283.43	4.35	1.74	2.75	1.53	10.44	400.20	11.00	411.70	4.64	0.29	4.58	0.12	11.60	33.64	12.22	34.21
3	8.70	1.16	8.55	1.22	22.04	273.76	21.99	280.98	4.06	1.45	2.75	1.53	10.44	364.24	9.77	375.05	4.93	0.29	4.89	0.31	12.76	87.00	12.22	89.18
4	2.90	0.87	3.05	0.92	6.96	227.36	7.33	234.56	3.48	1.45	2.44	1.22	9.28	330.60	8.55	340.85	2.61	0.00	2.75	0.00	6.96	20.88	7.33	20.77
5	4.06	1.45	3.97	1.22	10.44	339.88	11.00	349.40	2.61	1.16	1.83	0.92	6.96	252.88	6.11	260.22	11.60	0.29	11.30	0.31	29.00	96.28	29.32	98.96
7	5.51	1.16	5.50	1.22	13.92	310.88	14.66	320.08	4.35	2.03	3.05	2.14	11.60	506.92	11.00	522.88	18.27	0.87	18.02	0.92	45.24	207.64	46.42	213.79
8	4.06	1.16	3.97	1.22	10.44	266.80	9.77	274.88	4.06	2.03	2.75	1.83	10.44	473.28	11.00	487.45	4.35	0.58	4.28	0.61	11.60	113.68	11.00	116.06
10	4.35	0.87	4.28	0.92	10.44	228.52	11.00	234.56	4.35	2.03	2.75	2.14	10.44	517.36	11.00	533.87	4.35	0.29	4.28	0.31	10.44	58.00	11.00	59.86
12	3.19	1.16	3.05	1.22	8.12	269.12	8.55	277.32	3.19	1.45	2.14	1.53	8.12	358.44	8.55	370.17	8.12	0.58	7.94	0.61	19.72	114.84	20.77	117.28
14	4.06	1.16	3.97	1.22	10.44	284.20	9.77	291.98	2.90	1.16	1.83	1.22	6.96	298.12	7.33	306.64	14.21	0.29	14.05	0.31	35.96	103.24	36.65	106.29
15	3.19	1.16	3.05	1.22	8.12	315.52	8.55	324.97	3.48	1.45	2.14	1.53	8.12	375.84	8.55	387.27	6.09	0.29	5.80	0.31	15.08	75.40	15.88	78.19
17	2.90	1.16	2.75	1.22	6.96	274.92	7.33	282.21	3.48	1.16	2.14	1.22	8.12	319.00	8.55	328.63	5.22	0.29	4.89	0.31	12.76	53.36	13.44	54.98
20	3.19	0.87	3.36	0.92	8.12	214.60	8.55	221.12	3.48	1.16	2.44	1.22	9.28	291.16	8.55	300.53	n. d.	0.00	n. d.	0.00	n. d.	17.40	n. d.	18.33

1) n. d. 为未检出

3 结论

污染场地挖掘点和场地旁边居民区空气中 HCHs 和 DDTs 浓度随高度增加而降低. 污染场地挖掘点周边居民区空气中 HCHs 和 DDTs 浓度呈现出秋冬季节高, 春夏季节较低的特点, 可见春夏季节施工可减少二次污染产生. 挖掘区空气中 HCHs 经呼吸暴露途径对成年居民产生致癌风险低于可接受水平, 但对幼年产生一定程度的致癌风险; 挖掘区周边居民区春季低楼层致癌风险相对较高, 冬季高楼层致癌风险与空气稳定度有关. 挖掘区附近成年居民经呼吸暴露途径产生的综合非致癌风险低于可接受风险水平, 但挖掘区附近幼年居民经呼吸暴露途径产生一定程度的非致癌风险. 因此, 该类污染场地挖掘过程中应采取措施抑制挖掘区污染物向空气扩散, 以降低风险.

参考文献:

[1] 薛南冬, 李发生. 持久性有机污染物 (POPs) 污染场地风险控制与环境修复 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[2] Yang Y, Tao S, Wong P K, *et al.* Human exposure and health risk of a-, b-, c-and d-hexachlorocyclohexane (HCHs) in Tianjin, China[J]. Chemosphere, 2005, **60**(6): 753-761.

[3] Alamdar A, Syed J H, Malik R N, *et al.* Organochlorine pesticides in surface soils from obsolete pesticide dumping ground in Hyderabad City, Pakistan: Contamination levels and their potential for air-soil exchange [J]. Science of the Total

Environment, 2014, **470-471**: 733-741.

[4] Wong M H, Leung A O W, Chan J K Y, *et al.* A review on the usage of POP pesticides in China, with emphasis on DDT loadings in human milk[J]. Chemosphere, 2005, **60**(6): 740-752.

[5] Willett K L, Ulrich E M, Hites R A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(15): 2197-2207.

[6] Zhu Y F, Liu H, Xi Z Q, *et al.* Organochlorine pesticides (DDTs and HCHs) in soils from the outskirts of Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, **60**(6): 770-778.

[7] Da C N, Liu G J, Yuan Z J. Analysis of HCHs and DDTs in a sediment core from the Old Yellow River Estuary, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **100**: 171-177.

[8] Feng J L, Zhai M X, Liu Q, *et al.* Residues of organochlorine pesticides (OCPs) in upper reach of the Huaihe River, East China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, **74**(8): 2252-2259.

[9] He W, Qin N, He Q S, *et al.* Characterization, ecological and health risks of DDTs and HCHs in water from a large shallow Chinese lake[J]. Ecological Informatics, 2012, **12**: 77-84.

[10] 张胜田, 林玉锁, 华小梅, 等. 中国污染场地管理面临的问题及对策[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(6): 221-231.

[11] www.epa.gov/iris/.

[12] 丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1258-1263.

- [13] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- [14] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] 周玲莉, 吴广龙, 薛南冬, 等. 废旧电容器封存点土壤中的PCBs污染特征和健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 704-710.
- [16] 王陇德. 中国居民营养与健康状况调查报告之一: 2002 综合报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005.
- [17] 田靖. 鞍山大气中有机氯农药的污染特征研究[J]. 中国环境监测, 2010, **26**(3): 11-13.
- [18] Zhang L F, Dong L, Yang W L, *et al.* Passive air sampling of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Yangtze River Delta, China: Concentrations, distributions, and cancer risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **181**: 159-166.
- [19] Yang Y Y, Li D L, Mu D H. Levels, seasonal variations and sources of organochlorine pesticides in ambient air of Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(4): 677-687.
- [20] Wang J, Guo L L, Li J, *et al.* Passive air sampling of DDT, chlordane and HCB in the Pearl River Delta, South China: implications to regional sources [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2007, **9**(6): 582-588.
- [21] Jin G Z, Kim S M, Lee S Y, *et al.* Levels and potential sources of atmospheric organochlorine pesticides at Korea background sites[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **68**: 333-342.
- [22] He J, Balasubramanian R, Karthikeyan S, *et al.* Determination of semi-volatile organochlorine compounds in the atmosphere of Singapore using accelerated solvent extraction[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(5): 640-648.
- [23] Syed J H, Malik R N, Liu D, *et al.* Organochlorine pesticides in air and soil and estimated air-soil exchange in Punjab, Pakistan [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **444**: 491-497.
- [24] Gioia R, Offenberg J H, Gigliotti C L, *et al.* Atmospheric concentrations and deposition of organochlorine pesticides in the US Mid-Atlantic region [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(12): 2309-2322.
- [25] US EPA. Role of the Baseline Risk Assessment in Superfund Remedy Selection Decisions [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1991.
- [26] US EPA. Guidance for conducting risk assessments and related risk activities for the DOE ORO environmental management program [R]. Tennes: Bechtel Jacobs Company, 1999.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行