

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)

1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)

青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)

烧结过程 NO_x 和 SO₂ 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)

废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 宋磊, 张彬, 邓文 (3674)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)

海河流域河流生态系统健康评价 郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)

台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)

岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)

废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)

大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)

辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)

地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)

地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)

茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能 万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)

紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)

水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)

二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯砷酸的研究 王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)

碳氮比对聚氨基酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)

快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)

应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量 李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)

植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)

硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)

外生菌根真菌对 Al³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应 张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)

长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳纬莹, 苏建强 (3869)

外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔骁勇, 马栋 (3888)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)

施氮强度对不同土壤有机碳水平按树林温室气体通量的影响 李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)

¹³C₂O 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解 陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)

微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)

铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型 王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)

天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)

水生生物基准推导中物种选择方法研究 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)

生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)

金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)

CuO(-CeO₂)/Al₂O₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究 查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用 徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)

某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)

北京市再生水利用生态环境效益评估 范育鹏, 陈卫平 (4003)

我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)

环境损害评估: 构建中国制度框架 张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)

《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响

李鹏^{1,2}, 廖晓勇^{1*}, 阎秀兰¹, 崔晓勇², 马栋¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 研究应用电阻加热强化气相抽提技术对砂土、壤土和黏土中苯去除效果的影响及作用机制。与常规抽提结果相比, 在热强化处理作用下气相抽提对砂土和壤土中苯的去除效率提高了 13.1% 和 12.3%, 处理时间分别降低 75% 和 14%。热强化处理使得黏土含水率下降, 土壤渗透率升高, 黏土颗粒表面羧基和乙基的吸收峰消失, 有机质含量减少, 苯的去除效率与对照相比提高了 34%。对于砂土和壤土, 热强化主要是通过促进苯在土体中扩散来提高去除效率, 从而在较短时间内污染物的大量去除; 而对于黏土则是通过降低土壤颗粒表面有机基团的含量, 从而降低污染物和土壤颗粒的吸附能力, 并通过降低含水率和升高渗透率从而提高土壤中气体的扩散性能, 以达到增强气相抽提效果的目的。

关键词: 加热; 气相抽提; 修复; 质地; 脱附

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3888-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.035

Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures

LI Peng^{1,2}, LIAO Xiao-yong¹, YAN Xiu-lan¹, CUI Xiao-yong², MA Dong¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Experiments were carried out to investigate the effect of thermal enhanced soil vapor extraction (SVE) on benzene removal from sand, loam and clay and the mechanism. Compared to the routine control treatment, the benzene removal rates were improved by 13.1% and 12.3% and the remediation periods were reduced by 75% and 14%, from sand and loam respectively using thermal enhanced SVE. Thermal enhancement decreased the moisture content and increased the soil permeability of clay. On the surface of clay particles, absorption peaks of carboxyl and ethyl disappeared and the content of soil organic substances decreased significantly. Compared to the conventional SVE, the benzene removal rate was improved by 34% in clay soil treated by thermal enhanced SVE. For sand and loam, thermal enhancement could increase the removal rate by promoting the diffusion of benzene in the soil and achieve substantial removal of pollutants in a relatively short period of time. For clay, it could enhance the effect of SVE by reducing the absorption capacity between soil particle surface and contaminant and improving the performance of the gas diffusion in soil by decreasing the moisture content and increasing the soil permeability.

Key words: thermal enhancement; soil vapor extraction (SVE); remediation; texture; desorption

气相抽取技术(soil vapor extraction, SVE)是一种用于治理挥发性有机物污染土壤及地下水的原位修复技术,被美国环保署认定为具有“革命性”的环境修复技术,美国 1982~2005 年间的 977 个超级基金场地中有 248 个采用了 SVE 技术,占修复总数的 26%^[1]。影响 SVE 技术高效应用的重要因素,包括气相抽提的流量、污染物质饱和蒸气压^[2]、不同抽提阶段的划分^[3]、土壤渗透率等。其中,土壤渗透率是影响气体在土层中迁移的关键性参数,它是由土壤颗粒的粒径分布、孔隙度、含水率以及 NAPL 含量等因素综合决定的^[4,5]。已有的研究成果表明气相抽提主要适用于渗透性较高的土壤,对于渗透率大于 10^{-6} cm^2 的砂土尤为适用^[6]。Frank 等^[7]评价 SVE 技术适用性的关键因素是能否有足够气体通过污染土壤,土壤透气率是唯一决定因素,因此传

统的气相抽提技术并不适用于平均孔径和渗透率较低的黏性土壤^[8]。为了提高 SVE 的修复效果,弥补单独使用时所存在的问题,可以与其它技术,如热强化、生物通风、空气喷射、双相抽提、生物修复等原位修复技术相结合及互补形成多种 SVE 增强技术^[9]。其中热处理强化(thermal enhancement, TE)是一种被认为具有极高应用潜力的 SVE 强化技术^[10]。

热处理方法主要包括电波加热、微波加热、热空气注入、蒸汽注射等,作为一种典型的且具有广泛应用前景的 SVE 增强技术,它能明显减少修复时

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-04-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063102); 国家科技支撑计划项目(2012BAC10B00)

作者简介: 李鹏(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为污染场地土壤修复技术, E-mail: lipeng@igsrr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liaoxiy@igsrr.ac.cn

间,还可去除常规 SVE 技术不能清除的低挥发性有机物或半挥发性有机物(semi-VOC)。国际上对于热强化气相抽提技术已有部分研究,但研究对象多为砂土或壤土的单一土壤质地。Heron 等^[11]采用热电阻强化气相抽提技术,针对壤土类土壤(砂粒 0.2%、粉粒 81%、黏粒 18.8%)进行去除三氯乙烯的实验,土壤加热温度为 33℃,45d 后土壤中三氯乙烯的去除率为 99.8%。Poppendieck 等^[12]采用热电阻强化气相抽提技术,针对砂土类土壤(砂粒 60%~75%、粉粒 5%~15%、黏粒 0~15%)对 C13 进行了去除实验,结果表明当温度升高到 100℃ 时,24h 的去除率能够达到 90%。Mohamed 等^[13]利用热蒸汽强化气相抽提技术,针对砂土和壤土分别进行了去除苯的实验,污染物的去除率分别较常规抽提平均提高 9% 和 4%。

已有研究多集中在热强化效果研究,而对于机制分析不多,另外对于热强化处理黏土的探索还较少。本文采用热强化气相通风技术,针对不同质地土壤中的挥发性有机物苯进行了去除实验研究,探明土壤质地的变化对苯去除的影响,分析热处理过程中气相抽提关键影响参数的变化,探讨热处理强化的作用机制。

1 材料与方法

1.1 供试装置

实验装置包括气相抽提模块和热处理模块两部分。气相抽提模块设计见图 1。实验土柱为有机玻璃材质,高 70 cm,直径 12 cm,底部衬以不锈钢丝网做为布气板,起支撑土样和均匀分布气体的作用,布气板之下开有通风口,之上开有注入口。注入口可用于目标污染物的注入。顶部开有抽取口和热电阻安放口。实验柱外侧从上到下依次开有 4 个气体取样口和温度检测口,取样口和温度检测口各自独立,但同一高度的作为一组。取样口用硅胶垫密封,温度检测口伸入 WT-1 型探针式数显温度计(中国盐城宏泰合金电器有限公司)的探头,然后用硅橡胶密封。在每个装置的主抽提管路上依次安装阀门和可调节气体流量计,另外一端连接单极旋翼式真空泵(中国余姚巨能能源科技有限公司),在真空泵产生的负压作用下空气流经土柱,携带挥发性污染物从顶端流出,抽提的尾气采用活性炭柱吸收。

采用热电阻的方式对土壤进行加热,热电阻为干烧型工业用直棒加热管,功率为 0.5 kW,长度为 50 cm。同时加装手动控温装置,可对加热电阻在 20

~120℃ 范围内进行温度控制。在装填实验土柱的过程中埋入热电阻,每个实验土柱埋入一根热电阻,热电阻的底端距实验土柱的距离为 10 cm。

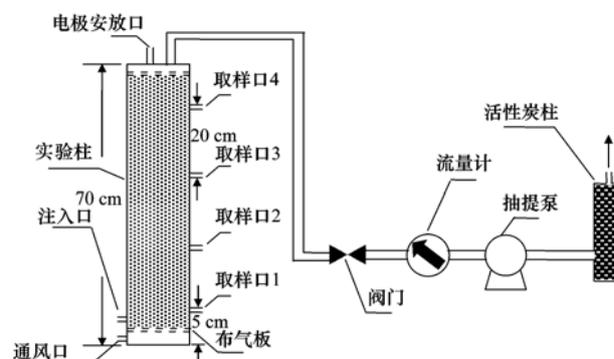


图 1 热强化气相抽提装置

Fig. 1 Schematic diagram of the device used for thermal enhanced soil vapor extraction of benzene

1.2 实验设计

在不同实验柱分别装填砂土、壤土和黏土等 3 种不同质地的无污染土壤,砂土为市售建筑用河砂,壤土为采自房山区农田的浅层壤土,黏土为采自同区域农田的深层黏土。各土壤采集后挑出土样内的植物残体,保持原始的土壤性状进行土柱装填,保证模拟实验的真实性。同时检测有机污染物含量和基本理化性质。基本理化性质结果见表 1。

表 1 实验土壤的基本理化性质/%

Table 1 Physical-chemical properties of test soil/%

土壤	砂粒	粉粒	黏粒	孔隙度	有机质含量
砂土	80.3	10.5	9.2	33	1.6
壤土	40.6	40.2	19.2	55	3.5
黏土	20.8	20.1	59.1	50	2.5

土壤装填的高度为 60 cm,随后将顶盖密封。从底部注入 100 mL 的污染物苯(分析纯,中国国药集团化学试剂有限公司),从最底端取土样同时从取样口 1 取气样检测污染物含量。静置 24 h 后,分别采用常规抽提和热电阻强化抽提的方式进行实验,加热温度设定为 80℃,抽取时间为 7 d(表 2)。每隔 4 h 从取样口 1~4 取气体样品,检测污染物含量,并检测各取样点深度土壤温度。最后从取样口 1 处取土壤检测污染物含量,并对不同质地土壤热强化抽提前后取样口 1 处土壤的各种理化性质进行检测。

1.3 分析方法

通过气体采样袋(50 mL,中国大连海得科技有限公司)从取样口采集气体样品。以正己烷为内标物,准确抽取正己烷液体 0.56 μL ,加入到充有 50 mL 高纯度氮气的气袋中,混合均匀再从气袋中准确

抽取 1 μL , 注入到 50 mL 被测样气的采样袋中, 混合均匀, 然后从采样袋用手动进样针 (1 μL , 澳大利亚 SGE Analytical Science) 中抽取 1 μL 被测样气进样. 色谱仪为美国 PE 公司的 AGILENT6890N 型气相色谱仪检测, 气相色谱仪配 Turbochrom4.1 工作站、六通定量阀和 FID 检测器、填充柱和 PE-WAX 型标准毛细柱: 30 m \times 0.25 mm (i. d.) \times 0.25 μm (膜厚). 色谱用高纯氮作载气. 实验色谱条件为: 气化室 250 $^{\circ}\text{C}$, 柱温 50 $^{\circ}\text{C}$ 恒定, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 空气流量 300 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 流量 15 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 载气 (N_2) 流量 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 分流比为 50:1. 色谱用外标法峰面积和峰高定量.

表 2 实验处理及条件

Table 2 Experimental treatments and conditions

编号	土壤质地	抽提方式	实验条件
S-CK	砂土	常规抽提	目标污染物: 苯 污染物注入量: 100 mL 抽提流量: 3 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 处理时间: 7 d 热处理温度: 80 $^{\circ}\text{C}$
S-H-R		热强化抽提	
L-CK	常规抽提		
L-H-R	热强化抽提		
C-CK	黏土	常规抽提	
C-H-R		热强化抽提	

实验终止后还需分析土壤中残留苯量, 取一定质量土样, 选择 CS_2 做萃取剂, 用微波辅助萃取法进行萃取, 固液两相进行离心分离后, 由色谱分析液相中的苯浓度.

1.4 检测方法

采用德国 ZEISS 的 supra 40 型扫描电镜对加热前后土壤颗粒的表面形貌进行观察, EHT = 15 kV, WD = 8.1 mm. 采用德国 BRUKER 的 TENSOR 27 型红外光谱仪对加热前后的土壤样品颗粒表面的有机基团的变化情况进行检测分析.

2 结果与讨论

2.1 热处理对不同质地土壤中污染物扩散的影响

图 2 所示为不同处理下实验柱取样口 1~4 污染物浓度随时间的变化. 当采用常规抽提处理砂土时, 取样口 1 处污染物浓度在 12 h 内由 11.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 2.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后浓度呈现缓慢下降的趋势, 实验结束时降低至 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而采用热强化抽提处理砂土, 污染物浓度在 12 h 内就降低至 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余各取样口浓度在采用热强化抽提后下降更为迅速, 平均去除时间降低了 75%. 当供试土壤为壤土时, 采用常规抽提, 取样口 1 处污染物浓度在 70 h 内由 11.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 均匀降低至 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后浓度呈现缓慢下降的趋势; 而采用热

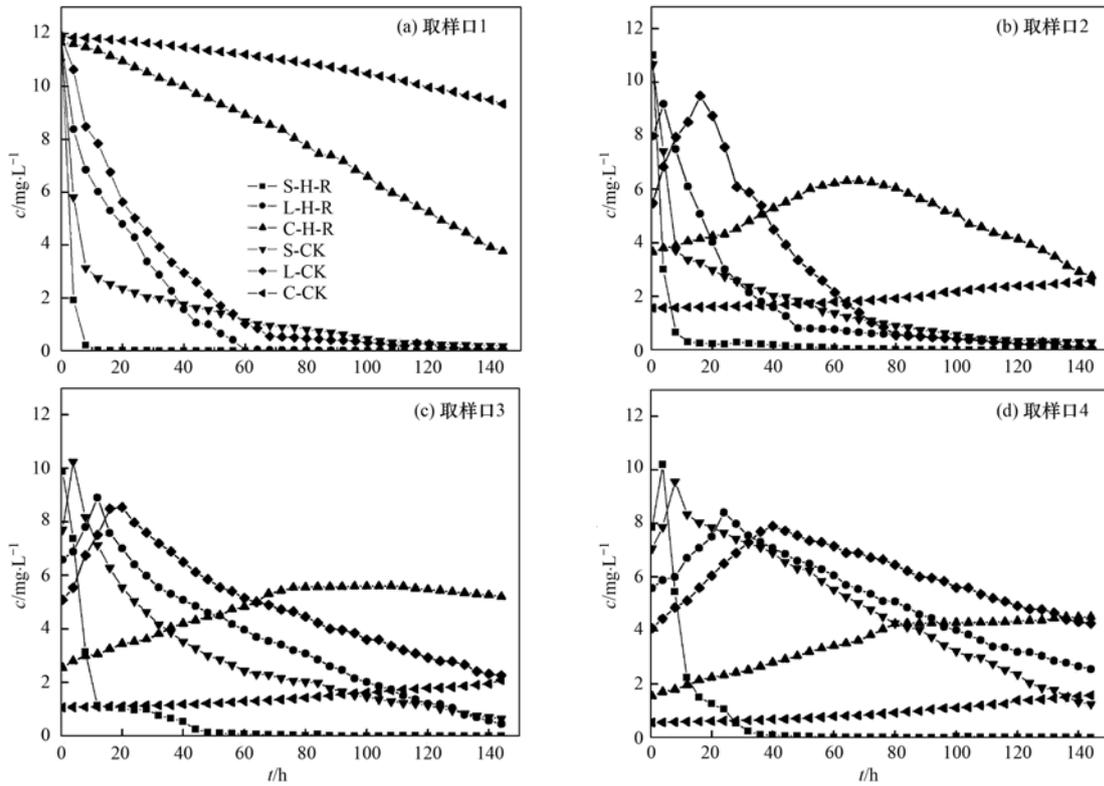
强化抽提污染物浓度在 60 h 内就基本降低到 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余各取样口浓度也在采用热强化抽提后有了更快的下降速率, 平均去除时间降低了 14%.

当供试土壤为黏土时, 采用常规抽提时取样口 1 污染物浓度下降得很缓慢, 到实验结束时浓度只降低到 9.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污染物的去除效率非常低. 即使采用热强化抽提污染物浓度在实验前期下降也比较慢, 随着时间的延长下降的速率才呈现缓慢增加的趋势, 到实验结束时浓度降低到 3.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 比常规抽提处理是有明显的降低. 而其余各取样口的浓度变化却和砂土和壤土的实验现象不同, 当采用常规抽提时, 取样口 2~4 的浓度基本保持缓慢上升的趋势, 且浓度数值都较低; 当采用热强化抽提后, 只有取样口 2 的浓度表现为先上升后下降的趋势, 其余取样口同样保持逐渐上升的趋势, 只是平均浓度要高于常规抽提的浓度.

当供试土壤为砂土和壤土时, 常规抽提的条件下高浓度的苯蒸气团在外加气流的带动下由实验柱底端向顶端扩散, 最后经由顶端的抽提口抽提出实验柱; 而采用热处理后能够有效提高苯蒸气的迁移扩散速率, 高浓度的苯蒸气团在较短时间内由底端运移至顶端, 从而能够更快地被外加气流带走去除, 这样就能有效缩短去除时间, 提高气相抽提的污染物去除效率, 达到热强化的目的. 相对于壤土, 砂土在热强化抽提作用下, 作用效果更为明显. 当处理黏土时, 采用常规抽提时底端污染物浓度缓慢下降, 土柱上端浓度缓慢上升, 说明苯蒸气团在由底端向顶端扩散的过程中遇到了较大的阻力, 运移扩散较为困难. 已有的研究认为在砂土、壤土和黏土这 3 种土质中, 砂土的渗透率最高, 气流能够到达实验柱的各个区域, 因此容易将挥发性污染物带离; 而黏性土壤则由于渗透率较低, 去除效果最不好^[14]. 土壤的通透性是影响气相抽提的主要因素, 通透性越好, 污染物去除时间也越短, 这已经成为影响气相抽提系统设计的关键^[7,15].

2.2 热处理对不同质地土壤中污染物去除效果的影响

表 3 是不同供试土柱底端土壤的苯浓度. 采用热处理后, 不同质地土壤的污染物去除率都有所提高, 砂土和壤土中苯的去除率分别提高了 13.1% 和 12.3%. 结合各取样口污染物浓度变化的过程和时间, 可以认为热处理对于砂土和壤土土质气相抽提效率的提高主要在于污染物迁移扩散速率的提高即抽提时间的缩短. 而黏土中污染物去除率的提高幅



S-CK:常规抽提-砂土; L-CK:常规抽提壤土; C-CK:常规抽提-黏土; S-H-R:热强化抽提-砂土;
L-H-R:热强化抽提-壤土; C-H-R:热强化抽提-黏土

图2 不同质地土壤实验过程中 Port 1~4 取样口处浓度随时间变化

Fig. 2 Curves of benzene concentration at Ports 1-4 varying with time in different soil texture

度则较大,由 25.7% 上升到 59.7%,这说明由于热强化技术的加入,对于黏土中污染物本身迁移速率的提升是有限的,但考虑热处理过程对于黏土土壤性质改变的可能性,热强化主要是提高了污染物的绝对去除量,去除率才有较大幅度的提高. 由此可见,在热强化气相抽提修复过程中,增幅效果为:砂土≈壤土<黏土.

表3 不同处理前后污染物浓度

Table 3 Changes of benzene concentrations in different soil texture before and after TESVE

实验号	实验前浓度 /mg·kg ⁻¹	实验后浓度 /mg·kg ⁻¹	去除率/%
S-CK	14.5	2.1	85.5
S-H-R	14.6	0.2	98.6
L-CK	14.5	2.8	80.7
L-H-R	14.3	1.0	93.0
C-CK	14.4	10.7	25.7
C-H-R	14.4	5.8	59.7

2.3 热处理对不同质地土壤中污染物的赋存特征的影响

砂土的土壤颗粒都较大,因而颗粒之间的平均孔径大,但孔隙度较小;壤土的颗粒较均一,平均孔

径也较大;黏土的颗粒较小,平均孔径较小,但孔隙度较大,表现出一定的整体性. 从放大1 000倍的扫描电镜照片(图3)可以观察,经过热处理后砂土的土壤颗粒的结构没有发生明显的变化,但颗粒的间隙有扩大的趋势,平均孔径由 2.5 μm 提高到 3.6 μm;壤土的土壤颗粒在热处理前后出现了程度逐渐增大的破碎现象,颗粒之间的孔隙逐渐增大;而黏土的土壤颗粒在热处理后破碎现象更为明显,但从图中并不能看出土壤颗粒之间的平均孔径出现明显的增加. 从检测结果可以看出热强化处理使得3种质地土壤的平均孔径和渗透率均出现了一定程度的上升,而含水率和有机质含量出现了一定程度的下降.

对各质地土壤热处理前后的样品分别进行了红外光谱的测试,结果见图4. 热处理前的黏土样品中反映有机基团的吸收峰比较明显,如表示羧基(—COO—)的1 726 cm⁻¹位置,表示乙基(—CH₂)的2 953 cm⁻¹位置等,砂土和壤土样品的吸收峰比黏土少,说明壤土本身的有机质含量比黏土要低,但也出现了甲基(—CH₃)的1 067 cm⁻¹位置和羧基

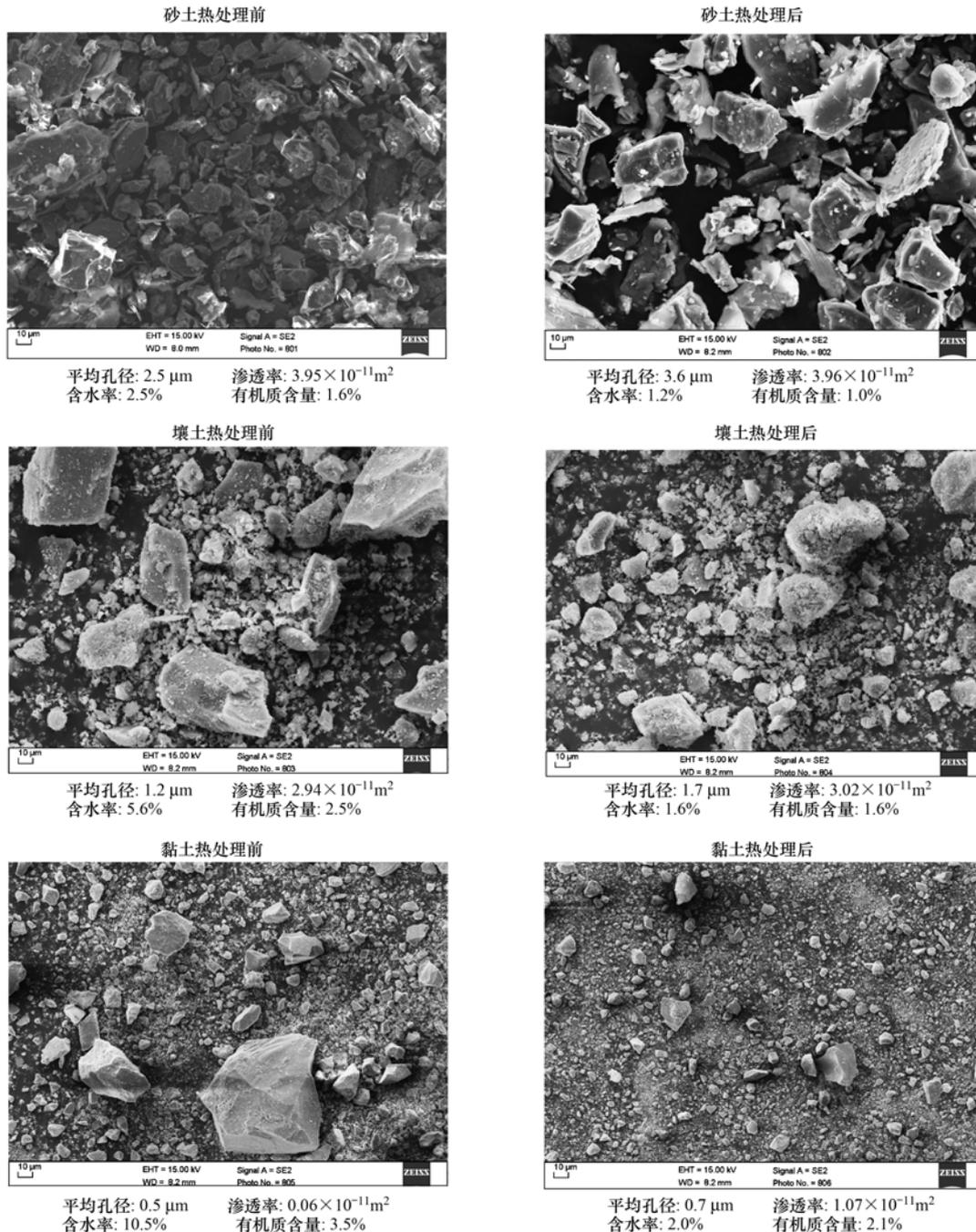


图3 不同质地土壤热处理前后扫描电镜照片和相关理化性质

Fig. 3 Scanning electron microscopy images (1000 \times) of different soil texture before and after TESVE (with corresponding physical-chemical properties)

(—COO—)的 1726 cm^{-1} 位置^[16]。而热处理后反映有机基团的峰出现了明显减少,如砂土、壤土和黏土样品中表示羧基的 1726 cm^{-1} 位置的吸收峰和黏土样品中表示乙基的 2923 cm^{-1} 位置的吸收峰消失。从3种土壤热处理后有机质含量下降的情况也能证实这一现象。

Fen等^[17]的研究表明,土壤颗粒粒径、土壤平均孔径、土壤渗透性的空间变异对修复效率有很大

影响,在大尺度的场地修复过程中,由于土壤质地的空间变化将导致土壤导气率的空间变化进而影响修复效果。本研究结果显示,土壤质地对于热强化效果的具有不同的影响。砂土和壤土土质的土壤由于平均粒径较大,平均孔径和渗透率相对于黏土也比较大。又由于平均孔径和渗透率较大,导致砂土的含水率和有机质含量较低^[18,19],所以加热后降低的程度较小,可以认为热处理强化对砂土和壤土质地

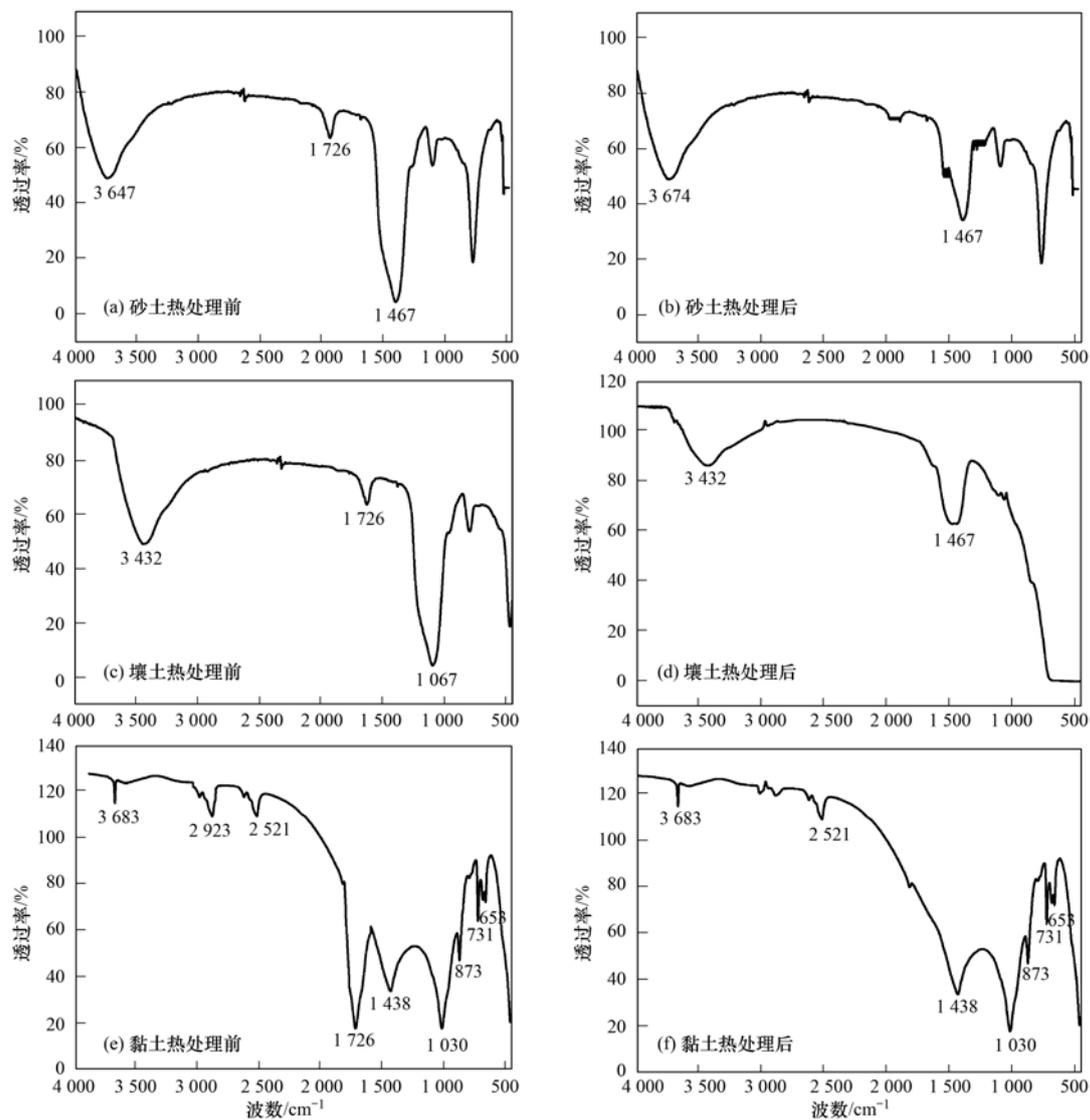


图 4 不同质地土壤热处理前后红外光谱图

Fig. 4 Infrared spectra of different soil texture before and after TESVE

的污染土壤气相抽提效率的提高主要是通过提高污染物质本身的扩散速率来实现。而对于黏土土质的土壤,一方面由于热处理后土壤渗透率的提高,另一方面是由于含水率和有机质含量的下降,从而提高抽提效率。

已有研究成果表明土壤颗粒表面的有机基团含量的高低直接影响其对其他有机质的吸附。土壤颗粒表面有机基团的大量存在使得样品更易于和有机污染物基团相结合,从而使气相抽提去除有机污染物的过程变得困难,降低气相抽提的效率。Sun 等^[20]研究了不同有机质含量条件下气相抽提去除萘的效果,当土壤中有有机质含量从 6.8% 升高到 28.5% 时,修复萘污染土壤的效率从 75% 下降到 5%。与之类似, Qin 等^[14]的实验结果表明,当土壤

中有机质含量从 0.4% 升高到 10.3% 时,土壤中剩余的氯苯含量就由 4.2% 升高到 33%。而 Soares 等^[21]也研究了土壤中不同含量的有机质(0% 和 7.5%)对气相抽提去除环己烷的影响,结果显示去除率从 99% 下降至 90%,修复时间从 1.8 h 延长至 13 h。本研究表明当采用热强化处理后可以减少土壤颗粒表面的有机基团,降低了土壤有机质的含量,从而就降低了有机污染物在颗粒表面吸附的几率,提高了气相抽提去除有机污染物的效率,这也从另一方面解释了热强化提高气相抽提效率的原理。而对于含水率变化的相关研究表明土壤含水率过高或过低对于挥发性有机污染物的去除都是不利的^[22]。Albergaria 等^[23]的研究结果表明一维土柱中土壤湿度越高,采用气相抽提去除其中环己胺所需时间越

长,效率越低. Poulsen 等^[24]研究认为土壤湿度过大会降低土壤的通透性,从而降低有机污染物的去除. 而也有的研究认为在过于干燥的土壤中,污染物容易吸附于土壤颗粒上,从而降低了其从土壤中的脱附能力;如果能增加含水率,由于水分子为极性分子,较非极性的苯分子更易与土壤有机质结合,从而占据更多的结合位点,促进有机污染物的去除^[25]. 本研究结果认为,在对各类型土质土壤采用热强化气相抽提技术时,合适的温度可以降低土壤中有机物含量和含水率,降低污染物在土壤颗粒表面吸附的几率,从而使得挥发性污染物更易于被去除. 温度过高会使得土壤过于干燥,污染物反而会更易吸附于土壤颗粒,降低了其被去除的效率.

3 结论

(1) 砂土和壤土土质较适宜采用气相抽提技术,热处理主要通过提高污染物质本身的扩散速率,以实现在较短时间内污染物质的大量去除. 而黏土土质本身并不适宜采用气相抽提技术,采用常规气相抽提技术时黏土中挥发性有机污染物扩散缓慢,辅以热处理强化方法后随着热处理时间的延长,污染物扩散速率逐步增大.

(2) 热处理对于砂土和壤土土质气相抽提效率的提高主要在于污染物迁移扩散速率的提高即抽提时间的缩短. 而对于黏土土质主要是通过提高污染物的绝对去除量来实现强化效果. 在热强化气相抽提修复过程中,黏土的增幅效果要高于砂土和壤土.

(3) 热处理对砂土和壤土污染物赋存结构的改变有限,对于黏土则通过降低含水率、减少有机质含量、以及提高渗透率提高了污染物的去除效率.

参考文献:

- [1] USEPA. Treatment technologies for site cleanup: Annual status report (Twelfth Edition) (EPA- 542-R- 07- 012) [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2007.
- [2] 刘少卿,姜林,黄喆,等. 挥发及半挥发有机污染物场地蒸汽抽提修复技术原理与影响因素[J]. 环境科学, 2011, **32** (3): 825-833.
- [3] 王喜,陈鸿汉,刘菲,等. 依据挥发性污染物浓度变化划分土壤气相抽提过程的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(5): 903-907.
- [4] Kaleris V, Croisé J. Estimation of cleanup time for continuous and pulsed soil vapor extraction [J]. Journal of Hydrology, 1997, **194**(1-4): 330-356.
- [5] Lenhard R J, Oostrom M, Dane J H. A constitutive model for air- NAPL-water flow in the vadose zone accounting for residual NAPL in strongly water-wet porous media [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, **73**(1-4): 281-304.
- [6] Alvim-Ferraz M C M, Albergaria J T, Delerue-Matos C. Soil remediation time to achieve clean-up goals I: influence of soil water content [J]. Chemosphere, 2006, **62**(5): 853-860.
- [7] Frank U, Barkley N. Remediation of low permeability subsurface formations by fracturing enhancement of soil vapor extraction [J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, **40**(2): 191-201.
- [8] USEPA. In situ soil vapor extraction (EPA-510, B-95-007) [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996.
- [9] USEPA. Development of recommendations and methods to support assessment of soil venting performance and closure (EPA-600, R-01-070) [R]. Washington DC: Office of Research and Development, 2001.
- [10] Poppendieck D G, Loehr R C, Webster M T. Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems 2. Field study [J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, **69**(1): 95-105.
- [11] Heron G, Van Zutphen M, Christensen T H, *et al.* Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: A laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a Silty, low-permeable soil contaminated with trichloroethylene [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(10): 1474-1481.
- [12] Poppendieck D G, Loehr R C, Webster M T. Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems: 1. Laboratory studies [J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, **69**(1): 81-93.
- [13] Mohamed A M I, El-menshawly N, Saif A M. Remediation of saturated soil contaminated with petroleum products using air sparging with thermal enhancement [J]. Journal of Environment Management, 2007, **83**(3): 339-350.
- [14] Qin C Y, Zhao Y S, Zhen W, *et al.* Study on influencing factors on removal of chlorobenzene from unsaturated zone by soil vapor extraction [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **176** (1-3): 294-299.
- [15] James J, Wilson D J, Bolick J R. Soil clean up by in-situ aeration, XIV, Effects of random permeability variations on soil vapor extraction cleanup times [J]. Separation Science and Technology, 1994, **29**(6): 701-725.
- [16] Williams D H, Fleming I. Spectroscopic methods in organic chemistry [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [17] Fen C S, Chang C K. Influence of spatial variability of soil properties on mass removal for a soil vapor extraction system [J]. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2007, **30** (6): 997-1007.
- [18] Yoon H, Werth C J, Valocchi A J. *et al.* Impact of nonaqueous phase liquid (NAPL) source zone architecture on mass removal mechanisms in strongly layered heterogeneous porous media during soil vapor extraction [J]. Journal of Contaminant

- Hydrology, 2008, **100**(1-2): 58-71.
- [19] Park G, Shin H S, Ko S O. A laboratory and pilot study of thermally enhanced soil vapor extraction method for the removal of semi-volatile organic contaminants[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2005, **40**(4): 881-897.
- [20] Sun H, Tateda M, Ike M, *et al.* Short-and long-term sorption/desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons onto artificial solids: effects of particle and pore sizes and organic matters[J]. Water Resource, 2003, **37**(12): 2960-2968.
- [21] Soares A A, Albergaria J T, Domingues V F, *et al.* Remediation of soils combining soil vapor extraction and bioremediation: benzene[J]. Chemosphere, 2010, **80**(8): 823-828.
- [22] 殷甫祥, 张胜田, 赵欣, 等. 气相抽提法(SVE)去除土壤中挥发性有机污染物的实验研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1454-1461.
- [23] Albergaria J T, Alvim-Ferraz M C M, Matos C D. Remediation efficiency of vapor extraction of sandy contaminated with cyclohexane: Influence of air flow rate, water and natural organic matter content[J]. Environmental Pollution, 2006, **143**(1): 146-152.
- [24] Poulsen T G, Moldrup P, Yamaguchi T, *et al.* VOC vapor sorption in soil: Soil type dependent model and implication for vapor extraction [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(2): 146-155.
- [25] 贺晓珍, 周友亚, 汪莉, 等. 土壤气相抽提法去除红壤中挥发性有机污染物的影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(5): 679-683.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2013年9月27日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续12次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行