

气相抽提法 (SVE) 去除土壤中挥发性有机污染物的实验研究

殷甫祥^{1,2,3,4}, 张胜田^{1,3}, 赵欣^{1,3}, 封克⁴, 林玉锁^{1,3*}

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 泰州职业技术学院环境与化学工程系, 泰州 225300; 3. 环境保护部国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042; 4. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127)

摘要:研究了土柱直径、土壤粒径和不同污染物等对模拟 SVE 通风效率的影响. 以苯、甲苯、乙苯、正丙苯为污染物进行的实验结果表明, 柱底面积/装土高度 (S/H) 越大, 去除率越高. 不同粒径受甲苯、乙苯、正丙苯污染的土壤进行的实验结果表明, 当土壤粒径由 10 目变为 20~40 目后, SVE 通风效率降低, 污染物去除难度增大. 受苯、甲苯、乙苯污染土壤在不同通风流量条件下的实验结果表明, 在通风总时间 96 h 条件下, 通风流量为 $0.10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时即能将污染物基本去除, 苯、甲苯、乙苯分别在 12、18、48 h 内进入拖尾期, TVOCs 去除率达到 99.52%. 实验还表明, 苯环上碳原子数越多, 饱和蒸气压降低, 挥发性减弱, 导致污染土壤难以净化, 饱和蒸气压低的正丙苯对土壤中甲苯、乙苯脱附和挥发的阻碍作用明显, VOCs 的分子结构和性质也是影响污染物去除效率的重要因素.

关键词:气相抽提; 土壤修复; 挥发性有机物; 去除率; 饱和蒸气压; 甲苯; 乙苯; 丙苯

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1454-08

Removal of Volatile Organic Compounds in Soils by Soil Vapor Extraction (SVE)

YIN Fu-xiang^{1,2,3,4}, ZHANG Sheng-tian^{1,3}, ZHAO Xin^{1,3}, FENG Ke⁴, LIN Yu-suo^{1,3}

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 2. Department of Environmental and Chemical Engineering, Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225300, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 4. College of Environmental Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: An experiment study has been carried out to investigate effects of the diameter of soil columns, the size of soil particulate and different contaminants on efficiency of simulated soil vapor extraction (SVE). Experiments with benzene, toluene, ethylbenzene and *n*-propylbenzene contaminated soils showed that larger bottom area/soil height (S/H) of the columns led to higher efficiency on removal of contaminants. Experiments with contaminated soils of different particulate size showed that the efficiency of SVE decreased with increases in soil particulate size, from 10 mesh to between 20 mesh and 40 mesh and removal of contaminants in soils became more difficult. Experiments with contaminated soils under different ventilation rates suggested that soil vapor extraction at a ventilation rate of $0.10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ can roughly remove most contaminants from the soils. Decreasing of contaminants in soils entered tailing stages after 12 h, 18 h and 48 h for benzene, toluene and ethylbenzene, respectively. Removal rate of TVOCs (Total VOCs) reached a level as high as 99.52%. The results of the experiment have indicated that molecule structure and properties of the VOCs are also important factors which have effects on removal rates of the contaminants. Increases in carbon number on the benzene ring, decreases in vapor pressure and volatile capability resulted in higher difficulties in soil decontamination. *n*-propylbenzene has a lower vapor pressure than toluene and ethylbenzene which led to a significant retard effect on desorption and volatilization of benzene and ethylbenzene.

Key words: soil vapor extraction (SVE); soil remediation; volatile organic compounds (VOCs); removal rate; saturated vapor pressure; toluene; ethylbenzene; *n*-propylbenzene

随着我国城市化进程加快, 城区内置换出的工业污染场地越来越多, 土壤污染问题日益突出. 这些工业场地污染物中含有较大比重的挥发性有机物 (VOCs), 若不加治理或修复直接使用将存在很大的环境隐患和人体健康风险^[1,2]. 而目前我国尚无相应的法律法规对污染场地实行有效管理^[3,4], 由于含 VOCs 的污染场地处理不当而引发的人体健康损害事故已有报道: 2004 年, 北京地铁 5 号线宋家庄

工地挖掘过程中, 因场地挥发性污染物造成 3 人死亡, 多人受伤^[5].

土壤气相抽提法 (soil vapor extraction, SVE) 是

收稿日期: 2010-05-09; 修订日期: 2010-10-06

基金项目: 2009 环保公益性行业科研专项 (200909075); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (G470011)

作者简介: 殷甫祥 (1981~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染场地土壤修复技术, E-mail: yfxyzd@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: lys@nies.org

一种向污染区域通入新鲜空气,将 VOCs 从土壤中解吸并随空气流引至地上处理的原位修复技术^[6]. SVE 技术具有成本低、可操作性强、处理污染物的种类多、可由标准设备操作、不破坏土壤结构等显著特点^[7,8],对回收利用废物有潜在价值. 因此广泛应用于挥发性有机物污染场地的修复. 目前,许多国外学者做了大量的 SVE 实验和建模工作,对不同变量的影响做了较为系统的研究^[9-15]. 我国在这方面也有少量报道,如:贺晓珍等^[16]研究了通风流量、土壤含水率以及间歇操作等对苯污染红壤去污过程的影响;杨乐巍等^[17]研究了不同含水量条件下,苯在气-水-油-固四相共存的土壤气相抽提体系中的相间传质过程;李金惠等^[18]在对油污染土壤的通风去污过程机制进行分析的基础上建立了一个在实验限定条件范围内准确和适用的简化机制模拟模型,研究了抽排气体流速、土壤含水率和土质对去污过程的影响. 本研究在以往单一污染的基础上分析了苯(benzene)、甲苯(toluene)、乙苯(ethylbenzene)和甲

苯(toluene)、乙苯(ethylbenzene)、正丙苯(*n*-propylbenzene)这 2 组混合污染物污染土壤的 SVE 通风情况,探讨了不同柱底面积/装土高度(S/H)、不同土壤粒径、不同 VOC 的分子结构和性质等因素对 SVE 通风效率的影响,以期对挥发性有机物污染土壤的修复提供依据.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

苯,AR,含量 $\geq 99.5\%$,南京化学试剂一厂;甲苯,AR,含量 $\geq 99.5\%$,南京化学试剂一厂;乙苯,AR,含量 $\geq 98.5\%$,国药集团化学试剂有限公司;正丙苯,含量 $\geq 98\%$,ACROS Organics;甲醇,色谱纯,美国 J. T. Baker 公司. 供试土壤为南京市某地区未受污染土壤,采样深度 0~50 cm. 土壤类型为黄棕壤,质地为粉质壤土^[19]. 土样自然风干后过筛,去除植物残留,取 10 目、20~40 目土. 其理化性质见表 1.

表 1 实验土壤理化性质¹⁾

pH	OM /g·kg ⁻¹	OC /g·kg ⁻¹	密度 ^[19,20] /g·cm ⁻³	容重 /g·cm ⁻³	粒径分布/%			
					0~2 μm	2~50 μm	50~100 μm	100~1 000 μm
5.45	43.91	25.47	2.73	1.03	16.9	71.8	6.24	5.09

1) OM 为有机质,OC 为有机碳

污染土壤制备方法如下. 1 号样品:将含水率约 18.0% 的 10 目土样 4.5 kg 和甲苯、乙苯、正丙苯的混合溶液(1:1:1)50 mL 等份分层装入 4 L 的玻璃瓶,同时做 4 个平行. 密封静置 1 周后将土倒入直径 20 cm、高 90 cm 的有机玻璃桶内,密闭,迅速混匀,取平行土样装入样品瓶待测,再向有机玻璃土柱内分别装土 3.7 kg,分组实验. 2 号样品:将含水率约 18.0% 的 10 目土样 4.5 kg 和苯、甲苯、乙苯的混合溶液(1:1:1)50 mL 等份分层装入 4 L 的玻璃瓶(其余同 1 号).

1.2 实验仪器

玻璃转子流量计;空气泵(THOMAS USA);分析天平;1 mL 微量进样器(美国安捷伦);样品瓶;GC-MS(美国安捷伦 7890GC/5975MS);吹扫捕集(美国 OI 45524660);激光粒度仪(美国 BECKMAN LS230).

1.3 实验装置

土柱:直径为 10、12、14、16 cm,高 50 cm 的有机玻璃柱,土柱底部为多孔板,侧壁 5 个取样口(见图

1 取样口 1、2、3、4、5)距多孔板分别是 9、18、27、36、45 cm.

SVE 通风系统:由空气泵、玻璃转子流量计、有机玻璃土柱、活性炭吸附柱和气体管道等组成,如图 1 所示. 空气在空气泵作用下经玻璃转子流量计调节流量后,依次通过土柱底部气阀、底部锥形口和底部多孔板均匀注入土柱. 土柱内污染物在一定流速的空气流吹脱携带作用后,经活性炭吸附,尾气排放到空气中.

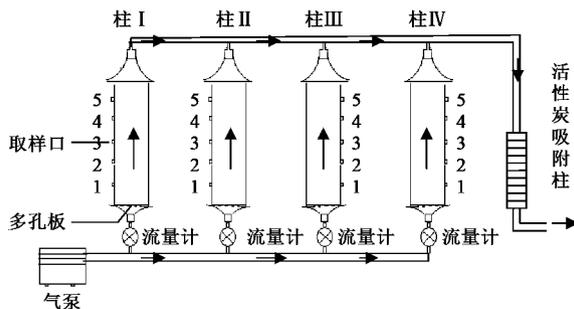


图 1 SVE 模拟实验示意

Fig. 1 Diagram of imitating experiment for SVE

1.4 实验方法

(1) 实验设计 研究不同柱径、不同粒径和不同挥发性有机物及其性质对土壤中多组分污染物去除效率的影响。

(2) 采样 通风前后取混合土样,每隔一定时间从土柱侧取样口取样,装入样品瓶待测。

1.5 分析与检测方法

(1) 样品预处理 取样后转移入样品瓶中,加入 10 mL 甲醇后盖紧瓶盖,振荡,冷藏静置,用 1 mL 微量进样器取 1 mL 上清液迅速注入装有 39 mL 超纯水的样品瓶中,通过吹扫捕集样品浓缩仪,GC-MS 测定。

(2) 吹扫捕集条件 美国 OI(45524660)吹扫捕集,吸附阱温度为 40℃,吹脱时间为 15 min,热解脱温度 190℃ (4 min),传输管线温度 100℃。

(3) 安捷伦 7890GC/5975MS 条件 安捷伦 7890 气相色谱仪,色谱柱:DB-VRX 30 m × 0.25 mm × 1.4 μm;载气为高纯氦气,流量为 1 mL·min⁻¹,恒流模式;程序升温:40℃ 保持 5 min,8℃/min 升至 200℃,10℃/min 升至 230℃,保持 2 min;进样口:进样口温度 200℃,分流进样,分流比为 50:1;传输线:250℃;离子源(EI 源):230℃;Quadrapole(四级杆)温度:150℃;扫描范围为 35~260 u。

2 结果与讨论

2.1 不同土柱直径对 SVE 去除效率的影响

将“1 号”污染土壤分别装入直径为 I (16 cm)、II (14 cm)、III (12 cm)、IV (10 cm) 的土柱内,每柱装填 3 700 g,柱底面积/装土高度(S/H)分别为 12.56、6.99、3.43、1.74。在通风流量 0.15 L·min⁻¹ 条件下通风 96 h。初始浓度取平均值,分析柱 IV 各取样口处土壤中 TVOCs (Total VOCs) 浓度随时间变化情况(图 2),表明在 SVE 通风过程中取样口 1 处的污染物去除最快,随通风时间的延长,发现土壤中 TVOCs 随土壤装填高度的增加,残留增多,这充分说明装填土壤的高度对 SVE 通风效率的影响很大。因此,取样口 1 和表层取样口处土壤中污染物的去除情况即可反映出 SVE 的通风去除效率(图 3、4)。

图 3 表明在取样口 1 处,TVOCs 浓度衰减速率随着土柱直径的变小而加快,进入拖尾期的时间也相应缩短,SVE 通风去除效率增大。而图 4 则表明土柱直径越小,装土高度越高,表层取样口土壤中 TVOCs 浓度衰减速率差异减小,进入拖尾期时间相应延长,去除难度增大。在柱 IV-4(表层取样口)处

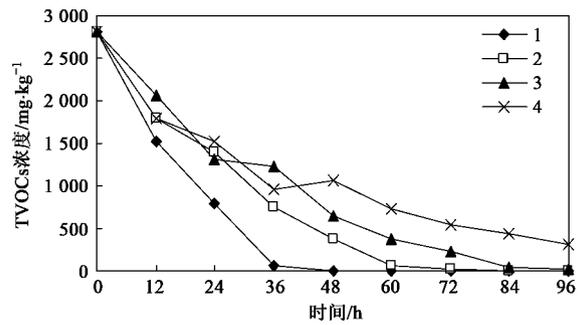


图 2 柱径为 10 cm 时各取样口土壤中 TVOCs 浓度随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of the concentration of TVOCs at various sampling ports at column diameter of 10 cm varying with time

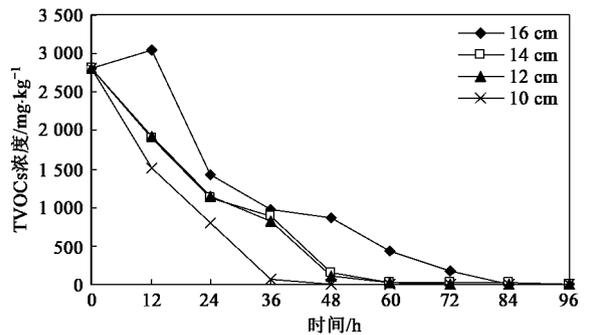


图 3 不同柱径条件下取样口 1 处土壤中 TVOCs 浓度随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of the concentration of TVOCs at sampling port 1 at different column diameter varying with time

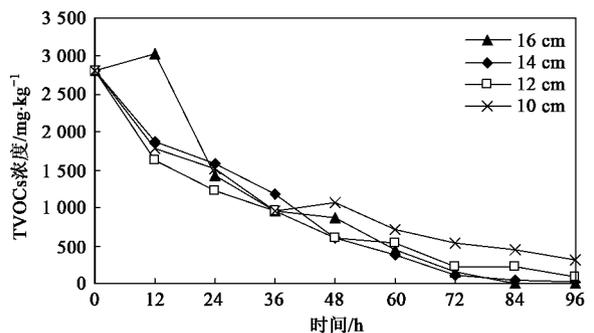


图 4 不同柱径条件下表层取样口土壤中 TVOCs 浓度随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of the concentration of TVOCs at surface sampling port at different column diameter varying with time

TVOCs 尚未进入拖尾期,浓度明显高于其他土柱内表层土壤中 TVOCs 的浓度。

从柱 I ~ IV 表层取样口处土壤中各污染组分的角度分析去除效果(图 5),通风初期,由于底层土壤中吹脱的污染物在上层土壤中再吸附,使得柱 I - I

(即表层取样口)处土壤中甲苯、乙苯、正丙苯的浓度高于初始浓度,即表现为去除率出现负值的现象,但这种吸附量高于吹脱量的持续时间较短。对各柱内单一组分而言,甲苯都能在较短时间内进入拖尾期,去除率都高于 99.90%;乙苯进入拖尾期时间较甲苯滞后,去除率也能达到 99.10%以上,基本去除干净;柱 I 和柱 II 内正丙苯去除率能达到 98.10%以上,柱 III 和柱 IV 内正丙苯去除率仅为 89.65%和 56.42%,表明正丙苯受柱径影响显著。

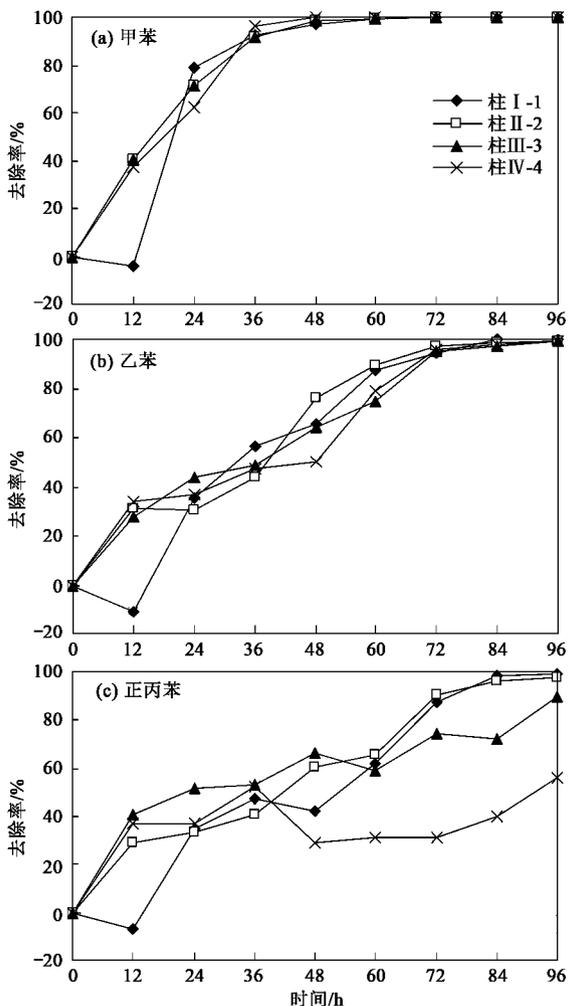


图 5 各土柱表层取样口处甲苯、乙苯、正丙苯去除率随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of the removal efficiency of toluene, ethylbenzene and *n*-propylbenzene at surface sampling port varying with time

而从土柱底面积/装土高度(S/H)与 SVE 通风后 TVOCs 去除率之间的关系(图 6)可以看出 S/H 越大,去除率越高。通风后各柱 TVOCs 去除率为:柱 I (99.68%)、柱 II (99.30%)、柱 III (98.77%)、柱 IV (96.99%)。

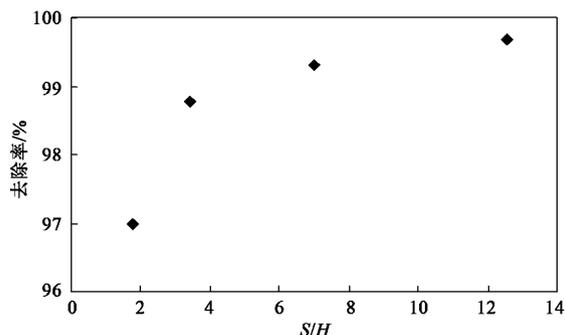


图 6 土柱底面积/装土高度(S/H)与通风后 TVOCs 去除率的关系

Fig. 6 Relation of the soil column bottom area/loading soil height (S/H) and the removal efficiency after ventilated

综上所述,土柱底面积/装土高度(S/H)越大,去除率越高,是因为底面积增大,使土壤与空气接触面积增大,有利于 VOCs 的挥发和去除;另一方面,由于柱径减小,柱底部空气流速较大,污染物去除率较高,柱径的减小必然导致土壤装填高度的增加和阻力的增大^[21],空气流经土柱的时间增加,土壤气相流速减小^[8],导致上层土壤中污染物去除困难,加之下层土壤中吹脱的 VOCs 部分被上层土壤和土壤有机质再吸附,而且对分子结构复杂的化合物吸附作用更强^[22],故 VOCs 去除不易。通风过程中出现土壤中 VOCs 浓度升高(或去除率为负)的现象还可能是因为污染物在上层土壤中自动脱附经扩散作用和重力作用后出现了部分污染物下沉的现象^[23,24],同时由于 VOCs 被移除时发生了气-液及固-液颗粒间的物质交换而产生了迟滞效应^[25]。

2.2 土壤粒径对 SVE 去除效率的影响

本实验供试土壤粒径为 20~40 目,在含水率约 18%,柱径为 14 cm,通风流量为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下通风 96 h,分析了表层取样口处土壤中各污染物去除率随时间的变化情况(图 7)。甲苯在通风 60 h 后进入拖尾期,乙苯、正丙苯均未进入拖尾期,且正丙苯在 48 h 时浓度高于初始浓度。通风结束后表层取样口处土壤中甲苯、乙苯、正丙苯的去除率分别为:98.12%、93.25%、53.16%,而取混合土样测得甲苯、乙苯、正丙苯的去除率分别为:99.11%、94.19%、54.70%。

对比粒径为 10 目和 20~40 目土壤中 TVOCs 去除效果(图 8),可以看出通风结束后粒径为 20~40 目土壤中 TVOCs 仍未进入拖尾期,其去除率仅为 85.92%;而粒径为 10 目的土壤中 TVOCs 在通风 72 h 后进入拖尾期,通风效率较高。这表明土壤粒

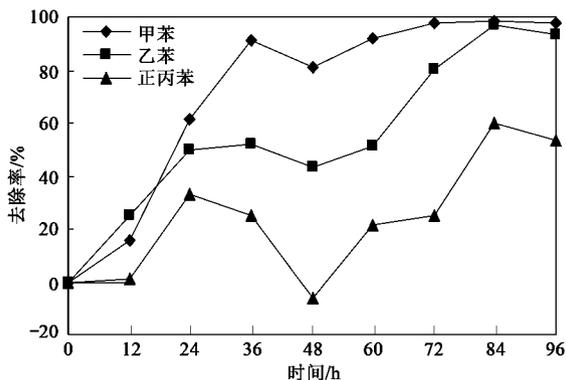


图 7 20~40 目土壤中甲苯、乙苯、正丙苯去除率随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of the removal efficiency of toluene, ethylbenzene and *n*-propylbenzene at 20-40 mesh varying with time

径的变小,明显增加了污染物去除的难度,使污染土壤中甲苯、乙苯、正丙苯的去除效率下降.这是由于它们在土壤中为非水相液体,土壤粒径变小、比表面积增大,对它们的吸附能力增强,这可能是在通风 36 h 后不同土壤粒径条件去除率出现明显差异的原因;同时堆积紧密度增加,进而导致土壤通透性降低,使 SVE 通风效率降低. Wilkins 等^[26]认为当土壤中含有非水相液体时,土壤颗粒的平均直径也影

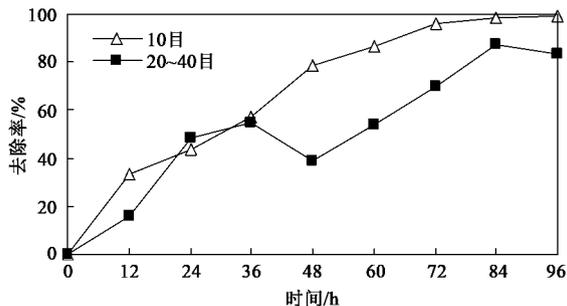


图 8 通风流量 0.15 L·min⁻¹,含水率为 18%,不同粒径时表层取样口处土壤中 TVOCs 去除率随时间的变化曲线

Fig. 8 Curves of the removal efficiency of TVOCs at 0.15 L·min⁻¹ airflow rate, moisture content of 18% and different particle size at surface sampling port varying with time

响 VOCs 的去除效果,降低土壤颗粒大小会降低非水相液体与气相间的传质系数,从而降低 SVE 修复效率.

2.3 通风流量对污染土壤中苯、甲苯、乙苯去除率的影响

本实验选用“2 号”污染土壤,分别在 0.10、0.20 和 0.30 L·min⁻¹的通风流量条件下进行实验,表层取样口苯、甲苯、乙苯、TVOCs 去除率随时间变化情况如图 9 所示.

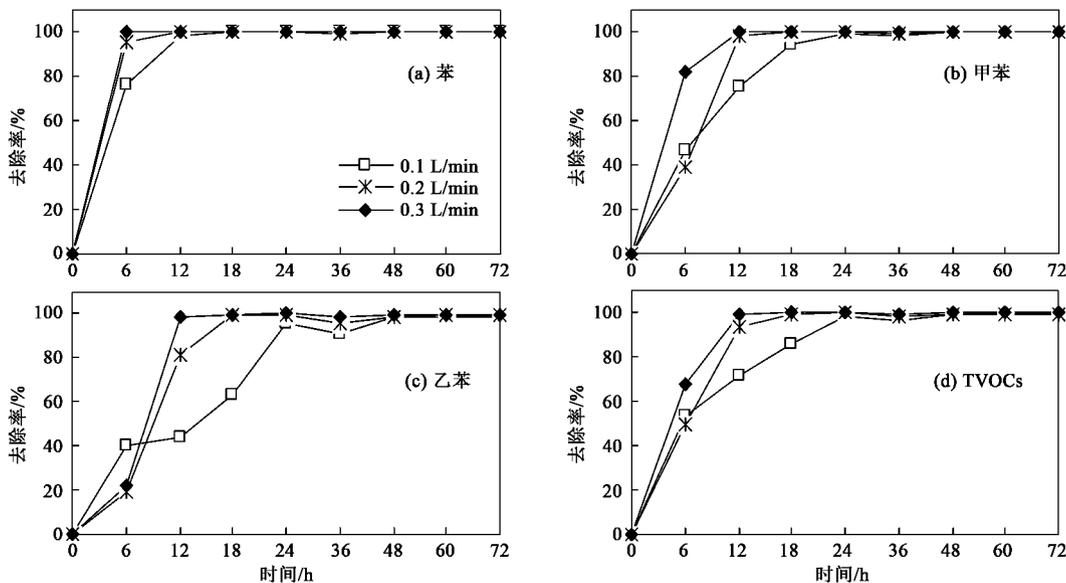


图 9 苯、甲苯、乙苯、TVOCs 去除率随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of the removal efficiency of benzene, toluene, ethylbenzene and TVOCs varying with time

通风流量为 0.10、0.20、0.30 L·min⁻¹时 TVOCs 进入拖尾期时间分别为 48、18、12 h;土壤中苯、甲苯、乙苯都能在较短时间内进入拖尾期,并随通风流

量的增加,污染物进入拖尾期的时间相应缩短;而且苯去除最快、甲苯次之、乙苯最慢.通风后取混合土样检测,通风流量为 0.10 L·min⁻¹时,苯、甲苯、乙

苯、TVOCs 去除率分别为: 99.83%、99.72%、99.01%、99.52%;通风流量为 $0.20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,苯、甲苯、乙苯、TVOCs 去除率分别为: 99.84%、99.74%、99.06%、99.55%;通风流量为 $0.30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,苯、甲苯、乙苯、TVOCs 去除率分别为: 99.84%、99.86%、99.55%、99.75%。因此,当通风流量为 $0.10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时就能高效地去除土壤中的 VOCs。

2.4 污染物种类和性质对 SVE 去除效率的影响

从“1号”污染土壤在通风流量为 $0.15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时表层取样口污染物去除率随时间变化情况(图10),表层取样口土壤中甲苯、乙苯、正丙苯和 TVOCs 进入拖尾期时间分别为:48、72、72、72 h,通风后取混合土样检测,甲苯、乙苯、正丙苯、TVOCs 的去除率分别达到了 99.84%、99.45%、98.25% 和 99.30%。污染物去除的快慢顺序为甲苯、乙苯、正丙苯。

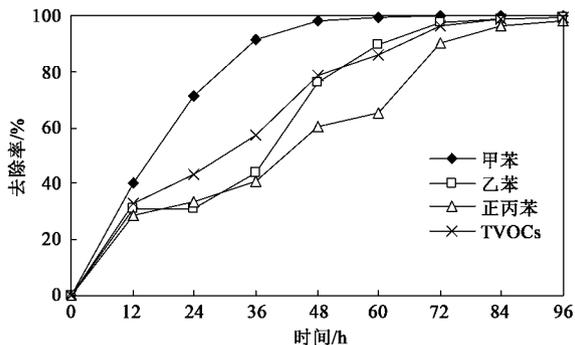


图 10 通风流量为 $0.15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,

甲苯、乙苯、正丙苯、TVOCs 去除率随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of the removal efficiency of toluene, ethylbenzene, *n*-propylbenzene and TVOCs at $0.15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ varying with time

对比图 10 和图 11 中“2号”污染土壤在通风流量为 $0.10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下表层取样口污染物去除率随时间变化情况可知,“1号”土壤在通风流量为“2号”土壤通风流量 1.5 倍的条件下,TVOCs 进入拖尾期所需时间是“2号”土壤的 1.75 倍;并且“1号”土壤中的甲苯、乙苯更难去除,进入拖尾期时间是“2号”土壤的 2~3 倍。导致这 2 种土壤中污染物去除难易不同的原因在于所含污染物不同:“1号”土壤中含有正丙苯,“2号”土壤中含有苯。本研究结果显示苯、甲苯、乙苯污染土壤的 SVE 通风去除效率优于甲苯、乙苯、正丙苯污染土壤的 SVE 通风去除效率。由于土壤颗粒和有机质对芳香化合物这类憎水有机物具有吸附作用^[27],同时随着苯环支链

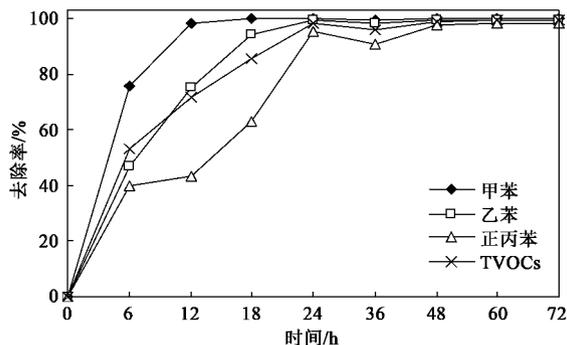


图 11 通风流量为 $0.10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,苯、甲苯、乙苯、TVOCs 去除率随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of the removal efficiency of benzene, toluene, ethylbenzene and TVOCs at $0.10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ varying with time

上碳原子数增加,所以土壤颗粒和有机质对 VOCs 的吸附作用相应增强,更容易被土壤吸附而难以脱附。李金惠等^[18]认为土壤中有有机质含量越高,与有机污染物的结合能力越强。

由于苯、甲苯、乙苯、正丙苯的苯环支链上依次增加了一个 $-\text{CH}_2$ 基团,所以它们的性质也不同。正丙苯的沸点是 4 种苯系物中最高的,是苯的近 2 倍。根据文献[28,29]中 Antoine 方程式[式(1)]和 4 种苯系物饱和蒸气压的有关参数(表 2)计算出 25°C 时苯、甲苯、乙苯、正丙苯的饱和蒸气压(换算为标准大气压后)依次为:12 689、3 785、1 266 和 453 Pa。

$$\lg p = A - \frac{B}{C + t} \quad (1)$$

式中, p 为化合物的蒸气压(mmHg); t 为摄氏温度($^\circ\text{C}$); A 、 B 、 C 为常数(见表 2)。

可见 4 种苯系物的饱和蒸气压相差很大,其中正丙苯的饱和蒸气压最低。由于有机物的饱和蒸气压越低越难以挥发,而污染物都是混溶后加入土壤,在土壤中仍能相互包围,分子间存在较强的范德华力,饱和蒸气压低的化合物对饱和蒸气压高的化合物的挥发有较强的“阻碍”作用^[21]。因此多组分混合污染土壤气相抽提去除效率受饱和蒸气压低的化合物影响最大,即影响“1号”和“2号”土壤通风效率的主要化合物分别为正丙苯和乙苯。而“2号”土壤中苯的饱和蒸气压又很高,约为乙苯的 10 倍,所以乙苯对苯挥发的阻碍作用不够显著,相反,由于苯的强挥发性,在被气流从土壤中脱附携带过程中,会对甲苯、乙苯的挥发起到一定的促进作用;在“1号”土壤中甲苯、乙苯、正丙苯的饱和蒸气压相差相对较

小,饱和蒸气压低的正丙苯对甲苯、乙苯在土壤中脱附挥发的阻碍作用较大,导致甲苯、乙苯进入拖尾期的时间比“2号”土壤明显延长,所以甲苯、乙苯、正丙苯污染的土壤更难净化。

综合土壤粒径、土壤有机质和有机物饱和蒸气

压的影响,可以得出分子结构简单,分子量小,沸点低,饱和蒸气压高,挥发性强的 VOC 更容易脱附并去除的结论^[8],4种苯系物去除快慢顺序为:苯、甲苯、乙苯、正丙苯。因此挥发性有机物种类和性质也是影响其通风去除效率的重要因素。

表 2 苯系物蒸气压^[28]

Table 2 Vapor pressure of benzene series

物质	化学式	温度范围/°C	A	B	C
苯	C ₆ H ₆	8 ~ 103	6.905 65	1 211. 033	220. 79
甲苯	C ₇ H ₈	6 ~ 137	6.954 64	1 344. 800	219. 48
乙苯	C ₈ H ₁₀	26 ~ 164	6.957 19	1 424. 255	213. 21
正丙苯	C ₉ H ₁₂	43 ~ 188	6.951 42	1 491. 297	207. 14

3 结论

(1) 土柱直径对 SVE 修复效果有一定影响。相同土壤装填量,相同通风流量,相同含水率条件下, S/H 越大,去除效率越高。

(2) 土壤颗粒的大小对甲苯、乙苯、正丙苯的去除都有很大影响。土壤颗粒粒径变小,堆积紧密度增加,降低了非水相液体与气相间的传质系数,污染物去除难度增大,从而使 SVE 通风效率降低。

(3) 饱和蒸气压高的污染物去除速度快,SVE 去除效率高。苯环上碳原子数越多,沸点越高,饱和蒸气压越低,挥发性越弱,污染物的去除效率也越低,反之亦然。故 4 种苯系物去除快慢顺序依次为:苯、甲苯、乙苯、正丙苯。

参考文献:

[1] 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):5-7, 29.

[2] 郭观林,王世杰,施烈焰,等. 某废弃化工场地 VOC/SVOC 污染土壤健康风险分析[J]. 环境科学,2010,31(2):397-402.

[3] 陈怀满,郑春荣,周东美,等. 关于中国土壤环境保护研究中一些值得关注的问题[J]. 农业环境科学学报,2004,23(6):1224-1245.

[4] 吴健,沈根祥,黄沈发,等. 挥发性有机物污染土壤工程修复技术研究进展[J]. 土壤通报,2005,36(3):430-436.

[5] 新京报. 北京地铁 5 号线掘出有毒气体,工期影响尚难定论 [EB/OL]. <http://news.tom.com/1002/3291/200451-875492.htm1>. 2004-05-01.

[6] 黄国强,李凌,李鑫钢,等. 土壤污染的原位修复[J]. 环境科学动态,2000,(3):25-27.

[7] 赵留辉,马娟,杨建涛,等. 浅析石油污染土壤的处理技术[J]. 甘肃科技,2003,19(10):36-37.

[8] 孙铁珩,李培军,周启星,等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京:科学出版社,2005. 255-256.

[9] Kearl P M, Korte N E, Gleason T A, et al. Vapor extraction experiments with laboratory soil columns: implications for field

programs[J]. Waste Management,1991,11(4):231-239.

[10] Brian C K, Aelion C M. Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/oil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation [J]. Journal of Contaminant Hydrology,2000,41:367-383.

[11] Kaleris V, Croisé J. Estimation of cleanup time for continuous and pulsed soil vapor extraction [J]. Journal of Hydrology, 1997, 194:330-356.

[12] Kaleris V. Influence of rate-limited sorption on the cleanup of layered soils by vapor extraction [J]. Journal of Contaminant Hydrology,2002,55:1-27.

[13] David J W, Rodríguez-Maroto J M, Goamez-Lahoz C, et al. Soil cleanup by In-Situ aeration. XIX. effects of spill age on soil vapor extraction remediation rates [J]. Separation Science and Technology,1994,29(9):1645-1671.

[14] David J W. Soil cleanup by In-Situ aeration XVI. solution and diffusion in Mass-Transport-limited operation and calculation of Darcs's constants[J]. Separation Science and Technology,1994, 29(13):1133-1163.

[15] Hoier C K, Sonnenborg T O, Jensen K H, et al. Experimental investigation of pneumatic soil vapor extraction [J]. Journal of Contaminant Hydrology,2007,89:29-47.

[16] 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.

[17] 杨乐巍,沈铁孟,肖锋,等. 含有非水相液体(苯)的土壤气相抽提体系传质实验研究[J]. 土壤学报,2008,45(6):1046-1050.

[18] 李金惠,聂永丰,马海斌,等. 油污染土壤气体抽排去污模型及影响因素[J]. 环境科学,2002,23(1):92-96.

[19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化性质[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978. 470.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析化学[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000. 266-269.

[21] 北京大学化学系. 化学工程基础[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

[22] 戴树珪. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2005. 224.

- [23] 黄国强,姜斌,李鑫钢,等. VOCs 在土壤孔隙中扩散模型的适用性[J]. 天津大学学报,2004,**37**(11):945-948.
- [24] Kaslusky S F, Udell K S. Co-injection of air and steam of the prevention of the downward migration of DNAPLs during steam enhanced extraction: an experimental evaluation of optimum injection ratio predictions [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2005,**77**:325-347.
- [25] 彭胜,陈家军,王红旗,等. 挥发性有机污染物在土壤中的运移机制与模型[J]. 土壤学报,2001,**38**(3):315-323.
- [26] Wilkins M D, Abriola L M, Pennell K D, *et al.* An experimental investigation of rate-limited non-aqueous phase liquid volatilization in unsaturated porous media: steady state mass transfer [J]. Water Resource Research, 1995,**31**(9):2159-2172.
- [27] 陈迪云,彭燕. 憎水有机物在水/土壤、沉积物体系中吸附与解吸[J]. 化工时刊,2001,**4**:11-15.
- [28] Dean J A ,魏俊方. 兰氏化学手册[M]. 北京:科学出版社,1999.1654,1663-1683.
- [29] 陈军,马沛生,丁富新,等. Antoine 方程对含极微蒸气压范围的统一关联[J]. 化学工程,2001,**29**(6):46-48.