

气相抽提法(SVE)去除土壤中挥发性有机污染物的试验研究

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

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 3.国家环境保护部土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042)

摘要:通过模拟土壤气相抽提技术(Soil Vapor Extraction, SVE)通风处理甲苯、乙苯、正丙苯混合污染的黄棕壤,研究了不同通风流量、不同土壤含水率、间歇通风等因素对目标污染物去除率的影响。结果表明,通风流量和含水率是影响去除率的重要因素。当柱径 14 cm、土壤粒径为 10 目连续通风时,最佳通风流量为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,最佳含水率约 17.98%条件下,甲苯、乙苯、正丙苯的去除率分别为 99.84%、99.45%、98.25%,总挥发性有机物(Total VOCs, TVOCs)去除率达到了 99.30%,且优于间歇通风;含水率为 6.01%、24.73%时,TVOCs 的去除率仅为 63.03%、89.03%,表明含水率过高或过低都不利于 VOCs 的去除;苯环上支链越长,分子量越大,沸点越高,越难以被脱附去除,反之亦然,表明有机物的分子结构和大小也是影响通风效果的重要因素。

关键词:气相抽提(SVE)土壤;挥发性有机物(VOCs);甲苯;乙苯;正丙苯

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1495-07

Soil Vapor Extraction(SVE) to Remove Volatile Organic Compounds in Soil

YIN Fu-xiang^{1,2,3}, ZHANG Sheng-tian^{2,3}, ZHAO Xin^{2,3}, FENG Ke¹, LIN Yu-suo^{2,3}

(1.College of Environmental Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Science, Nanjing 210042, China; 3.State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing 210042, China)

Abstract: Soil vapor extraction(SVE) has been widely used to remove volatile organic compounds(VOCs) from soils as an in-situ remediation technology. Simulated ventilation study has been carried out in a laboratory for a yellow brown soil contaminated with toluene, ethylbenzene and n-propylbenzene. Effects of ventilation rate, soil moisture content and time interval between aeration on removal efficiency of contaminants had been investigated. The results showed that the ventilation rate and soil moisture content were two key factors influencing removal rate of VOCs by SVE. Removal percentages of 99.84%, 99.45%, 98.25% and 99.30% for toluene, ethylbenzene, n-propylbenzene and total VOCs, respectively, were observed under the following experimental conditions: a column diameter of 14 cm, tested soil being passed through a 10 mesh sieve, a continuous up-flow rate of $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ and soil moisture water content at about 17.98%. The removal rate of VOC under continuous aeration was generally higher than under the intermittent aeration. At higher or lower soil moisture contents of 6.01% or 24.73%, the removal efficiency of total VOCs amounts to 63.03% or 89.03%, which indicated negative effects of soil moisture content at too high or too low levels. A general trend was that molecular structure and size of benzene series were also important factors influencing remediation efficiency of VOCs. Longer branched chain on benzene ring, greater molecular weight and higher boiling point would lead to more difficult decontamination of VOCs from soils.

Keywords: soil vapor extraction(SVE); VOCs; toluene; ethylbenzene; n-propylbenzene

收稿日期:2010-03-15

基金项目:《POPs 农药类污染场地关键修复技术集成与示范》2009 环保公益性行业科研专项(200909075)

作者简介:殷甫祥(1981—),男,硕士研究生,主要从事污染场地土壤修复技术研究。E-mail:yfxyzdx@yahoo.cn

通讯作者:林玉锁 E-mail:lys@nies.org.cn

我国场地土壤污染问题日益突出。随着我国城市化进程加快,城区内将置换出大量工业污染场地,这些工业污染场地土壤中,挥发性有机物(VOCs)占有较大的比重,如不加治理或修复而直接使用将存在很大的环境隐患和人体健康风险^[1]。

土壤中 VOCs(如苯系物难于生物降解,不累积于食物链,但对土壤与生物体健康造成严重影响,直接导致白血病的发生)^[2]作为一类特殊的污染物,因具有隐蔽性、挥发性、毒害性、累积性和多样性等污染特性^[3],被列为环境中潜在危险性大、应优先控制的毒害性污染物^[4]。许多发达国家已明文规定,对受 VOCs 污染的土壤必须进行妥善处置,以保证生物和环境的安全^[3]。

土壤气相抽提法 (Soil Vapor Extraction,SVE)是一种向污染区域通入新鲜空气,将 VOCs 从土壤中解吸至空气流并引至地面上处理的原位技术^[5]。因其高效性^[6]而广泛应用于挥发性有机物污染场地的修复。本文以 VOCs 中危害性较大的甲苯、乙苯、正丙苯为目标污染物,研究了通风流量、含水率、间歇通风等参数及目标污染物性质对其去除率的影响,分析了通风前后黄棕壤中甲苯、乙苯、正丙苯的衰减规律。

1 材料与方法

1.1 实验材料

所用试剂:甲苯,AR,含量≥99.5%,南京化学试剂一厂;乙苯,AR,含量≥98.5%,国药集团化学试剂有限公司;正丙苯,含量≥98%,ACROS Organics;甲醇,色谱纯,美国 J.T.Baker 公司。实验用土为南京地区未受污染土壤,采样深度 0~50 cm。土壤类型为黄棕壤,质地为粉质壤土^[7]。土样自然风干后过筛,去除植物残留,取 10 目土。其理化性质见表 1。

1.2 实验仪器

玻璃转子流量计,空气泵(THOMAS USA),分析天平,移液针,样品瓶,自动加样器,GC-MS(美国安捷伦 7890GC/5975MS),吹扫捕集器(美国 OI 45524660),激光粒度仪(美国 BECKMAN LS230)。

1.3 实验装置

土柱:直径为 14 cm,高 25 cm 的有机玻璃柱,土柱底部为多孔板,侧壁 2 个取样口(1,2)距多孔板分别是 92、184 mm。

通风系统:由空气泵、玻璃转子流量计、有机玻璃柱、活性炭吸附柱和气体管道等组成,如图 1 所示。空气在气泵作用下经玻璃转子流量计调节流量后,由土柱底部进气孔进入,通过底部锥形口和底部多孔板均匀注入土柱。土壤中的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^[8],尾气方可排放到空气中。

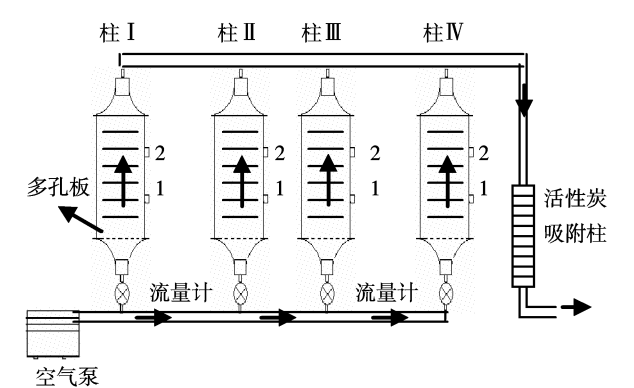


图 1 SVE 模拟修复试验示意图
Figure 1 Diagram of imitating experiment for SVE

1.4 实验方法

污染土壤制备:将 4.5 kg 土和 50 mL 甲苯、乙苯、正丙苯的混合溶液(1:1:1)等分层装入 4 L 的玻璃瓶,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,装土高度为 22 cm,分组实验。

实验设计:研究不同通风流量、不同含水率和间歇通风等参数对土壤中 VOCs 去除效果的影响。

采样:通风前后取混合土样,每隔 12 h 从土柱侧取样口取样,装入样品瓶待测。

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

表 1 实验土壤理化性质
Table 1 Physico-chemical properties of experiment soil

pH	OM/g·kg ⁻¹	OC/g·cm ⁻³	密度/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	1.37	1.03	16.9	71.8	6.24	5.09

注:OM 为有机质,OC 为有机碳。

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。

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 ℃。

检测条件:安捷伦 7890GC/5975MS,色谱柱 DB-VRX 30 m×0.25 mm×1.4 μm;载气为高纯氮气,流量为 1 mL·min⁻¹,恒流模式。程序升温:40 ℃保持 5 min,8 ℃·min⁻¹ 升至 200 ℃,10 ℃·min⁻¹ 升至 230 ℃,保持 2 min。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 ℃;Quadrupole(四极杆)温度 150 ℃;扫描范围为 35~260 amu。

2 结果与分析

2.1 通风流量对土壤中 VOCs 去除率的影响

通风流量对土壤中 VOCs 的去除效率影响显著。在含水率为 17.98%条件下,研究了通风流量为 0.05、0.10、0.15、0.20 L·min⁻¹ 对去除混合污染土壤中总挥发性有机物(Total VOCs, TVOCs)的影响。图 2 表示了不同通风流量条件下取样口 1、2 处土壤中 TVOCs 的

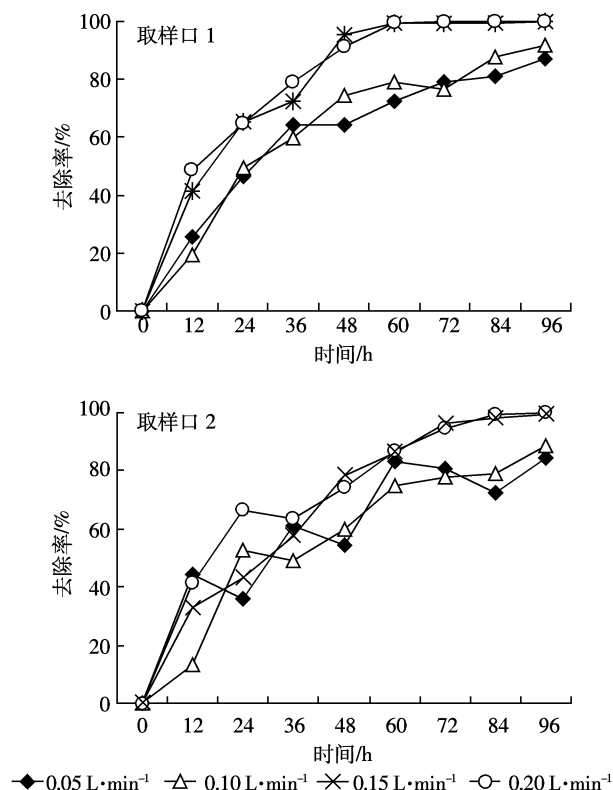


图2 取样口1、2处土壤中TVOCs去除率随时间的变化曲线
Figure 2 Curves of the removal efficiency of TVOCs at sampling port 1 and 2 varying with time

去除情况,各土柱内TVOCs会在48 h内急剧下降,后呈衰减减缓趋势。当通风流量为0.05、0.10 L·min⁻¹时,TVOCs在通风结束后均未进入拖尾期;实验测得污染物组分中仅甲苯在60 h后进入拖尾期。当通风流量为0.15、0.20 L·min⁻¹时,TVOCs在取样口1、2处土壤中进入拖尾期时间均为60、72 h。实验测得通风流量为0.20 L·min⁻¹时,TVOCs初始浓度比通风流量为0.15 L·min⁻¹时略高,说明通风流量为0.20 L·min⁻¹时,通风效率更高。通风后取混合土样检测,TVOCs去除率分别为:柱I 82.89%,柱II 90.31%,柱III 99.30%,柱IV 99.55%。可见通风流量越大,污染物所需净化时间越短。

图3为通风流量0.15、0.20 L·min⁻¹时甲苯、乙苯、正丙苯在取样口1、2处的去除情况。对土壤中单个污染物而言,通风流量0.15 L·min⁻¹时,取样口1、2土壤中甲苯进入拖尾期时间分别为36、48 h;乙苯为48、72 h;正丙苯为60、72 h。通风后取混合土样检测,甲苯、乙苯、正丙苯的去除率分别为99.84%、99.45%、98.25%;通风流量为0.20 L·min⁻¹时,取样口1、2土壤中甲苯进入拖尾期的时间分别为18 h、24 h;乙苯为36 h、60 h;正丙苯为60 h、72 h。通风后取混合土样检测,甲苯、乙苯、正丙苯的去除率分别为99.97%、99.68%、98.68%。可见,对任一通风流量下,单一污染物进入拖尾期的快慢顺序为甲苯>乙苯>正丙苯;去除率大小顺序为甲苯>乙苯>正丙苯。

TVOCs的去除率受通风流量影响显著,随着通风流量增加,其去除速率也增加,但去除速率与气相抽提速率并不成正比^[9]。当通风流量提高到一定程度后,VOCs能更快进入拖尾期,去除率却不显著增加^[9-10]。综合考虑土壤中污染物去除时间、去除效率、尾气处理量^[10]和成本控制等因素,可确定通风流量为0.15 L·min⁻¹时为最佳气体流量,实时监测最靠近土柱表层土壤的取样口所在平面的土壤中污染物浓度,可反映去除效果。

2.2 含水率对土壤中 VOCs 去除率的影响

本实验所用不同含水率的土壤均是通过向自然风干土壤中均匀喷洒去离子水配制而成。图4为通风流量为0.15 L·min⁻¹,含水率分别为6.01%、17.98%、24.73%条件下TVOCs去除率随时间变化情况。可见含水率对SVE净化时间的影响很大,实验测得含水率为6.01%时,甲苯、乙苯、正丙苯、TVOCs去除率分别为95.36%、61.76%、30.27%、63.03%;含水率为24.73%时,甲苯、乙苯、正丙苯、TVOCs去除率分别为

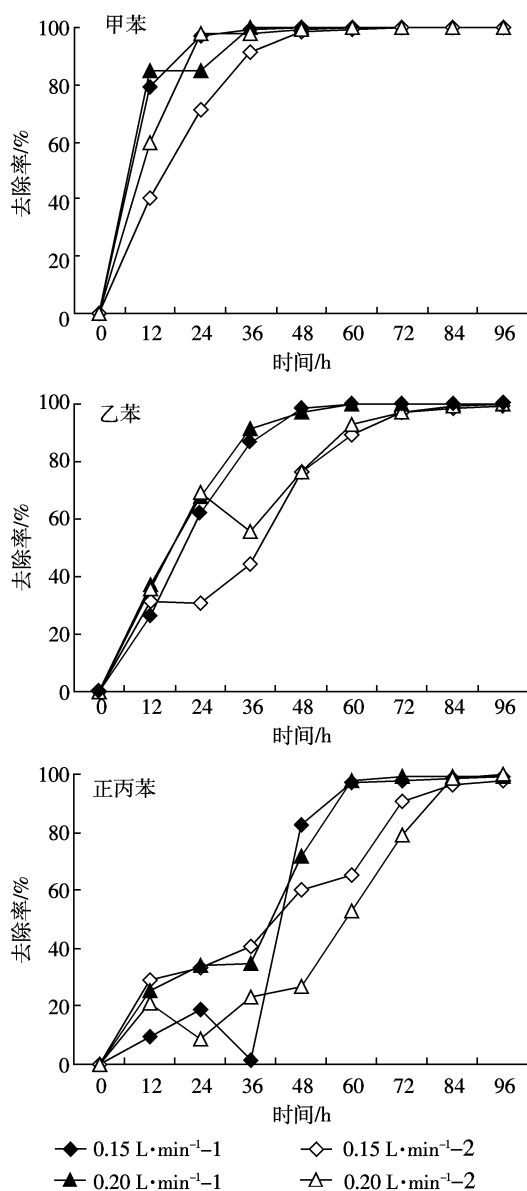


图3 通风流量 0.15、0.20 L·min⁻¹ 时取样口 1、2 土壤中甲苯、乙苯、正丙苯去除率随时间变化曲线

Figure 3 Curves of the removal efficiency of toluene, ethylbenzene and n-Propylbenzene in soil at sampling port 1 and 2 at 0.15 L·min⁻¹ and 0.20 L·min⁻¹ airflow rate varying with time

97.13%、95.12%、71.80%、89.03%。只有当含水率为 17.98% 时,各污染物的去除率最高,效果最好(如图 4 所示)。

2.3 间歇通风对土壤中 VOCs 去除率的影响

本实验用土如 2.1, 装入柱 I。在通风流量为 0.15 L·min⁻¹ 条件下,每连续通风 24 h 后停止通风 24 h,依次循环至通风结束,通风时间为 96 h,一共用时 168 h。从图 5(a,b)可以看出,取样口 1 处土壤中甲苯、乙苯、正丙苯、TVOCs 进入拖尾期的时间分别为

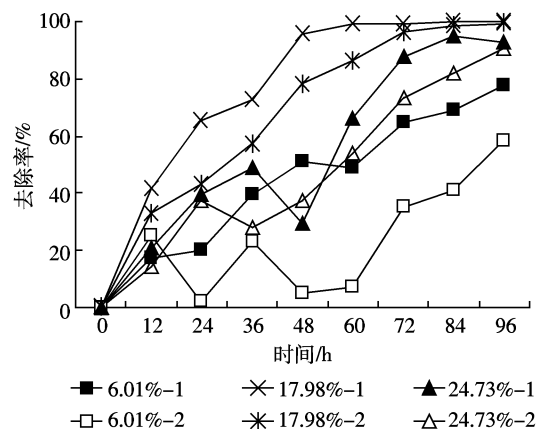


图4 不同含水率条件下 1、2 采样口土壤中 TVOCs 去除率随时间变化曲线

Figure 4 Curves of the removal efficiency of TVOCs in soil at sampling port 1 and 2 varying with time

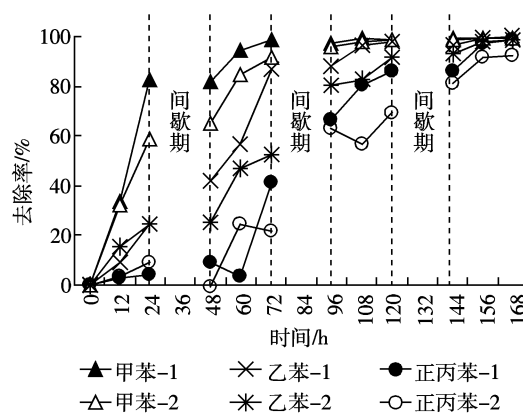


图5(a) 间歇通风条件下甲苯、乙苯、正丙苯去除率随时间变化曲线

Figure 5(a) Curves of the removal efficiency of toluene, ethylbenzene, n-Propylbenzene at sampling port 1 and 2 at intermittent ventilation varying with time

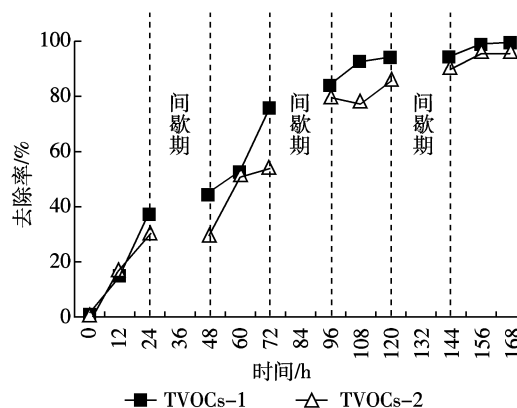


图5(b) 间歇通风条件下 TVOCs 去除率随时间变化曲线

Figure 5(b) Curves of the removal efficiency of TVOCs at sampling port 1 and 2 at intermittent ventilation varying with time

72、120、156、156 h, 去除率分别为 99.58%、99.65%、98.42%、99.22%; 取样口 2 处土壤中甲苯、乙苯进入拖尾期的时间分别为 96、156 h, 正丙苯和TVOCs 尚未进入拖尾期, 去除率分别为 99.51%、98.44%、92.08%、96.70%, 并且在间歇期后 3 种污染物都曾出现浓度回升^[11-13]导致去除率下降的现象。通风结束后取混合土样测得 TVOCs 去除率为 95.22%, 表明在相同通风时间条件下, 间歇通风效果比连续通风差。

2.4 污染物性质对 VOCs 去除率的影响

为研究有机污染物性质对通风效果的影响, 将不同条件下取样口 2 处甲苯、乙苯、正丙苯去除率随时间变化情况进行比较(图 6)。可以看出, 在不同含水率和不同通风方式, 相同通风时间下, 比较甲苯、乙苯、正丙苯去除率大小顺序为甲苯>乙苯>正丙苯。尽管正丙苯的初始浓度最低, 但相同条件下其所需净化时间最长, 去除率最小; 在含水率为 6.01%、24.73% 和间歇通风条件下都出现了正丙苯在通风后去除率为负的现象, 即通风过程中正丙苯浓度高于初始浓度, 进一步验证了图 3 的实验结果。

3 讨论

不同通风流量条件下, 同一土柱内不同取样口污染物初始浓度有差异, 通风过程中下层土壤中 VOCs 浓度衰减较上层快, 去除效率高, 因此能更快进入拖尾期; 通风过程中还出现了同一土柱内下层土壤中 VOCs 浓度高于上层土壤的现象, 但总体趋势是上层土壤中 VOCs 浓度高于下层。这是由于土壤静置过程中, 土壤细粒表面存在着表面自由能, 对邻近或碰到土壤细粒表面的气体、液体分子产生吸引力, 使它们在土壤细粒表面发生相对地聚集, 经过一段时间静置后甲苯、乙苯、正丙苯等进入了土壤细粒的内外表面, 存在于土壤气相、液相、固相中^[14]。通风过程中下层土壤细粒内外表面吸附的甲苯、乙苯、正丙苯被吹脱后迁移至上层土壤, 在范德华力、静电引力、氢键等综合作用下被上层土壤吸附, 使得上层土壤中污染物浓度高于下层; 而通风过程中出现的下层土壤 VOCs 浓度高于上层土壤的现象可能是因为污染物在上层土壤中自动脱附后在扩散作用和重力作用下出现了部分污染物下沉的现象^[15-16], 同时由于 VOCs 被移除时发生了水-气及水-固颗粒间的物质交换而产生了迟滞效应^[17]。图 6 中正丙苯在含水率为 6.01% 和 24.73% 时表现尤为明显, 甚至出现了去除率为负的现象。最终在空气流作用下 3 种污染物脱附进入排气管道。

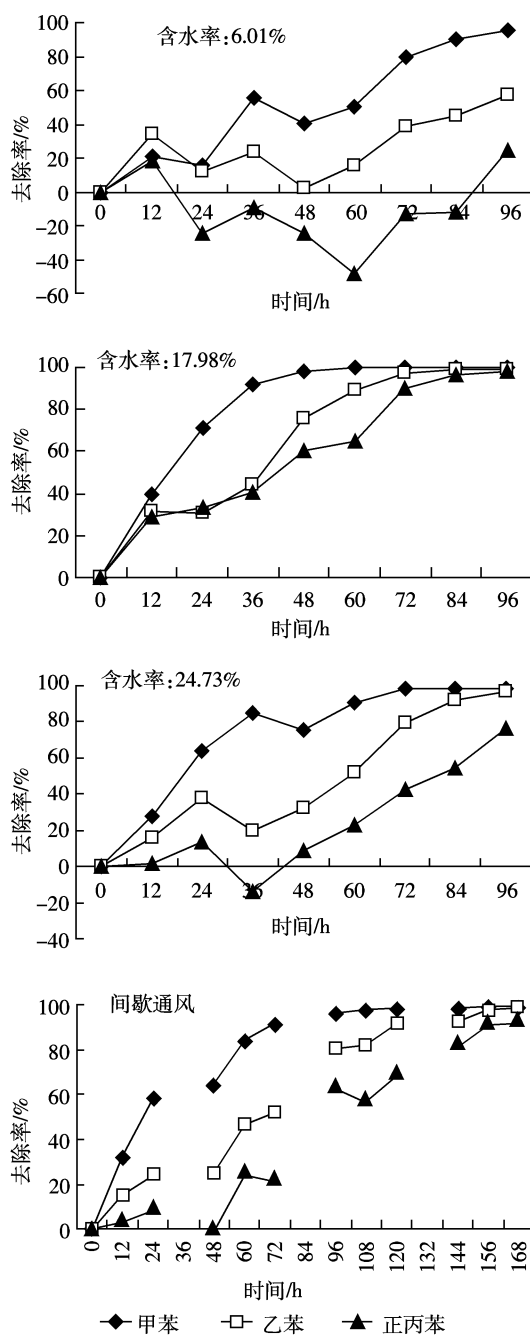


图 6 不同条件下甲苯、乙苯、正丙苯去除率随时间变化比较

Figure 6 Compared with the removal efficiency of toluene, ethylbenzene, n-Propylbenzene under different conditions varying with time

土壤含水率对 SVE 去除效率的影响显著, 含水率过高或过低均不利于 VOCs 的去除。这是因为在干燥的土壤中, 有机污染物吸附于土壤颗粒后自身活性降低, 从而影响污染物在土壤空气中的蒸气压和整体挥发速率^[18]; 由于水分子极性远强于甲苯、乙苯、正丙苯分子, 更易与土壤有机质结合, 若增加含水率, 吸附的

VOCs 就会释放出来,增大挥发速率^[18];但继续增加土壤含水率也会降低土壤的通透性,反而降低了有机污染物的去除率^[18-19]。

间歇通风的气相抽提效率比连续通风效率低,一方面由于在间歇期下层土壤中脱附的污染物向上层土壤迁移再吸附,另一方面由于上层土壤中一定量的非水相液体(NAPLs)聚集,经 48 h 静置后,使 NAPLs 在重力作用下向下流动^[16]。

从挥发性有机物的分子结构和大小分析可知,分子结构简单,分子量小,沸点低,挥发性强的 VOC 更容易脱附并去除^[2]。这是因为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^[20],并且随着苯环支链上碳原子数增加,分子量增大,沸点也增高,挥发性减弱,土壤颗粒对 VOCs 吸附的范德华力、静电引力、氢键等综合作用相应增强,更容易被土壤吸附而难以脱附。

4 结论

本实验模拟了 SVE 去除黄棕壤中 VOCs 的几个影响因素,揭示了通风过程中 VOCs 的迁移规律。

(1)通风前土壤中 VOCs 浓度较高,通风初期各取样口 VOCs 去除缓慢,通风一段时间后,浓度迅速降至很低,然后进入拖尾阶段。实验还表明,通风过程中总是呈现上层土壤中 VOCs 浓度高于下层土壤的趋势,甚至出现高于上层土壤的初始浓度的现象,衰减也较下层缓慢,拖尾期相应延后。这是因为下层土壤中的 VOCs 脱附后向上迁移,在上层土壤中再吸附,而在通风过程中会因为 VOCs 在土壤中的重力、扩散作用以及其被移除时发生的水-气及水-固颗粒间物质交换所产生的迟滞效应出现下层土壤中污染物浓度高于上层土壤的现象。

(2)通风流量是影响 SVE 去除效率的一个重要因素。通风流量越大所需净化时间越短,但是去除率并不与通风流量成正比。当含水率为 17.98%、通风流量为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,土壤中甲苯、乙苯、正丙苯、TVOCs 去除率分别为 99.82%、99.41%、98.09%、99.30%。综合净化时间、去除率及运行成本等认为通风流量为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 是可达到最佳的去除效果。

(3)含水率也是影响去除率的一个重要因素。当含水率为 17.98%时,VOCs 去除效果最好。含水率过高或过低均不利于土壤中 VOCs 的去除,含水率为 6.01%时,VOCs 去除效果最差,去除率只有 63.03%,正丙苯的去除率仅为 30.27%。

(4)不同通风方式对 VOCs 去除率也有影响,间歇通风去除 VOCs 的效果不如连续通风好。

(5)受土壤颗粒和有机质对芳香化合物吸附作用的影响,有机污染物的性质也成为决定 SVE 去除效率的重要因素。苯环上支链越长,分子量越大,越难去除,所以分子结构简单,分子量小,沸点低,挥发性强的 VOCs 将优先从土壤中脱附,被空气流携带去除。本实验 TVOCs 的去除效率受正丙苯影响显著。

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.
ZHANG Sheng-tian, LIN Yu-suo, HUA Xiao-mei, et al. The facing problems and counter measures of Chinese contaminated site management[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6):5-7.
- [2] 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,2005:2-255.
SUN Tie-heng, LI Pei-jun, ZHOU Qi-xing, et al. Formation mechanism and remediation technology of soil pollution[M]. Beijing:Scientific and Technical Publishers, 2005:2-255.
- [3] 吴健,沈根祥,黄沈发.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.
WU Jian, SHEN Gen-xiang, HUANG Shen-fa. A review on engineering remediation techniques for VOCs-contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3):430-436.
- [4] 李金惠,马海斌,夏新,等.有机污染土壤通风去污技术研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2001,2(4):39-48.
LI Jin-hui, MA Hai-bin, XIA Xin, et al. Soil vapor extraction technology for soil pollution of organic compounds and its research advances[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2001, 2(4):29-48.
- [5] 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,2000,3:25-27,37.
HUANG Guo-qiang, LI Ling, LI Xin-gang, et al. In situ remediation of soil pollution[J]. *Environmental Science Trends*, 2000, 3:25-27, 37.
- [6] Texas Research Institute. Interim report[R]. API Publication 4245, 1980:98.
- [7] 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.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical properties[M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978:470.
- [8] 李婕,羌宁.挥发性有机物(VOCs)活性炭吸附回收技术综述[J].四川环境,2007,26(6):101-105.
LI Jie, QIANG Ning. Recovery of volatile organic compounds by activated carbon adsorption process[J]. *Sichuan Environment*, 2007, 26(6):101-105.
- [9] Fall E W. In-situ hydrocarbon extraction: A case study[J]. *Hazard Waste Contain*, 1989, 1:1-7.

- [10] Wilson D J. Soil clean up by in-situ aeration XVI. Solution and diffusion in mass-transport-limited operation and calculation of Darcy's constant[J]. *Sep Sci Technol*, 1994, 29: 1133-1163.
- [11] Gomez-lahoz C, et al. Soil clean up by in-situ aeration. XV. Effects of variable air rates in diffusion-limited operation[J]. *Separation Science and Technology*, 1994, 29(8): 943-969.
- [12] Gomez-lahoz C, et al. Biodegradation phenomena during soil vapor extraction: Sensitivity studies for single substrate systems[J]. *Separation Science and Technology*, 1994, 29(5): 557-578.
- [13] Gomez-lahoz C, et al. Biodegradation phenomena during soil vapor extraction. III. Sensitivity studies for two substrates[J]. *Separation Science and Technology*, 1994, 29(10): 1275-1291.
- [14] 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.
HE Xiao-zhen, ZHOU You-ya, WANG Li, et al. Study on influencing factors in removal of volatile organic compounds from red earth by soil vapor extraction [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(5): 679-683.
- [15] 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.
HUANG Guo-qiang, JIANG Bin, LI Xin-gang, et al. Applicability of diffusion models for VOCs in porous soils[J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 37(11): 945-948.
- [16] Kasluskys 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.
- [17] 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.
PENG Sheng, CHEN Jia-jun, WANG Hong-qi, et al. The mechanism and models of volatile contaminants transporting in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 315-323.
- [18] Poulsen T G, Moldrup P, Yamaguchi T, et al. VOC vapor sorption in soil: Soil type dependent model and implications for vapor extraction[J]. *Environ Eng*, 1998, 124(2): 146-155.
- [19] Stephanatos B N. Modeling the transport of gasoline vapors by an advective diffusive unsaturated zone model. Proceeding of the NW W A/ API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration. Houston, TX, USA: National Water Well ASSOC, 1989: 591-611.
- [20] 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.
CHEN Di-yun, PENG Yan. Sorption and desorption of hydrophobic organic compounds on water/soil, sediment system[J]. *Chemical Industry Times*, 2001, 4: 11-15.