

三种表面活性剂对高浓度 DDTs 污染土壤的洗脱作用

章瑞英^{1,2,3}, 王国庆^{2,3}, 陈伟伟^{1,2,3}, 赵欣^{2,3}, 林玉锁^{2,3*}

1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042;

3. 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 江苏 南京 210042

摘要: 以高浓度滴滴涕 (DDTs) 污染场地土壤为研究对象, 采用表面活性剂洗脱试验, 比较研究了聚氧乙烯山梨糖醇酐单硬脂酸酯 (Tween60)、辛基酚聚氧乙烯醚 (TritonX 100)、十二烷基硫酸钠 (SDS) 对污染土壤中 DDTs 的洗脱效率。试验结果表明, 三种表面活性剂对污染土壤中 DDTs 均具有一定的洗脱作用, 去离子水对 DDTs 几乎没有洗脱效果。随着洗脱液中 Tween60 和 SDS 质量浓度的逐渐升高, 土壤中 DDTs 的总洗脱效率逐渐增大, 一次性洗脱时最大洗脱效率分别为 43.60% 和 34.62%。随着洗脱液中 TritonX 100 质量浓度的逐渐升高, 土壤中 DDTs 的总洗脱效率出现先增大后降低再升高的变化现象, 最大为 15.46%。土壤中六种 DDT 组分的洗脱效率不完全一样, 其中 Tween60 对 2,4'-DDD 的洗脱效率可达 55.12%, 对 4,4'-DDD 的洗脱效率为 54.09%; SDS 对 2,4'-DDD 的洗脱效率为 59.99%, 对 4,4'-DDD 的洗脱效率为 57.10%。试验结果可为筛选适宜的表面活性剂及质量浓度, 研发高浓度 DDTs 污染场地土壤表面活性剂洗脱修复技术的工程应用提供理论依据。

关键词: 土壤修复; 洗脱; DDTs; 污染场地; 表面活性剂

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2166-06

滴滴涕 (DDTs) 是首批列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》的 12 种持久性有机污染物之一。当前, 我国一批老农药生产企业面临关闭, 用地功能发生改变, 原 DDTs 生产企业搬迁后遗留场地土壤污染问题亟待解决, 研究和开发高效快速的 DDTs 污染土壤的修复治理技术十分紧迫和必需。

在众多有机物污染土壤的修复技术中, 表面活性剂增效修复技术^[1-6] (Surfactant Enhanced Remediation, SER) 具有很好的应用潜力。该技术主要是利用表面活性剂的亲水、亲油双重特性及其特殊的吸附性能, 来降低水土体系的界面张力, 增加疏水性有机化合物的水溶性, 使有机污染物从土壤中洗脱出来, 达到修复污染土壤的目的。国内外对表面活性剂增效修复技术已展开诸多研究, 常用的表面活性剂有非离子型辛基酚聚氧乙烯醚 (TritonX 100)、聚氧乙烯山梨糖醇酐单硬脂酸酯 (Tween60) 等, 阴离子型十二烷基硫酸钠 (SDS)、十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 等。SUN 等^[7] 研究发现非离子型表面活性剂 TritonX 100 能有效的解吸去除土壤吸附的六氯联苯和三氯苯等。王良梅等^[8] 发现非离子表面活性剂 Tween80 能增加土壤中菲、芘的解吸率, 尤其在高浓度条件下作用效果更为显著。也有研究表明, 阴离子表面活性剂 SDS、SDBS 等在土壤上的吸附损失最小, 被广泛用于土壤及地下水有机污染

修复中, 具有良好的应用潜力^[9-10]。文献调研表明, 目前 SER 技术针对多环芳烃、多氯联苯和石油烃类物质等已开展了较多的研究, 朱利中、Jiunn Fwu Lee、施周等人都在实验室成功进行了利用表面活性剂增效修复土壤有机污染物的试验^[11-14], 但实际工业污染场地土壤具有污染成分复杂多样、污染物浓度高和老化时间长等特点, 与实验室人工污染土壤存在一定的差异, 能否利用表面活性剂对污染土壤的有机物进行洗脱, 达到快速高效去除有机污染物的目的, 成为污染土壤修复实际工程应用中关注的问题, 但目前这方面的报道较少。因此, 利用有机污染场地土壤进行表面活性剂洗脱试验, 对表面活性剂增效修复技术在污染场地土壤修复工程应用中具有重要的现实指导意义。

本文以高浓度 DDTs 污染场地土壤为研究材料, 进行了土壤洗脱试验, 考察了三种表面活性剂对土壤中 2,4'-DDT 和 4,4'-DDT、2,4'-DDD 和 4,4'-DDD、2,4'-DDE 和 4,4'-DDE 的洗脱效果, 为筛选适宜的表面活性剂及质量浓度, 研发高浓度 DDTs 污染场地土壤表面活性剂修复技术的工程应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

试验所用 Tween 60 (纯度 99.95%) 和 Triton X 100 (纯度 99.95%) 由南京捷倍思基因技术有限公

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2009AA063103); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (国 47012)

作者简介: 章瑞英 (1986 年生), 女, 硕士研究生, 主要从事污染场地土壤修复技术研究。E-mail: zhangringsunny@163.com

*通讯作者: 林玉锁 (1958 年生), 男, 研究员。E-mail: lys@nies.org

收稿日期: 2009-09-14

司 (Genebase Gene-Tech Co., Ltd) 生产; SDS (纯度 85.0%) 由成都市科龙化工试剂厂生产。三种表面活性剂的基本性质见表 1。试验用正己烷 (色谱纯) 由默克 (Merck) 公司生产。

试验所用仪器有 Agilent 6890 气相色谱仪 (配 ECD 检测器); SKY-211B 振荡仪 (苏坤仪器公司); L-550 台式低速大容量离心机 (湘仪公司); Agilent 固相萃取仪; BS 223 S 天平 (万分之一天平, Sartorius

表 1 表面活性剂的基本性质
Table 1 The basic properties of the surfactants

名称	化学名称	化学式	类型	分子量	CMC ^[15] /(mg·L ⁻¹)
Tween 60	聚氧乙烯山梨糖醇酐单硬脂酸酯	C ₆₄ H ₁₂₆ O ₂₆	非离子	1 311.68	40.74
Triton X 100	辛基酚聚氧乙烯醚	C ₈ H ₁₇ C ₆ H ₄ (OCH ₂ CH ₂) _{9,5} OH	非离子	625	167.4
SDS	十二烷基硫酸钠	C ₁₂ H ₂₅ OSO ₃ Na	阴离子	288.38	1 586

公司)。

1.2 土壤样品采集与制备

供试土样采自江苏省某废弃 DDTs 农药厂拆迁后遗留场地重污染区表层 0~50 cm 土壤。采集的土壤于阴凉干燥处风干, 研磨过 20 目筛备用。土壤样品基本理化性质如下: 有机质的质量分数为 8.02 g·kg⁻¹, 阳离子交换量为 18.93 cmol·kg⁻¹, pH 为 6.59, 粘粒的质量分数为 40.4%, 粉粒的质量分数为 55.2%, 砂粒的质量分数为 4.4%, 质地为粉粘壤。土样中 4,4'-DDT、2,4'-DDT、4,4'-DDD、2,4'-DDD、4,4'-DDE 和 2,4'-DDE 的质量分数分别为 1 734、287、588、272、2.33 和 1.34 mg·kg⁻¹, 总 DDT 的质量分数为 2 885 mg·kg⁻¹。

1.3 实验方法

1.3.1 表面活性剂溶液的配制

准确称取一定量的表面活性剂, 分别配制不同质量浓度的表面活性剂溶液。根据表面活性剂本身的性质以及预实验的结果, 选定 Tween60 水溶液的质量浓度 (ρ_{Tween60}) 分别为 3 000、5 000 和 10 000 mg·L⁻¹, TritonX 100 的质量浓度 ($\rho_{\text{TritonX 100}}$) 分别为 750、1 500 和 3 000 mg·L⁻¹, SDS 的质量浓度 (ρ_{SDS}) 分别为 1 000、5 000 和 10 000 mg·L⁻¹。并用去离子水做空白对照试验。

1.3.2 土壤洗脱试验

准确称取 2.000 g 土样于 40 mL 离心管中, 分别加入 20 mL 不同质量浓度的表面活性剂溶液 (土液比为 1:10), 旋紧瓶盖; 把离心管放入恒温振荡器, 以 200 r·min⁻¹ 的转速在 (20±1) °C 下振荡 12 h; 然后, 以 4 000 r·min⁻¹ 的速度离心 20 min; 取全部上清液通过甲醇活化好的 Apclclean C18 固相萃取柱, 用正己烷完全洗脱, 收集洗脱液, 待测。

1.3.3 DDTs 测定

按照 GB/T 14550-93 中 DDTs 的测定方法, 利用 GC-ECD 测定洗脱液中 2,4'-DDT 和 4,4'-DDT、2,4'-DDD 和 4,4'-DDD、2,4'-DDE 和 4,4'-DDE 的质量浓度。

仪器分析条件: 进样量为 1.0 μ L (不分流进样),

载气流量 1.0 mL·min⁻¹ (99.999% 高纯氮, 恒流模式), 进样口温度 225 °C, 使用 ECD 检测器; 程序升温: 100 °C 保持 2 min, 以 20 °C·min⁻¹ 升温到 195 °C, 再以 3 °C·min⁻¹ 升温到 270 °C 保持 5 min; 色谱柱: HP-5, 30.0 m×0.32 mm×0.25 μ m。

2 结果与讨论

2.1 Tween60 对土壤中 DDTs 的洗脱效果

2.1.1 Tween60 洗脱液中 DDTs 的质量浓度变化

选取洗脱污染土壤的 Tween60 的质量浓度分别为 0、3 000、5 000 和 10 000 mg·L⁻¹。Tween60 洗脱液中 DDTs 的质量浓度变化情况见图 1 所示。由图 1 可以看出, 用去离子水洗脱时, 洗脱液中 DDTs 几乎未检出。Tween60 洗脱液中有 DDTs 检出, 总 DDTs 的质量浓度随 Tween60 质量浓度升高逐渐增大, 10 000 mg·L⁻¹ 时可达 125.82 mg·L⁻¹。洗脱液中六种 DDT 组分的质量浓度大小变化顺序为: 4,4'-DDT > 4,4'-DDD > 2,4'-DDD ≈ 2,4'-DDT > 4,4'-DDE ≈ 2,4'-DDE。洗脱液中各组分质量浓度的大小与原土壤中六种 DDT 组分的污染相关。该试验结果与文献报道的 Tween80、TritonX 100 等在 CMC 以上对 DDT 产生明显增溶作用的结果一致^[16]。

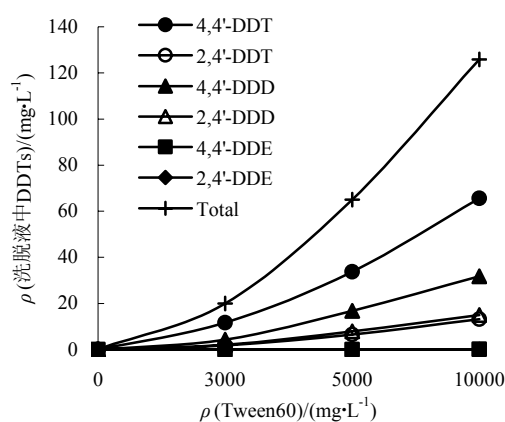


图 1 不同质量浓度 Tween60 洗脱液中 DDTs 的质量浓度变化
Fig. 1 The mass concentration change of DDTs in different mass concentrations of Tween60 eluent

2.1.2 Tween60 对土壤中 DDTs 的洗脱效率

图 2 表示的是不同质量浓度 Tween60 洗脱后土

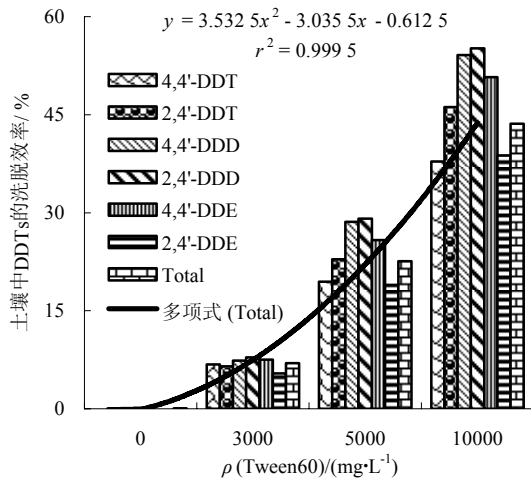


图2 不同质量浓度Tween60洗脱后土壤中DDTs的洗脱效率变化
Fig.2 The elution efficiency of DDTs after elution by Tween60 of different mass concentrations

壤中DDTs的洗脱效率。DDTs的洗脱效率以洗脱液中DDTs占称取土样中DDTs的质量分数表示。可以看出,随Tween60质量浓度增加,土壤中DDTs的总洗脱效率(4,4'-DDT、2,4'-DDT、4,4'-DDD、2,4'-DDD、4,4'-DDE和2,4'-DDE六种污染物占称取土样中六种污染物的质量分数)逐渐增大,10 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时总洗脱效率最大达到43.60%。对6种DDTs污染物的总洗脱效率进行阶数为2的多项式函数回归分析,结果表明随着Tween60质量浓度的升高,土壤中DDTs的总洗脱效率呈2阶多项式函数型增长,回归方程式为 $y=3.532 5x^2 - 3.035 5x - 0.612 5$,具有显著的相关性(r^2 为0.999 5)。试验结果与Edwards的研究具有相似的变化趋势^[17-18]。

土壤中6种DDT组分的洗脱效率不同,10 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时2,4'-DDD的洗脱效率为55.12%,4,4'-DDD的洗脱效率为54.09%,4,4'-DDE的洗脱效率为50.73%,4,4'-DDT的洗脱效率最低,仅为37.81%。虽然原土样和Tween60洗脱液中4,4'-DDT的质量浓度均最高,但其洗脱效率却最低,说明土壤中不同DDT组分的洗脱效率还与它们本身的性质有关,有机污染物的土壤有机碳-水分配系数(Koc)值越小,与土壤有机质的亲和力越弱,越容易从土壤中洗脱出来,2,4'-DDD的Koc值(2.5×10^5)较小,较容易从土壤中洗脱出来,而4,4'-DDT的Koc值(1.0×10^6)较大,容易被土壤有机质吸附,所以洗脱效率较低。

2.2 TritonX 100 对土壤中 DDTs 的洗脱效果

2.2.1 TritonX 100 洗脱液中 DDTs 的质量浓度变化

由于TritonX 100的临界胶束浓度较低,选取洗脱污染土壤的TritonX 100的质量浓度也相应降低,分别为0、750、1 500和3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不同质量浓度TritonX 100洗脱液中DDTs的质量浓度变化见图3。可

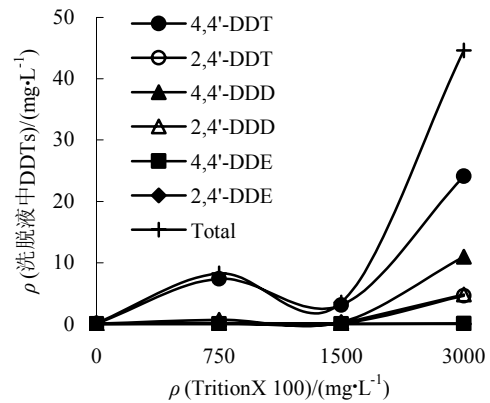


图3 不同质量浓度TritonX 100洗脱液中DDTs的质量浓度变化
Fig.3 The mass concentration change of DDTs in different mass concentrations of TritonX 100 eluent

以看出,洗脱液中DDTs的总质量浓度随TritonX 100质量浓度的增大,呈现出先增大后降低再升高的变化现象,3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时洗脱液中DDTs的总质量浓度可达44.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且作者进行了改变温度等其他重复试验,洗脱液中DDTs也出现相同变化趋势。

出现这种现象的原因,是由于在质量浓度低于750 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TritonX 100主要以单体形式存在,单体与DDTs对土壤颗粒的吸附产生竞争,使DDTs解吸到洗脱液中,所以DDTs的洗脱效率随洗脱液质量浓度升高逐渐增大;但随着洗脱液质量浓度继续升高到1 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的过程中,产生大量TritonX 100胶束,其对土壤颗粒的吸附量增加,被吸附的TritonX 100不仅不能够促进DDTs的洗出,相反还可能使已经溶解的DDTs向土壤颗粒吸附的TritonX 100中分配,从而使洗脱液中DDTs的质量浓度降低,所以1 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时DDTs的洗脱效率变小;随着TritonX 100的质量浓度继续升高,TritonX 100胶束对土壤颗粒的吸附达到饱和,可以被洗脱有效利用的TritonX 100增加,洗脱液中DDTs的质量浓度增大,所以3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时DDTs的洗脱效率增加^[19]。Juan等^[20]对鼠李糖脂和TritonX 100洗脱土壤中的杀虫剂进行了研究,结果表明当表面活性剂的量接近土壤饱和量时会增强对杀虫剂的洗脱作用,而当表面活性剂的量远远低于土壤饱和量时,表面活性剂将被土壤所吸附,其疏水性增强,对杀虫剂的脱附作用减弱,也是对该解释的较好验证。

3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TritonX 100洗脱液中六种DDT组分的质量浓度大小不同,4,4'-DDT的质量浓度为24.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4,4'-DDD的质量浓度为11.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2,4'-DDD和2,4'-DDT的质量浓度相差不大,分别为4.83 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和4.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2.2 TritonX 100 对土壤中 DDTs 的洗脱效率

不同质量浓度TritonX 100洗脱后土壤中DDTs

的洗脱效率变化如图4所示，可以看出，随TritonX 100质量浓度的增大，土壤中DDTs的总洗脱效率也出现先增大后降低再升高的变化趋势，但当3 000 mg·L⁻¹时总洗脱效率仅为15.46%。对DDTs的总洗脱效率进行阶数为3的多项式函数回归分析，结果表明随着TritonX 100质量浓度的升高，DDTs的总洗脱效率呈3阶多项式函数型趋势增长，回归分析方程式为 $y=3.3964x^3 - 22.617x^2 + 46.899x - 27.631$ ，相关性系数为1。

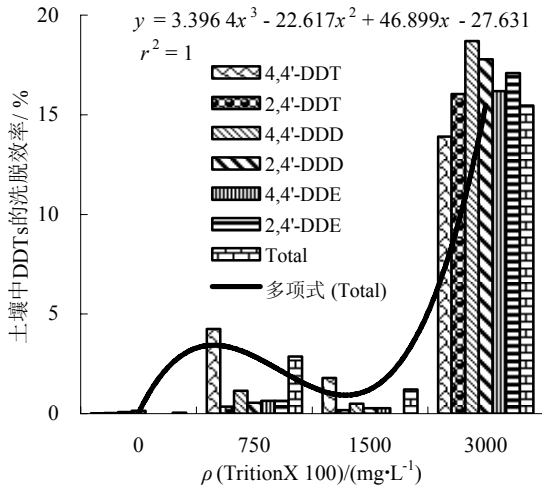


图4 不同质量浓度TritonX 100洗脱后土壤中DDTs的洗脱效率变化
Fig.4 The elution efficiency of DDTs after elution by TritonX100 of different mass concentrations

土壤中六种DDT组分的洗脱效率也不相同，3 000 mg·L⁻¹时4,4'-DDD的洗脱效率为18.70%，2,4'-DDD的洗脱效率为17.78%，2,4'-DDE的洗脱效率为17.09%，4,4'-DDT的洗脱效率为13.90%。

2.3 SDS对土壤中DDTs的洗脱效果

2.3.1 SDS洗脱液中DDTs的质量浓度变化

选取洗脱污染土壤的SDS的质量浓度分别为0、1 000、5 000和10 000 mg·L⁻¹。图5表示的是不同质量浓度SDS洗脱液中DDTs的质量浓度变化。可以看出，SDS的质量浓度小于1 000 mg·L⁻¹时，洗脱液中DDTs的总质量浓度较低，然后随SDS的质量浓度升高而增大，10 000 mg·L⁻¹时达到99.91 mg·L⁻¹。洗脱液中六种DDT组分的质量浓度大小变化顺序为：4,4'-DDT>4,4'-DDD>2,4'-DDD>2,4'-DDT>4,4'-DDE≈2,4'-DDE。曹昱等^[21]研究了阴离子表面活性剂SDBS对2,4-D在土壤中吸附的影响，在SDBS小于其CMC时，2,4-D对土壤的吸附量增加，而当SDBS质量浓度大于CMC时，2,4-D的吸附量随SDBS质量浓度的升高而减少。Zheng等^[22]认为表面活性剂溶液质量浓度低于CMC时，对PAHs的增溶作用不明显。Sanchez等^[23]也认为SDS在CMC以上时对土壤中莠去津的洗脱去除作用较好。

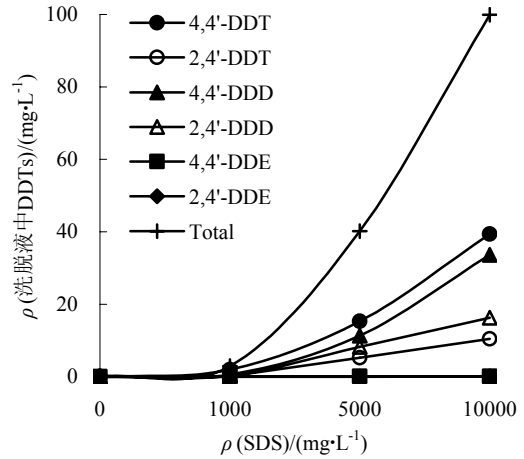


图5 不同质量浓度SDS洗脱液中DDTs的质量浓度变化
Fig.5 The mass concentration change of DDTs in different mass concentrations of SDS eluent

2.3.2 SDS对土壤中DDTs的洗脱效率

不同质量浓度SDS洗脱后土壤中DDTs的洗脱效率如图6所示，由图6可以看出，SDS的质量浓度低于1 000 mg·L⁻¹时，土壤中DDTs的总洗脱效率较低；5 000 mg·L⁻¹时总洗脱效率逐渐增加，10 000 mg·L⁻¹时达到34.62%。对DDTs的总洗脱效率进行指数函数回归分析，结果表明，总洗脱效率随SDS质量浓度升高呈指数型增长，回归分析方程式为 $y=0.0085e^{2.2245x}$ ，相关性较好（ r^2 为0.9542）。

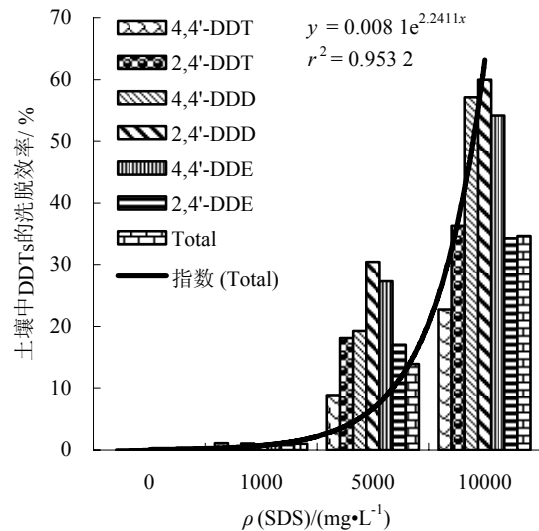


图6 不同质量浓度SDS洗脱后土壤中DDTs的洗脱效率
Fig.6 The elution efficiency of DDTs after elution by SDS of different mass concentrations

土壤中六种DDT组分的洗脱效率大小相差较大，10 000 mg·L⁻¹时，2,4'-DDD的洗脱效率可达59.99%，4,4'-DDD的洗脱效率为57.10%，4,4'-DDE的洗脱效率为54.19%，4,4'-DDT的洗脱效率仅为22.72%。

3 结论

通过本研究可以得出如下结论:在本研究试验条件下,去离子水对DDTs基本没有洗脱效果,所选3种表面活性剂对DDTs均具有一定的洗脱作用。随Tween60洗脱液质量浓度的升高,土壤中DDTs的总洗脱率逐渐增大,处理质量浓度为3 000、5 000和10 000 mg·L⁻¹时,DDTs的总洗脱效率分别为6.95%、22.57%和43.60%;随TritonX 100洗脱液质量浓度的升高,DDTs的总洗脱效率先增大后降低再升高,处理质量浓度为750、1 500和3 000 mg·L⁻¹时,DDTs的总洗脱效率分别为2.87%、1.21%和15.46%;随SDS洗脱液质量浓度的升高,DDTs的总洗脱率逐渐增大,处理质量浓度为1 000、5 000和10 000 mg·L⁻¹时,DDTs的总洗脱效率分别为1.01%、13.93%和34.62%。三种表面活性剂均对2,4'-DDD和4,4'-DDD的洗脱效率较高,对4,4'-DDT的洗脱效率最低。10 000 mg·L⁻¹时,Tween60对2,4'-DDD的洗脱效率可达55.12%,对4,4'-DDD的洗脱效率为54.09%;SDS对2,4'-DDD的洗脱效率可达59.99%,对4,4'-DDD的洗脱效率为57.10%。

污染场地土壤洗脱的工程应用中,一方面要选择有较高洗脱效率的表面活性剂,同时要避免表面活性剂质量浓度高带来的粘性较大等问题,综合考虑三种表面活性剂,对本研究所用的高浓度DDTs污染场地土壤,宜采用Tween60作为洗脱剂。

参考文献:

- [1] YANG K, ZHU L, ZHAO B. Minimizing losses of nonionic and anionic surfactants to a montmorillonite saturated with calcium using their mixtures[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 291(1): 59-61.
- [2] 张永, 廖柏寒, 曾敏, 等. 表面活性剂在污染土壤修复中的应用[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2007, 33(3): 348-352.
ZHANG Yong, LIAO Bohan, ZENG Min, et al. Application of surfactants to contaminated soil remediation[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2007, 33(3): 348-352.
- [3] WANG P, KELLER A A. Partitioning of hydrophobic pesticides within a soil-water-anionic surfactant system[J]. *Water Research*, 2009, (43): 706-714.
- [4] JOHN W W, BAO G, JOHNSON W P, et al. Sorption of nonionic surfactant oligomers to sediment and PCE DNAPL: effects on PCE distribution between water and sediment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, (34): 672-679.
- [5] YANG K, ZHU L, XING B. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solutions of TX100 and SDBS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, (40): 4274-4280.
- [6] MATA SANDOVAL J C, KAMS J, TORRENTS A. Influence of rhamnolipids and Triton X-100 on the desorption of pesticides from soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, (36): 4669-4675.
- [7] SUN S, INSKEEP W P, BOYD S A. Sorption of nonionic organic compounds in soil-water systems containing a micelle-forming surfactants[J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29: 903-913
- [8] 王良梅, 孙成, 谢学群. 表面活性剂Tween80及DOM对土壤中菲、苊解吸的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 832-837.
WANG Genmei, SUN Cheng, XIE Xuequn. Effect of nonionic surfactant tween80 and DOM on the behaviors of desorption of phenanthrene and pyrene in soil-water systems[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 832-837.
- [9] ROUSE J D, SABATINI D A, HARWELL J H. Minimizing surfactant losses using twin-head anionic surfactant in subsurface remediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27: 2072-2078.
- [10] HAIGH S A. Review of the interaction of surfactants with organic contaminants in soil[J]. *The Science of the Environment*, 1996, 185: 161-170.
- [11] ZHAO B, ZHU L, LI W, et al. Solubilization and biodegradation of phenanthrene in mixed anionic-nonionic surfactant solutions[J]. *Chemosphere*, 2005, (58): 33-40.
- [12] YUAN S, SHU Z, WAN J, et al. Enhanced desorption of hexachlorobenzene from kaolin by single and mixed surfactants[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, (314): 167-175.
- [13] JIUNN F L, MING H H, HUANG P C, et al. The effect of surfactants on the distribution of organic compounds in the soil solid/water system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 114: 123-130.
- [14] 施周, GHOSH M M. 表面活性剂溶液中多氯联苯溶解的特性[J]. *中国环境科学*, 2001, 21(5): 456-459.
SHI Zhou, GHOSH M M. Characterization of polychlorinated biphenyls dissolved in surfactant solutions[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(5): 456-459.
- [15] 赵保卫. 增效试剂对难降解有机物的增溶作用、机理及生物可利用性影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
ZHAO Baowei. Solubilization and bioavailability enhancements of hydrophobic organic compounds by surface active agents[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [16] KILE D, CHIOU C T. Water solubility enhancements of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration[J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, 23(7): 832-838.
- [17] EDWARDS D A, LIU Z, LUTHY R G. Experimental data and modeling for surfactant micelles, HOCs and soil[J]. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 1994, 120: 23-41.
- [18] EDWARDS D A, LIU Z, LUTHY R G. Surfactant Solubilization of organic compounds in soil/aqueous systems[J]. *Environmental Engineering*, 1994, 120: 5-22.
- [19] 施周, 何小路. 表面活性剂洗脱污染土壤中多氯联苯(PCBs)的研究与应用[J]. *生态环境*, 2004, 13(4): 666-669.
SHI Zhou, HE Xiaolu. Study and application of surfactants in washing polychlorinated biphenyls from contaminated soils[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 666-669.
- [20] JUAN C M, KAMS J, TORRENTS A. Influence of rhamnolipids and TritonX-100 on the desorption of pesticides from soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36: 4669-4675.
- [21] 曹罡, 莫汉宏, 安凤春. 阴离子表面活性剂对2, 4-D在土壤中吸附的影响[J]. *环境化学*, 2002, 21(4): 356-359.
CAO Gang, MO Hanhong, AN Fengchun. The effect of surfactant on

- adsorption of 2, 4-D in soil[J]. *Environmental Science*, 2002, 21(4): 356-359.
- [22] ZHENG Zhongming, OBBARD J P. Evaluation of an elevated non-ionic surfactant critical micelle concentration in a soil/aqueous system[J]. *Water Research*, 2002, 36(10): 2667-2672.
- [23] SANEHEZ C M A, SANCHEZ M M J, RODRIGUEZ C M S. Sodium dodecyl sulphate-enhanced desorption of atrazine: effect of surfactant concentration and of organic matter content of soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 41: 1301-1305.

Effects of three surfactants on washing remediation of DDTs contaminated site soil

ZHANG Ruiying^{1,2,3}, WANG Guoqing^{2,3}, CHEN Weiwei^{1,2,3}, ZHAO Xin^{2,3}, LIN Yusuo^{2,3*}

1. College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China;
2. Nanjing Institute of Environmental Science, Nanjing, Jiangsu 210042, China; 3. State Environmental Protection Key
Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing, Jiangsu 210042, China

Abstract: Surfactant washing experiment was carried out for three surfactants with highly contaminated soil by DDT and its metabolites (DDTs) from an industrial site. Removal rates of DDTs from the soil by Tween60 (Polyoxyethylene sorbitan monostearate), TritonX 100 (Polyoxyethylene octylphenol ether) and SDS (Sodium dodecyl sulfate), respectively, were compared in this study. The results showed that all the three surfactants were effective on desorption of DDTs from the soil, and little effect of deionized water on desorption of DDTs was observed in this study. Removal rates of DDTs from the soil increase gradually with the increase in concentrations of Tween60 and SDS. The highest removal rates were 43.60% and 34.62% for Tween60 and SDS, respectively. Removal rates of DDTs from soil increase firstly when TritonX 100 concentration increase from 0 to 750 mg·L⁻¹, then decrease when TritonX 100 concentrations increase from 750 to 1 500 mg·L⁻¹ and finally increase rapidly when TritonX 100 concentration increase from 1500 to 3 000 mg·L⁻¹. The highest removal rate of 15.46% was observed for TritonX 100 at 3 000 mg·L⁻¹. All the three surfactants show higher efficiency for desorption and removal of 2,4'-DDD and 4,4'-DDD than the other metabolites, and the least efficiency is observed for 4,4'-DDT. Removal rates of 2,4'-DDD and 4,4'-DDD are as high as 55.12% and 54.09% as extracted by Tween60, and 59.99% and 57.10% as extracted by SDS, respectively. Results of this study will provide a theoretical basis for selection of suitable surfactants and engineering applications of surfactant enhanced washing for DDTs contaminated site soil.

Key words: soil remediation; soil washing; DDTs; contaminated site; surfactant